



**HAL**  
open science

# Les enjeux de la caractérisation des déchets ménagers pour le choix des traitements adaptés dans les pays en développement : résultats de la caractérisation dans le grand Tunis mise au point d'un méthode adaptée

Samira Ben Ammar

## ► To cite this version:

Samira Ben Ammar. Les enjeux de la caractérisation des déchets ménagers pour le choix des traitements adaptés dans les pays en développement : résultats de la caractérisation dans le grand Tunis mise au point d'un méthode adaptée. Autre. Institut National Polytechnique de Lorraine, 2006. Français. NNT : 2006INPL065N . tel-01752488

**HAL Id: tel-01752488**

**<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01752488>**

Submitted on 29 Mar 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



## AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : [ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr](mailto:ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr)

## LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

[http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg\\_droi.php](http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php)

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

**INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE  
ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DE GÉOLOGIE DE NANCY  
Laboratoire Environnement et Minéralurgie**

**THÈSE**

Pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE**

***DISCIPLINE : GÉOSCIENCES***

présentée et soutenue publiquement

par

**Samira BEN AMMAR**

le 27 Octobre 2006

**LES ENJEUX DE LA CARACTÉRISATION DES DÉCHETS MÉNAGERS POUR LE  
CHOIX DE TRAITEMENTS ADAPTÉS DANS LES PAYS EN DÉVELOPPEMENT**

**RÉSULTATS DE LA CARACTÉRISATION DANS LE GRAND TUNIS  
MISE AU POINT D'UNE MÉTHODE ADAPTÉE**

***JURY***

M. Gérard GILLET  
M. Jean-Louis PINEAU

Maître de Conférences, INP de Lorraine (Directeur Thèse)  
Maître de Conférences, INP de Lorraine (Co-Directeur Thèse)

M. Jacques YVON  
M. Manef ABDERRABA  
M. Remy GOURDON  
M. Mourad BEDIR  
M. Bernard FOULLY  
M. Mustapha KLEICHE

Professeur, INP de Lorraine (Président)  
Professeur, Technopôle de Borj Cedria-Tunisie (Rapporteur)  
Professeur, INSA de Lyon (Rapporteur)  
Professeur, CERTE-TBC Tunisie (Examinateur)  
Ingénieur, ADEME-DAI, Paris (Examinateur)  
Ingénieur, Agence Française de Développement (Examinateur)

***INVITES***

M. Cherif ARIF  
M. Jean-Paul LEGLISE

Ingénieur, Banque Mondiale  
Ingénieur, International Solid Waste Association

---

Les travaux de cette thèse ont été effectués à la « Plate-forme Expérimentale sur les Déchets » du Centre de Recherche et des Technologies des Eaux à la Technopôle de Borj Cedria (Tunis-Tunisie)

Avec le soutien technique et financier :

- du Ministère tunisien de la Recherche Scientifique, de la Technologie et du Développement des Compétences (MRSTDC)
- de l'Ambassade de France en Tunisie (IFC)
- de l'Agence française de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME)

Avec la collaboration des institutions tunisiennes suivantes :

- la Direction de la Propreté de la Ville de Tunis
- l'Agence Nationale de la Gestion des Déchets (ANGED)
- l'Agence d'Urbanisme du Grand Tunis (AUGT)

**« LES ORDURES SONT LE REFLET DU MODE DE VIE  
DE L'ÊTRE HUMAIN »**

UN RESIDU DE LA VIE URBAINE DEVIENT DECHET A PARTIR DU MOMENT OU IL A PERDU UNE VALEUR POUR LA PRODUCTION ET L'USAGE. CETTE VALEUR EST VARIABLE A LA FOIS D'UN PAYS A L'AUTRE, D'UNE VILLE A L'AUTRE, MAIS AUSSI DANS LE TEMPS ET SUR UNE MEME AGGLOMERATION.

**« C'EST CETTE VALEUR QUI INFLUENCE LA QUANTITE ET LA  
COMPOSITION DES DECHETS,  
QUESTION CLEF DE LA GESTION DES DECHETS »**

***A LA MÉMOIRE DE MA MÈRE.***

## REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail de recherche, il m'est agréable de remercier toutes les personnes qui, chacune à leur manière, m'ont permis de le mener à bien.

Tout d'abord, Monsieur Gérard GILLET, Maître de Conférence à l'Institut National Polytechnique de Lorraine et Directeur de cette thèse. Je tiens à le remercier pour son soutien bienveillant, son suivi scientifique et les facilités administratives qu'il a assurées tout au long de ce travail.

Monsieur Jean-Louis PINEAU, Maître de Conférence à l'Institut National Polytechnique de Lorraine a accepté de co-diriger mes travaux de recherche et m'a apporté son expérience dans le domaine si particulier des statistiques appliquées aux déchets. Je lui adresse mes vifs remerciements.

Monsieur Bernard FOULLY, Responsable des Programmes Déchets à la Direction de l'Action Internationale de l'Agence de l'Environnement et de Maîtrise de l'Energie, a été l'initiateur et le responsable scientifique et technique de cette recherche. Il m'a apporté toute son expérience des déchets dans les pays en développement et a suivi en permanence le déroulement de mes travaux. Je le remercie vivement pour tout cela, ainsi que pour son appui à la rédaction et à la relecture de mon manuscrit.

Monsieur Manef ABDERRABA, Directeur Général de la Technopôle de Borj Cedria (Tunisie) a accepté d'être rapporteur de cette thèse. Je l'en remercie et lui témoigne ma gratitude pour les encouragements qu'il n'a cessé de me prodiguer tout au long de mes travaux.

Monsieur Rémy GOURDON, Directeur du Laboratoire d'Analyse Environnementale des Procédés et Systèmes Industriels de l'INSA de Lyon a aussi accepté d'être rapporteur de cette thèse. Sa longue expérience du domaine des déchets est une garantie de l'appréciation du travail accompli. Je l'en remercie vivement.

Monsieur Mustapha KLEICHE, Ingénieur à l'Agence Française de Développement a accepté d'être examinateur de cette thèse. Son expérience personnelle et professionnelle du terrain et des projets de développement dans les PED apporteront l'avis autorisé concernant la finalité et l'usage de ce travail. Je le remercie pour m'avoir honorée de sa présence dans le jury de cette thèse.

Monsieur Jacques YVON, Directeur du Laboratoire Environnement et Minéralurgie de l'INPL. Je le remercie pour avoir accepté de juger mes travaux, ainsi que pour son soutien dans les autorisations administratives nécessaires.

L'expression de ma plus chaleureuse et sincère reconnaissance à Monsieur Mourad BEDIR, Directeur Général du Centre des Recherches et des Technologies des Eaux à la Technopôle de Borj Cedria (Tunisie), pour son soutien et son aide précieuse tout au long de mes recherches.

Monsieur Jean-Paul LEGLISE, actuel Représentant National Français et récent Président de l'ISWA (International Solid Waste Association), par sa longue expérience et ses responsabilités dans le milieu professionnel des déchets - et Monsieur Cherif ARIF, Conseiller régional (Afrique du Nord et Moyen-Orient) à la Banque Mondiale, par son rôle éminent dans l'animation des programmes d'assistance technique aux PED, ont accepté de juger ce travail en apportant leur opinion sur son intérêt et son usage. Je les remercie pour m'avoir honorée de leur présence à la soutenance de cette thèse.

Je remercie l'Institut Français de Coopération de l'Ambassade de France en Tunisie pour son soutien financier à la réalisation de cette thèse.

Je remercie l'ADEME qui a mis à ma disposition tout le fond documentaire sur le sujet et a organisé tous mes séjours en France. En particulier, Messieurs Michel HAMELIN, Directeur Adjoint de la Direction Internationale, Jean-Claude Oppeneau, Conseiller de Recherche et Philippe MASSET, Chef du Département Programmes et Projets Internationaux.

Mes remerciements s'adressent également à Monsieur Bernard MORVAN, Ingénieur de Recherche au CEMAGREF de Rennes pour son aide et sa disponibilité.

Ce travail n'aurait pas pu être mené à son terme sans la précieuse collaboration des institutions tunisiennes suivantes : la ville de Tunis, l'Agence Nationale de Gestion des Déchets et l'Agence de l'Urbanisme du Grand Tunis (AUGT). Je remercie en particulier Mme Radhia MASLAH, Ingénieur à l'AUGT et Mr Yacine TURKI, ancien ingénieur à l'AUGT et actuellement Directeur Général de l'Institut Supérieur des Technologies de l'Environnement, de l'Urbanisme et du Bâtiment.

Monsieur Ridha MEKSI, Directeur de la Propreté de la ville de Tunis, m'a apporté son conseil et a mis à ma disposition tous les moyens matériels et humains nécessaires à la réalisation des campagnes de caractérisation. Qu'il trouve ici le témoignage de toute ma reconnaissance, de ma sympathie et de mes plus sincères remerciements.

Je remercie également Mohamed et Hassan, ingénieurs à la Société Maghrébine de Gestion des Déchets (SOMAGED), pour leur précieuse aide sur la décharge de Borj Chékir.

Mes pensées les plus chaleureuses vont à Nesrine KHELIFI, Salwa SOULI, Mahrez et Kais BOUTHOURI, qui ont constitué une équipe soudée autour de moi et préservé une indispensable bonne ambiance de travail, malgré les moyens limités du laboratoire et les conditions de travail très difficiles, en particulier celles sur la décharge (surtout pendant les rudes journées de caractérisation de juillet 2004 et de janvier 2005). Je remercie également Mlle Amel AYARI, pour son soutien et sa précieuse complicité.

Enfin j'adresse un grand merci à mon amie Nébiha dont la disponibilité et la gentillesse m'ont beaucoup aidé à surmonter les moments les plus durs et les obstacles les plus difficiles.

**A toutes et à tous Merci.**

## AVANT-PROPOS

Ce travail a été réalisé dans le cadre du Programme de Recherche « Mise en place d'une filière compostage en Tunisie ». Ce programme financé par le Ministère tunisien de la Recherche est mis en œuvre par la Technopôle de Borj Cedria et s'appuie sur la « *Plate-forme Expérimentale sur les Déchets* » que la technopôle est en train de développer. Ce programme est soutenu techniquement et financièrement par l'Agence française De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) et l'Institut Français de Coopération de l'Ambassade de France en Tunisie.

Pour mener à bien chacune des composantes du programme, des accords de coopérations ont été établis avec les institutions tunisiennes concernées par la gestion des déchets et le compostage. Les institutions qui ont contribué au développement de l'axe « Caractérisation des Déchets » de ce programme sont : l'Agence Nationale de Gestion des Déchets (ANGED), la Direction de la Propreté de la Ville de Tunis et l'Agence de l'Urbanisme du Grand Tunis (AUGT).

Malgré tous les moyens mis à disposition par les partenaires institutionnels et ceux propres à la Technopôle de Borj Cedria, la caractérisation des déchets ménagers dans le Grand Tunis s'est heurtée à de nombreuses difficultés depuis la collecte des données jusqu'à l'analyse des résultats. L'envergure des travaux d'enquête, d'organisation et d'analyse ainsi que la diversité et l'importance des difficultés rencontrées, mettent en évidence la lourdeur et la complexité d'une telle caractérisation dans le cas des pays en développement, et justifient le besoin de connaître précisément les déchets selon des méthodes rigoureuses et spécifiques à ces pays.

D'après la classification de la Banque Mondiale, le terme général « Pays En Développement » englobe une diversité de situations socio-économiques qui permettent de subdiviser ces pays en 2 catégories, selon leurs revenus moyens par habitant et par an (du Produit National Brut) :

- les Pays les Moins Avancés (PMA), caractérisés par un faible PNB par habitant ;
- les Nouveaux Pays Industrialisés (NPI), caractérisés par un moyen PNB par habitant

Certaines économies en transition à revenus intermédiaires sont classées dans certains cas parmi les pays en développement.

Qu'ils soient PMA ou NPI, la croissance démographique très rapide des pays en développement, s'est accompagnée d'une extension périphérique spontanée, non planifiée ou non contrôlée, voire anarchique. Ce développement rapide et désordonné et l'insuffisance des moyens mis en œuvre par les politiques publiques conduisent à des situations dramatiques de carences des services urbains : manque d'eau potable, d'assainissement, de transport urbain, etc. Dans le domaine des déchets ménagers, le déficit est d'autant plus important que le secteur est souvent perçu, comme moins prioritaire que l'alimentation en eau ou l'électricité.

## SOMMAIRE

Sigles et Abréviations .....	11
INTRODUCTION .....	13

<b>1<sup>ère</sup> Partie. SITUATION DES DECHETS DANS LES PAYS EN DEVELOPPEMENT ET ENJEUX DE LEUR CARACTERISATION</b>
---

<b>Chapitre 1. Situation Générale et Cas Particuliers</b>
---

<b>I. Description de la situation des déchets dans les pays en développement.....</b>	19
1. La collecte et le transfert .....	19
2. Le traitement et la valorisation .....	20
<b>II. Bilans et analyses des problèmes .....</b>	<b>30</b>
1. Cas de la Collecte des déchets .....	30
2. Cas de la mise en Décharge .....	31
3. Cas du Compostage .....	32
4. Cas de l'Incinération .....	33
5. Cas des Collectes Sélectives et du Recyclage .....	33
<b>III. Nécessité d'une démarche de « Recherche-Développement » pour le choix de traitements adaptés aux contextes des PED .....</b>	<b>34</b>
1. Nécessité d'une démarche expérimentale pour caractériser les systèmes de traitement .....	34
2. Nécessité d'une démarche préalable de caractérisation des déchets .....	35

<b>Chapitre 2. le Besoin Préalable de la Caractérisation des Déchets</b>
--

<b>I. Caractéristiques générales des déchets urbains dans les pays en développement .....</b>	<b>38</b>
1. Identification des flux .....	38
2. Caractéristiques des déchets ménagers et assimilés .....	40
3. Hétérogénéités et facteurs de variations .....	43
<b>II. Faible connaissance des déchets ménagers dans les pays en développement .....</b>	<b>45</b>
1. Revue des données existantes .....	45
2. Divers constats de la faiblesse des données existantes .....	49
3. Causes et conséquences de la méconnaissance des gisements .....	50

<b>Chapitre 3. Besoin de Méthodes de Caractérisation Adaptées aux cas des PED</b>
---

<b>I. Les Enjeux de la caractérisation des déchets .....</b>	<b>54</b>
<b>II. Les Principales méthodes de caractérisation des déchets .....</b>	<b>55</b>
1. Les méthodes et modèles théoriques .....	55
2. Les méthodes d'analyse directe .....	56
3. Limites et faiblesses des méthodes de caractérisation des déchets .....	59
<b>III. Le Besoin de méthodes de caractérisation rigoureuses, opérationnelles et adaptées pour les PED .....</b>	<b>61</b>
1. Inadaptation des méthodes développées dans les pays industrialisés .....	61
2. Besoin de prise en compte des spécificités des pays en développement .....	62

## **2<sup>EME</sup> PARTIE. MISE AU POINT D'UNE METHODE DE CARACTERISATION DES DECHETS ADAPTEE A LA SITUATION DES PED**

### **Chapitre 1. Cadre et Approche Méthodologique pour la Caractérisation des Déchets Ménagers dans les pays en développement**

<b>I. Cadre institutionnel et pratique de la conception de la méthode de caractérisation des déchets ménagers .....</b>	64
1. Description du programme « Compostage » .....	64
2. Description de la « Plate-forme Expérimentale sur les Déchets » .....	66
<b>II. Approche méthodologique pour le cadrage d'une méthode de caractérisation des déchets ménagers dans les PED .....</b>	69
1. Identification des contraintes des PED .....	69
2. Intégration des contraintes dans la démarche méthodologique .....	73
<b>III. Application de la démarche méthodologique dans le cas particulier de la caractérisation des déchets dans le Grand Tunis .....</b>	80
1. Identification des contraintes locales .....	80
2. Conditions de l'intégration des contraintes dans la phase préalable à la caractérisation .....	85
3. La mise au point de la nomenclature et des protocoles d'échantillonnage et de tri .....	89

### **Chapitre 2. Bases Scientifiques de la Méthode**

<b>I. Problématique de l'échantillonnage des déchets ménagers .....</b>	95
1. L'échantillonnage : définition, importance et qualité .....	95
2. L'erreur fondamentale d'échantillonnage et notion de représentativité .....	95
3. L'échantillonnage des déchets à composants majoritaires .....	98
<b>II. Détermination de la stratégie d'échantillonnage dans le cas du Grand Tunis .....</b>	101
1. Les références de normalisation de l'échantillonnage des déchets ménagers .....	101
2. Détermination des paramètres d'échantillonnage .....	103
3. Détermination de l'erreur fondamentale d'échantillonnage .....	109
<b>III. Mise au point d'un mode opératoire de tri adapté .....</b>	110
1. Description et analyse comparative des modes opératoires existants .....	110
2. Inadaptation des modes de tri existants au cas des PED et principes d'un mode de « tri adapté » .....	112
3. Analyse comparative du « tri adapté » par rapport aux tris « sec » et « humide » .....	115
4. Bilan comparatif et avantages avérés du « tri adapté » par rapport aux modes de tris existants .....	125

### **3<sup>ème</sup> Partie. VALIDATION DE LA METHODE DE CARACTERISATION**

#### **Chapitre 1. Contexte Général et Validation de la Méthode dans le Grand Tunis**

<b>I. Contexte général et besoin d'une réelle connaissance des déchets ménagers en Tunisie ....</b>	<b>128</b>
1. La stratégie nationale en matière de gestion des déchets solides .....	128
2. La composition des déchets ménagers et assimilés en Tunisie .....	131
<b>II. Identification des caractéristiques du Grand Tunis .....</b>	<b>133</b>
1. Caractéristiques urbaines, démographiques et socio-économiques .....	133
2. Evaluation de la production de déchets ménagers et assimilés .....	137
<b>III. La sectorisation du Grand Tunis .....</b>	<b>141</b>
1. Les critères de sectorisation .....	141
2. Les résultats de la sectorisation .....	141
<b>IV. Le choix des zones d'échantillonnage .....</b>	<b>145</b>
1. Choix des zones d'échantillonnage selon le mode d'acheminement des déchets vers la décharge .....	145
2. Choix des zones d'échantillonnage selon la disponibilité des données .....	146
<b>V. Le choix des périodes d'échantillonnage .....</b>	<b>148</b>

#### **Chapitre 2. Organisation et Déroulement des Campagnes de Caractérisation dans la Ville de Tunis**

<b>I. Evaluation des déchets ménagers et assimilés générés par la ville de Tunis et description de leurs modes de collecte .....</b>	<b>150</b>
1. Description des divers flux de déchets solides et de leurs modes de collecte .....	150
2. Evaluation des divers flux de déchets solides générés par la ville de Tunis .....	152
3. Bilan des divers flux et calcul des ratios de production propres aux déchets ménagers et assimilés .....	156
4. Description de la collecte des déchets par la Direction de la Propreté de la ville de Tunis .....	159
<b>II. Organisation des campagnes de caractérisation .....</b>	<b>161</b>
1. Identification des secteurs d'échantillonnage .....	161
2. Choix des bennes à échantillonner .....	162
3. Planification des opérations d'échantillonnage et de tri .....	166
<b>III. Déroulement des campagnes caractérisation .....</b>	<b>167</b>
1. Déroulement des opérations d'échantillonnages et de tris préalables .....	168
2. Déroulement des opérations de séchage et de tris complémentaires .....	169
3. Déroulement des analyses au laboratoire .....	170

## 4<sup>ème</sup> Partie. LA CARACTERISATION DES DECHETS MENAGERS ET ASSIMILES DANS LE GRAND TUNIS : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

### Chapitre 1. Analyse des Résultats et Précision des Mesures

<b>I. Bilan des campagnes d'échantillonnage</b> .....	173
1. Rappel de la stratégie d'échantillonnage .....	173
2. Bilan des opérations d'échantillonnage et de tri .....	173
<b>II. Présentation des résultats et précision des mesures</b> .....	176
1. Calcul de la composition des échantillons triés et présentation des résultats .....	177
2. Précision des mesures .....	178

### Chapitre 2. La Composition des Déchets en Catégories et Sous-Catégories et en Tranches Granulométriques

<b>I. La composition des déchets ménagers et assimilés en catégories et sous-catégories par secteurs et par saisons</b> .....	184
1. La composition des déchets en catégories .....	184
2. La composition des déchets en sous-catégories .....	189
<b>II. La composition des déchets ménagers et assimilés en tranches granulométriques par secteurs et par saisons</b> .....	194
1. La composition granulométrique globale .....	194
2. La composition granulométrique par catégories .....	195

### Chapitre 3. Estimation des Composants Valorisables par Compostage et par Recyclage

<b>I. Estimation des composants valorisables par compostage</b> .....	199
1. Estimation des composants fermentescibles en pourcentages par secteurs et par saisons .....	199
2. Estimation des composants fermentescibles en taux de production par habitant par secteurs et par saisons .....	199
<b>II. Estimation des composants potentiellement valorisables par recyclage</b> .....	206
1. Estimation des composants potentiellement recyclables en pourcentages par secteurs et par saisons .....	207
2. Estimation des composants potentiellement recyclables en taux de production par habitant par secteurs et par saisons .....	209

### Chapitre 4. Caractéristiques Physico-Chimiques des Composants des Déchets

<b>I. Humidités des déchets par secteurs et par saisons</b> .....	217
1. Détermination de l'humidité globale des échantillons triés .....	217
2. Détermination de l'humidité par catégories et par fractions granulométriques .....	218
<b>II. Détermination des taux de matières organiques</b> .....	220
1. Objectif des mesures et bilan analytique .....	220
2. Détermination des taux de matières organiques dans les fractions « très fines » .....	220
3. Détermination des taux de matières organiques dans les fermentescibles .....	221
<b>III. Détermination des teneurs en carbone et en azote</b> .....	222
1. Objectif des mesures et bilan analytique .....	222
2. Détermination des teneurs en carbone des composants fermentescibles .....	223
3. Détermination des teneurs en azote des composants fermentescibles .....	223
4. Détermination des rapports C/N des composants fermentescibles .....	223
<b>IV. Détermination des éléments traces métalliques</b> .....	225
1. Objectif des mesures et bilan analytique .....	225
2. Généralités sur les éléments traces métalliques .....	225
3. Détermination des teneurs en ETM des échantillons triés .....	228

<b>Chapitre 5. Bilan des Gisements dans le Grand Tunis et Analyse de leur aptitude à la Valorisation par Compostage et par Recyclage</b>
--

<b>I. La composition des déchets ménagers et assimilés dans le Grand Tunis .....</b>	<b>232</b>
1. La composition annuelle moyenne par habitant .....	232
2. La composition annuelle par habitant selon les secteurs échantillonnés .....	234
<b>II. Les gisements valorisables par compostage .....</b>	<b>237</b>
1. Les gisements par secteurs et par communes .....	237
2. Les gisements en terme de catégories .....	240
3. Les gisements en terme de granulométries .....	242
4. L'aptitude des déchets au compostage en terme de paramètres physico-chimiques .....	246
<b>III. Les gisements potentiellement valorisables par recyclage .....</b>	<b>251</b>
1. Le gisement global en masse humide .....	252
2. Le gisement en terme de catégories et de sous-catégories en masses sèches .....	252
3. Le gisement potentiel des emballages ciblés par le système « Eco-Lef » .....	255
4. Bilan et analyse du système « Eco-Lef » .....	260
 <b>CONCLUSION .....</b>	 <b>264</b>
 <b>Références Bibliographiques .....</b>	 <b>282</b>
<b>Liste des Figures .....</b>	<b>292</b>
<b>Liste des Tableaux .....</b>	<b>296</b>
<b>Annexes : Planches Photographiques .....</b>	<b>301</b>
<b>Table des Matières .....</b>	<b>317</b>

## SIGLES ET ABRÉVIATIONS

<b>ADEME</b>	Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
<b>AFNOR</b>	Association Française de NORmalisation
<b>ANGED</b>	Agence Nationale de GEstion des Déchets
<b>ANPE</b>	Agence Nationale de Protection de l'Environnement
<b>AUGT</b>	Agence de l'Urbanisme du Grand Tunis
<b>BEI</b>	Banque Européenne d'Investissement
<b>BM</b>	Banque Mondiale
<b>Chap</b>	Chapitre
<b>C/N</b>	rapport Carbone sur Azote
<b>ETM</b>	Eléments Traces Métalliques
<b>Fig</b>	Figure
<b>GTZ</b>	Assistance technique allemande - Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit
<b>DIB</b>	Déchet Industriel Banal
<b>INS</b>	Institut National de Statistiques
<b>KfW</b>	Kreditanstalt für Wiederaufbau
<b>MENA</b>	sigle de la Banque Mondiale pour le Moyen-Orient et l'Afrique du Nord
<b>MODECOM</b>	MéthODE de Caractérisation des Ordures Ménagères
<b>MOT</b>	Matière Organique Totale
<b>MS</b>	Matière Sèche
<b>NPI</b>	Nouveaux Pays Industrialisés
<b>PCI</b>	Pouvoir Calorifique Inférieur
<b>PED</b>	Pays En Développement
<b>PET</b>	Polyéthylène Tétraphtalate
<b>PEHD</b>	Polyéthylène Haute densité
<b>PI</b>	Pays Industrialisés
<b>PMA</b>	Pays les Moins Avancés
<b>PNB</b>	Produit National Brut
<b>PP</b>	Polypropylène
<b>PRONAGDES</b>	PROgramme NAtional de Gestion des DEchets Solides
<b>PVC</b>	Polychlorure de Vinyle
<b>R&amp;D</b>	Recherche-Développement
<b>Tab</b>	Tableau
<b>TBC</b>	Technopôle de Broj Cedria
<b>USAID</b>	Agence Américaine pour le Développement International
<b>§</b>	paragraphe

**Unités :**

<b>mth/kg</b>	millithermie par kilogramme
<b>KJ/kg</b>	Kilojoule par kilogramme
<b>Kcal/kg</b>	Kilocalorie par kilogramme
<b>Km</b>	Kilomètre

**Monnaies :**

<b>FF</b>	Franc Français
<b>€</b>	Euro
<b>DEM</b>	Mark Allemand
<b>EU\$</b>	Dollar des Etats-Unis

**INTRODUCTION**

La question de la gestion des déchets dans les pays en développement peut apparaître de prime abord moins problématique que la plupart des autres problèmes environnementaux, tels que la pollution des eaux ou de l'air. Plus particulièrement en ce qui concerne les déchets ménagers, les solutions de collecte et de traitement peuvent paraître évidentes : il suffit de les transporter avec des camions jusqu'à des lieux de traitement par mise en décharge, incinération ou compostage.

Pourtant, il suffit de constater le grand nombre de projets ayant subi des échecs depuis plus de 30 ans, pour admettre l'envergure des problèmes et des difficultés rencontrés en ce domaine dans les PED. Ces échecs et difficultés peuvent s'illustrer par quelques constats significatifs :

- des comportements très différents de ce qui a été prévu au niveau de l'exploitation des décharges : énormes productions de lixiviats et traitements inopérants, compactage inefficace et enlèvement des engins, etc. ;
- de grands problèmes techniques de fonctionnement des installations, du compost de mauvaise qualité et des difficultés pour sa commercialisation, dans le cas du compostage ;
- la non combustion des déchets et des masses considérables de jus pollués dans les fosses des usines d'incinération ;
- les très faibles proportions de produits recyclables et la difficile mobilisation des populations pour les actes de séparation, au niveau des projets de collectes sélectives.

Selon notre propre expérience du terrain dans un PED, il apparaît que ces échecs sont dus principalement à l'importation de technologies occidentales « clé en main », sans aucune maîtrise des bases de conception et de fonctionnement des systèmes de traitement et sans démarche préalable d'adaptation et de choix comparatif des filières. Ce constat doit être corroboré par le fait que les expertises précises des raisons de ces échecs sont inexistantes ou très parcellaires.

La plupart de ces bases ne peuvent être obtenues que grâce à des données, mesures et analyses parfaitement fiables, effectuées dans des laboratoires spécialisés dans le domaine des déchets et selon une démarche expérimentale de caractérisation des systèmes de traitement. Cependant, si dans les pays développés les bases et outils méthodologiques et d'analyses spécifiques aux déchets existent, on ne peut que constater leur absence ou leur état embryonnaire dans les PED. Leur défaillance étant aisément explicable par l'absence de projets de nature Recherche-Développement, pour lesquels peu de compétences et peu de financements sont disponibles.

Une connaissance précise des paramètres de fonctionnement de chaque système de traitement est donc une condition préalable et objective à une démarche de choix de traitements des déchets adaptés aux PED. Pour la connaissance de ces paramètres, il est indispensable de disposer de données réelles de

caractérisation des déchets. Ce qui ne peut être acquis sans une méthode rigoureuse, opérationnelle et adaptée aux contraintes locales.

Par ailleurs, les résultats d'une caractérisation à l'échelle d'une agglomération doivent avoir des finalités bien établies qui permettent d'apporter, non seulement les données de la caractérisation des gisements (leur composition et leur répartition géographique selon les facteurs de variation), mais aussi de déterminer tous les éléments nécessaires aux paramétrages techniques des systèmes de traitements.

Notre travail de thèse s'inscrit dans le contexte de cette analyse et répond aux quatre objectifs fondamentaux suivants :

- mettre en évidence les enjeux de la caractérisation des déchets ménagers dans les PED et la nécessité d'utiliser des méthodes rigoureuses et adaptées aux spécificités de ces pays et à leurs contraintes opérationnelles ;
- mettre au point une telle méthode de caractérisation et sa validation dans le cas du Grand Tunis (Tunisie) ;
- réaliser la caractérisation globale des déchets ménagers dans le Grand Tunis, d'un point de vue quantitatif et qualitatif, et cartographier les gisements potentiellement valorisables ;
- mettre en évidence l'importance de la caractérisation des déchets, non seulement pour prendre position sur les choix de traitement mais de plus pour apporter des éléments basiques de paramétrage de ces choix, principalement pour le compostage.

Ce travail a donc été développé en quatre grandes parties :

➤ ***La première partie de ce document décrit la situation des déchets dans les pays en développement et met en évidence les enjeux de leur caractérisation :***

La situation des déchets dans les pays en développement est examinée à partir de l'analyse de la collecte et du transfert d'une part, et du traitement et de la valorisation d'autre part. Les principaux systèmes de traitement (décharge contrôlée, compostage, incinération, collectes sélectives et recyclage) sont décrits à partir de cas particuliers des PED et leurs problèmes sont analysés.

En matière de caractérisation des déchets, le bilan des résultats collectés fait apparaître un ensemble de lacunes qui aboutissent à une méconnaissance des déchets, autant sur le plan quantitatif (production) que qualitatif (composition). Ces lacunes apparaissent être dues à l'absence de méthodes rigoureuses basées sur des mesures et analyses réelles d'échantillons représentatifs, selon des protocoles précis et de plus adaptés à la nature des déchets et aux contextes locaux des pays en développement.

➤ ***La seconde partie est consacrée à la mise au point d'une méthode de caractérisation des déchets adaptée à la situation des pays en développement :***

Pour répondre aux contraintes et spécificités des pays en développement, nous proposons une méthode de caractérisation des déchets ménagers adaptée.

Le cadre institutionnel et les moyens de travail qui ont été nécessaires à la mise au point de cette méthode sont décrits. L'approche méthodologique pour son cadrage est présentée. Les exigences statistiques de l'échantillonnage des déchets ménagers sont identifiées et le mode de conception de la stratégie d'échantillonnage est précisé à partir des caractéristiques propres aux déchets locaux.

Un mode de tri adapté aux contraintes et aux spécificités des déchets des pays en développement a été mis au point. Une analyse comparative de ce mode de tri avec les modes de tris existants, basée sur des tests de laboratoire, a permis de préciser les modalités d'une telle méthode pour les PED, et de justifier ses avantages du point de vue du coût, de la précision et de la prise en compte des contraintes de ces pays.

➤ ***La troisième partie concerne la validation de la méthode dans le Grand Tunis :***

Dans le but de connaître et d'étudier les productions des déchets selon tous leurs paramètres de variations, les caractéristiques du Grand Tunis ont du être identifiées à partir :

- des données urbaines, démographiques et socio-économiques, elles-mêmes obtenues à partir de l'identification : des communes et des arrondissements, de la population sédentaire, des niveaux économiques des ménages et de l'activité économique ;
- de l'évaluation des productions des déchets qui a été obtenue à partir des recensements annuels et mensuels et des calculs des ratios journaliers par habitant.

La validation de la méthode et sa réalisation en vraie grandeur a concerné les 5 secteurs suivants du Grand Tunis : 3 secteurs à caractère résidentiel (à niveaux de vie : élevé, moyen et faible) et 2 secteurs à caractère commercial (à niveaux de vie : moyen et faible).

Pour tenir compte des variations saisonnières, 4 campagnes ont été programmées durant les 4 saisons de l'année : la campagne du Printemps (en avril 2004), la campagne de l'Été (en juillet 2004), la campagne de l'Automne (en octobre 2004) et la campagne de l'Hiver (en février 2005).

Les campagnes de caractérisation se sont déroulées suivant les 3 phases suivantes :

- une phase d'échantillonnages et de tris réalisée sur le site de la décharge de Borj Chékir,
- une phase de séchages et de tris complémentaires réalisée au « Hall Déchets » à la Technopôle de Borj Cedria
- une phase d'analyses réalisée au laboratoire (à Borj Cedria).

➤ ***La quatrième et dernière partie est consacrée à l'analyse des résultats et à leur interprétation :***

Conformément au plan d'échantillonnage, les 4 campagnes de caractérisation des déchets menées dans les 5 secteurs du Grand Tunis ont permis la constitution de 600 échantillons d'une masse totale de 12 tonnes. Pour chaque échantillon, des résultats quantitatifs et qualitatifs de 3 ordres ont été obtenus :

- la répartition des composants des déchets (en 12 catégories) suite aux opérations de tris,
- la répartition des granulométries des déchets (en 3 fractions granulométriques) suite aux opérations de criblages,
- les teneurs en composants physico-chimiques suite aux analyses de laboratoire.

Les données de compositions moyennes des déchets triés ont permis d'évaluer les gisements de composants valorisables par compostage et par recyclage selon chaque saison et selon chaque secteur du Grand Tunis. Les données complémentaires granulométriques et physico-chimiques ont permis de préciser les modalités et les contraintes de ces systèmes de traitement.

Ce travail de recherche a été réalisé à la « *Plate-forme expérimentale sur les Déchets* » de la Technopôle de Borj Cedria (Tunisie). Il a été financé par le Ministère tunisien de la Recherche avec le soutien technique et financier de l'ADEME.

**1ERE PARTIE**

**SITUATION DES DECHETS DANS LES PAYS EN DEVELOPPEMENT  
ET ENJEUX DE LEUR CARACTERISATION**

**CHAPITRE 1**

**SITUATION GENERALE ET CAS PARTICULIERS**

## I. DESCRIPTION DE LA SITUATION DES DECHETS DANS LES PAYS EN DEVELOPPEMENT

### 1. la Collecte et le transfert :

Dans les pays en développement, le taux de collecte des déchets est rarement performant, si ce n'est dans certains quartiers privilégiés (centres commerciaux, zones touristiques, quartiers résidentiels de haut standing). Il varie généralement de 50% à 70%, mais il est beaucoup plus faible dans les quartiers populaires. Dans ces cas là, il n'est pas rare d'observer les habitants déposant leurs ordures dans les drains et les caniveaux ou dans les terrains vagues, provoquant ainsi l'obstruction des canalisations ou la création des dépôts sauvages.

En raison de l'hétérogénéité des espaces urbains, les systèmes de collecte varient du porte-à-porte à la collecte par quartier au moyen de conteneurs, la pré-collecte étant alors assurée par les habitants. En conséquence, les véhicules de collecte utilisés par les communes pour le ramassage des ordures ménagères sont très variés : camions, bennes tasseuses, tracteurs, charrettes à mulets ou à bras [35]<sup>1</sup> :

- le système de ramassage par des bennes tasseuses n'est possible que dans les centres des villes et dans les quartiers occupés par les classes moyennes et aisées, où ces véhicules peuvent accéder sans problèmes ;
- pour le reste, c'est un système soit en porte à porte, soit d'apport volontaire, avec des bennes et des conteneurs de décharge en vrac ou bien des baies en béton qui permettent le chargement manuel ou par pelles mécaniques des ordures dans des camions basculants et camions à conteneurs. La collecte se fait généralement par des charrettes ou à dos de mulets étant donné l'état et l'exiguïté des rues.

Les récipients de collecte sont généralement de vieux bidons, des sceaux, souvent en mauvais état, peu aisés à manipuler et entraînant des risques de blessures pour les employés du nettoyage. Seuls les grands hôtels, les résidences importantes et les administrations, peuvent disposer de poubelles en plastique ou de sacs en polyéthylène. Des bacs collectifs sont installés dans certaines grandes villes (Rabat, Tunis, Le Caire, ...)

D'une façon générale, le balayage, qui est le plus souvent manuel avec sceau et balai, n'est pas clairement distingué des activités de collecte proprement dite : les ouvriers chargés du ramassage des ordures passent une partie de leur temps à nettoyer les déchets autour des conteneurs, tandis que les employés chargés du balayage transvasent occasionnellement les ordures dans des poubelles ou des demi-fûts.

---

<sup>1</sup> Renvoi aux Références Bibliographiques

La collecte et le transfert constituent la partie la plus visible du système de gestion des déchets solides pour la population en milieu urbain. Ils absorbent une part considérable des budgets municipaux. Dans les pays industrialisés, les frais de collecte représentent 60 à 70% du total des dépenses, alors que cette proportion dans les PED dépasse les 70%. Au Maroc elle varie entre 70 et 90% de l'ensemble des frais de gestion des déchets solides [34]. Ainsi, il apparaît clairement que les services de collecte et d'élimination, même dans leur état partiel, coûtent cher aux communes.

Même si le taux d'allocation des ressources à la collecte est très important, les services de collecte sont en général inefficaces en raison principalement de l'état vétuste du matériel et des déficiences de l'entretien. Le taux d'immobilisation des véhicules peut atteindre ou même dépasser 50%, comme c'est le cas en Algérie [48].

## **2. le Traitement et la valorisation :**

Dans les pays en développement, les déchets sont généralement déversés dans des décharges brutes - qui sont la plupart du temps des terrains vagues ou d'anciennes carrières situés aux limites extérieures de la ville - ou tout simplement rejetés dans le milieu naturel avoisinant (rivières, oueds, lacs, ...). Ces décharges sont le plus souvent à ciel ouvert ou dans le meilleur des cas recouvertes de sable. Il en résulte des nuisances et une dégradation de la situation sanitaire dont les meilleurs indicateurs sont le retour des maladies contagieuses et la prolifération des foyers endémiques. Cette pollution est d'autant plus inquiétante que les déchets ne sont pas seulement d'origine domestique mais également d'origine industrielle et hospitalière et de composition souvent inconnue.

Pour remédier à cet état d'insalubrité la recherche d'alternatives à la décharge brute s'impose. Pour cela, diverses techniques de traitement existent dont les principales sont :

- la mise en décharge contrôlée,
- l'incinération,
- le compostage,
- les collectes sélectives et le recyclage.

Toutes ces techniques de traitement supposent des coûts importants en investissement puis en fonctionnement, comparés au coût de la décharge brute. L'estimation par la Banque Mondiale [32] des coûts des principales techniques de traitement des déchets est présentée selon les situations économiques des pays dans le tableau 1.

Depuis les années 80-90, de grands projets financés par les bailleurs de fonds internationaux, basés sur les techniques de décharge contrôlée ou de compostage ou de l'incinération ont été implantés dans un

certain nombre des grandes villes des PED, appuyés par le démarchage commercial de sociétés occidentales, proposant des matériels et des services « clés en main ».

**Tableau 1. Coûts du traitement (en EU\$/tonne) des déchets selon les principales techniques [32]**

	<b>PED (PMA)</b>	<b>PED (NPI)</b>	<b>PI</b>
<b>Décharge sauvage</b>	0,5 - 2	1 - 3	5 – 10
<b>Décharge contrôlée</b>	1 - 5	3 - 10	20 – 50
<b>Compostage</b>	5 - 20	10 - 40	20 – 60
<b>Incinération</b>	40 - 60	30 – 80	70 - 100

Cependant, ces projets s'avèrent être mis en œuvre sur les standards des pays industrialisés et le plus souvent non adaptés aux contextes techniques, économiques et financiers locaux.

### **2.1. La mise en Décharge Contrôlée :**

Dans les pays en développement, la décharge contrôlée est à l'heure actuelle considérée comme la technique de traitement la plus facilement maîtrisable et la moins coûteuse. Dans plusieurs pays, des projets de décharges sont programmés, en cours d'implantation ou déjà réalisés. On peut citer en exemple :

- l'Algérie avec 48 décharges programmées [48]: 10 sont déjà réalisées mais non encore fonctionnelles et 17 en cours d'achèvement. A l'heure actuelle seule la décharge d'Alger est opérationnelle.
- la Tunisie avec 29 décharges programmées [54]: 4 sont réalisées et opérationnelles dont la décharge du Grand Tunis, 9 sont en cours d'achèvement et 16 sont planifiées.
- le Maroc avec 4 décharges programmées [51] : à l'heure actuelle seule la décharge d'Essaouira est opérationnelle ;
- la Palestine avec 4 décharges programmées [52]: seule la décharge de Gaza est actuellement opérationnelle.

Tous ces projets de décharge sont généralement basés sur des acquis technologiques, des critères de fonctionnement et des contextes climatiques entièrement différents (car propres aux pays développés). Ce qui est à l'origine de grandes difficultés de fonctionnement et des coûts entièrement différents de ce qui a été prévu lors de la conception des projets.

**2.1.1. Problèmes rencontrés à travers le cas de la décharge du Grand Tunis (Tunisie) :**

La décharge contrôlée des déchets ménagers et assimilés du Grand Tunis située à Borj Chékir (10km au S-W de Tunis) a été créée en Mai 1999 pour remplacer les deux décharges brutes de H.Lihoudia et de Raoued (qui ont fonctionné pendant près de 50 ans). Cette décharge s'étend sur 47 hectares (sur une réserve foncière totale de 124ha) et a une capacité d'accueil de 2 000 tonnes par jour, soit près de 700 000 tonnes par an.

Ayant bénéficié d'études détaillées et de techniques de construction et de gestion modernes, la décharge de Borj Chékir est considérée comme un modèle à suivre pour tous les pays de la région. En effet, elle a été conçue et équipée selon les normes européennes avec :

- un fond imperméable,
- des canalisations de drainage des lixiviats,
- un remplissage en casiers,
- une couverture quotidienne et intermédiaire des déchets,
- une collecte du biogaz et sa combustion en torchère,
- un pont bascule,
- une clôture, etc.

Cependant, dès les premiers mois de son exploitation, des difficultés de fonctionnement sont apparues [21] :

- manque d'entretien et difficultés d'usage des engins mécaniques,
- manque de pièces détachées et d'outils,
- défoncement des voies goudronnées,
- détérioration de la rampe d'accès au pont-basculé,
- obturation des canaux et détérioration des rigoles en béton,
- absence d'installation de dégazage,
- débordement du bassin de retenue des lixiviats,
- absence d'équipements de sécurité,
- présence de récupérateurs sur la décharge.

Avec le temps les difficultés d'exploitation se sont amplifiées. Six années après sa mise en fonction, la situation actuelle de la décharge est alarmante avec :

- de grandes difficultés de tassement et enlèvement des engins dans les ordures humides,
- de grandes carences en matériaux de recouvrement,
- un dégazage impossible, vu l'obturation par les déchets des buses construites pour l'évacuation du biogaz,

- un matériel fréquemment en panne et actuellement hors d'usage.
- des feux spontanés dans la masse des déchets,
- plus de 250 000 m<sup>3</sup> de lixiviats stockés sur le site de la décharge sans aucun traitement,

Pour régler provisoirement ce problème, de nombreuses lagunes ont dû être créées sur plusieurs hectares, pour le stockage des lixiviats.

### **2.1.2. Problèmes rencontrés à travers le cas de la décharge de Gaza (Palestine) :**

La décharge contrôlée des déchets ménagers de Gaza a une capacité annuelle de 89 000 tonnes. Elle a été créée en 1997 dans le cadre de la coopération allemande selon les techniques de construction et de gestion européennes :

- une étanchéisation du fond de la décharge,
- un système de drainage des lixiviats vers un bassin de récupération,
- un pont bascule, une clôture, etc.

Le drainage et la collecte du biogaz n'ont pas été envisagés car considérés non économiques. Pour le traitement des lixiviats, un système de pompage et d'aspersion a été conçu en vue d'une re-circulation des lixiviats sur la décharge. Les quantités de lixiviats prévues étaient alors considérées non importantes en raison des faibles précipitations (entre 200 à 450 mm/an).

Cependant, des comportements « inattendus » très différents de ce qui a été prévu ont été observés dès la première année d'exploitation de la décharge [39] :

- les productions annuelles de lixiviats sont de 9 600 m<sup>3</sup>, soit cinq fois plus de ce qui a été prévu ;
- les productions de lixiviats durant la saison sèche sont importantes (25,4 m<sup>3</sup>/jour), alors que l'on ne prévoyait pas de lixiviats en absence des pluies ;
- l'évaporation des lixiviats, par re-circulation sur la décharge, n'arrive pas à fonctionner même en saison sèche.

### **2.2. Le Compostage :**

Compte tenu de l'importance de la fraction organique contenue dans les déchets et de leur humidité, et le grand besoin des sols pauvres et dégradés en matière organique, le compostage constitue a priori une solution adéquate et d'un intérêt majeur pour les pays en développement.

Au cours des années 1960-1985, plus d'une centaine d'installations de compostage ont été construites dans de nombreux pays du sud : Inde, Chine, Indonésie, Brésil, Colombie, Côte d'Ivoire, etc., et en particulier dans quasiment tous les pays de la Méditerranée. Cependant, la

plupart de ces installations sont actuellement arrêtées et rares sont celles encore en activité ou seulement en activité réduite [38].

### 2.2.1. Echec du compostage à travers le cas du Maroc :

Depuis les années 70, cinq unités de compostage ont été construites au Maroc. Il s'agit de grandes unités industrielles qui ont été conçues, mises en place et financées grâce à des organismes étrangers de développement.

Mis à part l'installation de Rabat-Salé, qui a été arrêtée récemment, aucune unité de traitement n'a fonctionné plus de 6 ans [51].

**Tableau 2. Bilan des installations de Compostage au Maroc [51]**

Ville	Année de mise en service	Capacité nominale (Tonnes/jour)	Gestionnaire	Année d'arrêt de Fonctionnement
Rabat	1971	180	Municipalité puis RED	2000
Tétouan	1964	50	Municipalité	Non mise en service
Marrakech	1976	140	Municipalité	1980
Meknès	1980	200	Municipalité	1986
Casablanca	1975	700	Municipalité	1975

RED (Régie d'Electricité et de Distribution d'eau)

Toutes ces unités, celle de Rabat comprise, ont connu de sérieux problèmes techniques et financiers [34], en particulier :

- des pannes fréquentes
- le colmatage des équipements,
- le sous-dimensionnement des fosses de réception et des surfaces nécessaires à la fermentation,
- un compost de mauvaise qualité (présence de contaminants),
- des difficultés de commercialisation du compost,
- d'importantes nuisances environnementales (mauvaises odeurs).

### 2.2.2. Exemple de procédés industriels « clés en mains » à travers le cas de l'offre de Sousse (Tunisie) :

Les installations de compostage implantées dans les pays en développement reposent généralement sur des technologies importées « clés en main » sophistiquées et très coûteuses, d'où l'échec constaté que nous avons décrit à travers le cas du Maroc.

Le cas particulier de l'offre de l'usine de Sousse (ville du Centre à 140km-Sud de Tunis) présenté ci-après, illustre les principales caractéristiques technico-économiques de telles propositions.

Cette offre, négociée entre 1998 et 2000, est basée sur un procédé « en tunnel » de capacité 150 tonnes/jour. Elle fait apparaître les éléments suivants qui sont inadaptés, tant du point de vue technologique et économique, que du point de vue de la prise en compte des contraintes de la gestion des déchets [19], [20], [24] :

- un investissement très coûteux : 14,7 millions dinars HT (10 millions d'euros),
- une technologie sophistiquée avec contrôle automatisé de la fermentation et une logique de traitement inefficace et inadaptée comportant 2 broyeurs en tête,
- un coût de traitement et de production très élevé : 200 dinars la tonne de compost (125 euros/tonne),
- l'absence de la caractérisation des déchets,
- l'obligation de mise en place d'un système de collecte sélective,
- l'absence d'étude de marché.

### **2.2.3. Exemple de procédés « dits adaptés » à travers le cas de la station pilote de Béja (Tunisie) :**

Etant donné l'échec du compostage à l'échelle industrielle, des procédés artisanaux « dits adaptés » sont désormais promus dans le cadre des projets de coopérations internationales, par des institutions de développement. La « haute intensité de la main d'œuvre » est le motif d'adaptation au contraire de la « haute intensité capitalistique ».

En réalité, ces procédés basés sur la main d'œuvre ne peuvent être transposables à l'échelle industrielle. Par ailleurs, ils sont souvent inefficaces et n'ont été l'objet d'aucun effort de conception comme le met particulièrement en évidence le cas particulier de la station pilote de Béja (ville du Nord à 100km-NW de Tunis) présenté ci-après.

La station pilote de compostage des déchets ménagers de Béja (de capacité 1000t/an) a été créée en 1995 dans le cadre du projet de coopération avec l'Allemagne « Gestion des déchets solides dans les 11 villes de la vallée de la Medjerda » qui vise la sauvegarde des ressources en eau du bassin versant de la Medjerda. Ce projet sur financement tuniso-allemand (prêt KFW) est géré par le Ministère de l'Environnement tunisien et bénéficie d'une mission de conception et d'assistance technique fournie par la GTZ.

#### **■ Les difficultés de fonctionnement de la station :**

Malgré que le procédé ait nécessité plusieurs années de mise au point (de 1995 à 2000), de nombreuses difficultés sont apparues au niveau du process, de l'exploitation et de la commercialisation du compost [18]. Ces difficultés se sont traduites en particulier par un

faible taux d'extraction de la matière organique, une faible production (seulement 100 tonnes/an), des nuisances olfactives et l'absence de marché pour le compost.

■ Les résultats de l'expertise du procédé :

L'expertise d'une installation de compostage sur la base d'un protocole expérimental est la seule manière de juger objectivement tous les aspects technico-économiques de l'adaptation ou des performances du procédé.

Dans le cadre du programme de recherche « Mise en place d'une filière compostage en Tunisie » (programme décrit dans la 2<sup>ème</sup> partie-Chap1 de ce document), nous avons réalisé l'expertise de la station pilote de Béja en nous appuyant sur deux mémoires de projet de fin d'études de l'Ecole Supérieure d'Ingénieurs en Equipement Rural [44], [70]. Cette expertise a concerné toutes les phases du procédé : pré-fermentation, fermentation-maturation et criblage.

Les défaillances du procédé ont pu être ainsi mises en évidence, avec en particulier :

- le blocage de l'activité biologique durant la pré-fermentation : absence de perte de matière, refroidissement de l'andain, faible baisse de l'humidité ;
- la faible extraction de la matière organique au criblage : faible rendement, importante fraction des fermentescibles dans les refus ;
- la production d'un compost de qualité médiocre : présence d'une importante fraction d'inertes et de pierres et contamination par les métaux lourds.

### **2.3. l'Incinération :**

L'incinération apparaît pour de nombreux pays comme la plus attractive des solutions, souvent promue par une image de modernisme. Ses avantages supposés dans le contexte des PED sont mis en avant : gain de place face à des masses très grandes de déchets produites dans d'immenses agglomérations, avantage de récupération de l'énergie en raison de son coût ou de sa rareté, acquisition de technologies et de compétences modernes et performantes.

Au début des années 90, quelques premières usines d'incinération ont été construites en Asie (Inde, Chine et Indonésie) grandement motivées par l'apport énergétique de l'incinération. Ces installations, soit n'ont jamais fonctionné (cas de l'usine de New Delhi), soit ont fonctionné mais en rencontrant de très grandes difficultés (cas des usines de Poudong, de Shenzhen et de Surabaya).

#### **2.3.1. Difficultés et échec de l'incinération à travers le cas de l'usine de Poudong (Chine) :**

L'usine d'incinération de Pudong, dans la banlieue de Shanghai, a une capacité 1000 tonnes/jour. Au coût total de 500 millions FF (soit 76,2 millions d'euros), elle a bénéficié d'un co-financement français de 350 millions FF. Cette usine a été conçue selon les normes

européennes (par Alstöm), sur la base d'un PCI de 1450 mth/kg ; la puissance installée prévue initialement était de 17 MégaWatt.

Dès sa mise en route, diverses difficultés de fonctionnement sont apparues :

- l'auto-combustion (capacité de maintenir la combustion sans le rajout de combustibles supplémentaires) ne se fait pas en raison du faible PCI des déchets (1100 mth/kg),
- pour assurer la combustion, les déchets très humides doivent séjourner plusieurs jours avant d'être incinérés, ce qui engendre des dizaines de milliers de tonnes d'eau polluée au fond de la fosse,
- malgré l'assèchement des déchets, le PCI reste faible ce qui oblige le rajout de charbon.

### **2.3.2. Difficultés et échec de l'incinération à travers le cas de l'usine de Sourabaya (Indonésie) :**

L'usine d'incinération de Sourabaya a été confrontée aux mêmes difficultés de fonctionnement apparues dans le cas de l'usine de Pudong :

- l'auto-combustion des déchets est impossible en raison de leur faible PCI (1100 mth/kg),
- même après un séchage de 5 jours dans la fosse, qui amène le PCI à 1200 mth/kg, les déchets ne peuvent toujours pas brûler,
- du carburant doit être ajouté tous les jours, même durant la saison sèche et même après 5 jours de séchage dans la fosse, pour pouvoir assurer la combustion.

## **2.4. Les Collectes Sélectives & le Recyclage :**

### **2.4.1. Inefficacité du secteur informel :**

Dans les pays en développement, les activités de recyclage sont exercées par le secteur privé informel ; elles ont toujours existé et peuvent permettre la subsistance de parties très importantes de population. Ce type de recyclage s'effectue en général par des chiffonniers (scavengers, botaderos, etc... selon les pays) et concerne essentiellement les métaux, les papiers-cartons et les textiles. Par rapport à l'activité globale d'un pays et à la capacité de traitement des matières premières, la part de ce recyclage informel peut être très importante et revêtir un intérêt stratégique. Mais en réalité la part des déchets ménagers recyclés est peu significative, car ce recyclage concerne souvent des gisements collectés auprès de petites ou moyennes activités industrielles.

Le chiffonnage s'opère en 3 niveaux différents :

- dans les rues avant la collecte : les matériaux sont alors récupérés chez les petits artisans ou industriels, dans les conteneurs ou dans les déchets entassés dans la rue ;
- à bord des camions de collecte : où les chiffonniers - et souvent les rippeurs eux-mêmes- récupèrent les matériaux à partir des déchets collectés. ;
- sur le site des décharges (même celles contrôlées) : où les matériaux sont récupérés à partir des déchets mis en décharge.

Le chiffonnage s'accompagne souvent de risques considérables pour la santé et la sécurité des chiffonniers qui vivent souvent dans les décharges ou dans les bidonvilles avoisinants et travaillent dans des conditions d'hygiène déplorables. De même, ce type de récupération peut avoir un impact négatif sur l'efficacité de la collecte (éparpillement des déchets autour des conteneurs et ralentissement de la collecte par camions) et entrave l'exploitation des décharges. Très fréquemment, des accidents mortels sont déplorés. Par ailleurs, les quantités collectées sont marginales par rapport aux gisements potentiels recyclables. A Marrakech (au Maroc) ces quantités sont estimées à 50 tonnes/mois pour un gisement de déchets recyclables d'environ 2 400 tonnes/mois, soit à peine 2% [35].

Il est estimé que les chiffonniers représentent plus de 2% de la population d'Afrique, d'Asie et d'Amérique latine. Ils sont environ 16 000 personnes au Caire à vivre par le biais du recyclage en collectant les déchets générés par la ville [49].

#### **2.4.2. Echech du modèle « européen » à travers le cas de la Tunisie :**

Dans les pays en développement, la mise en place des collectes sélectives en vue du recyclage de certaines fractions, laisse souvent penser que ces stratégies, tout en réduisant les quantités à collecter vont entraîner des recettes et donc économiser des coûts. Cependant, les faibles proportions de produits recyclables constatés dans les déchets ménagers, les capacités de recyclage qui sont limitées, les surcoûts engendrés par une double organisation de collecte sont des paramètres qui doivent inciter à la prudence avant l'instauration de tels systèmes.

Les difficultés rencontrées par les stratégies de collectes sélectives dans les PED sont illustrées ci-après par le cas particulier de la Tunisie, où depuis 1994 le tri à la source a été successivement implanté sous ses diverses formes :

■ La collecte sélective en Porte A Porte (PAP) :

Instaurée en 1994 dans un quartier pilote (20 000 habitants/ 6 500 logements) de Tunis, dans le cadre d'une coopération technique avec le Luxembourg, cette collecte consiste en un tri sélectif des déchets au niveau des ménages.

Les déchets sont triés en trois fractions : une fraction organique (déchets de cuisine), une fraction recyclable (papier, cartons, plastique, etc.) et une fraction toxique (médicaments, piles, etc. .). La collecte de ces fractions est quotidienne, à l'exception des déchets toxiques qui sont collectés une fois par semaine.

■ La collecte sélective des déchets d'emballages par Apport Volontaire (AV) :

Ce type de collecte qui a démarré en août 1999, repose sur un apport volontaire des emballages ménagers vers des conteneurs de rue. Au total, 470 conteneurs ont été répartis dans 10 gouvernorats.

■ La collecte sélective des déchets d'emballages par Apport Rémunéré (AR) :

Cette collecte, mise en place en avril 2001, se base sur un système d'apport rémunéré des plastiques et des métaux. Des collecteurs individuels sont ainsi rémunérés en fonction du poids des déchets d'emballages apportés aux points de collecte appelés « Points Eco-Lef ». Ces derniers, au nombre de 28 (répartis dans 15 gouvernorats) sont des sites de réception et de tri primaire des déchets d'emballages ménagers, ressemblant à de petites déchetteries.

La collecte sélective des déchets d'emballages en AV et en AR s'appuie depuis Janvier 1998, sur un système public de reprise et de valorisation des emballages Eco~Lef. A l'instar des systèmes européens de reprise et de valorisation des déchets d'emballages ménagers (Eco-emballage en France, Dual System en Allemagne, etc.), le système tunisien Eco-Lef repose d'une part, sur la responsabilisation des producteurs et conditionneurs des emballages et d'autre part, sur la contribution financière prélevée sur chaque emballage mis sur le marché et perçue par le gouvernement tunisien. Les fonds ainsi obtenus doivent permettre de financer les équipements nécessaires au recyclage des déchets.

Tous ces système ont été successivement testés puis abandonnés. Quelque soit le système adopté, les collectes sélectives se sont révélées coûteuses et peu efficaces avec :

- un taux de tri faible, voir nul concernant les collectes sélectives en PAP et en AV ;
- un coût de collecte en AR, 20 fois plus cher qu'une collecte en mélange : la collecte d'1 tonne de plastiques coûte en moyenne 750 dinars, alors que la collecte en mélange ne coûte que 30 à 45 dinars la tonne.

Par ailleurs, on n'a pu que constater l'absence de filières de recyclage pérennes des emballages ménagers plastiques, faute d'existence du marché ou d'équipements adéquats des recycleurs.

De cette situation, il s'en est suivi :

- une réticence croissante des adhérents, en attente de justifications concrètes de leurs contributions au programme Eco~Lef [23] ;
- des centres de tri non-fonctionnels, et transformés pour l'occasion en centres de stockage de déchets, dans l'attente d'une solution de reprise.

## **II. BILANS ET ANALYSES DES PROBLEMES**

La description de la situation des déchets dans les pays en développement montre un bilan contrasté mais globalement déplorable avec des services de collecte et d'élimination des déchets gravement défaillants. Ces difficultés peuvent avoir des origines politiques (manque de stabilité du pouvoir local), juridiques (absence de réglementation sur la gestion des déchets) ou financières (manque de moyens et système de tarification inadapté).

Par ailleurs, on constate que les nombreux projets financés par les bailleurs de fonds internationaux aboutissent à l'importation de technologies occidentales « clé en main » ou à la copie de systèmes d'organisation et de gestion sur le modèle des pays développés. Ce transfert de technologies sophistiquées mises au point et utilisées dans les contextes européens, se fait généralement sans aucun développement technologique, ni aucune prise en compte des compositions des déchets très différentes ou des contraintes climatiques et économiques locales.

### **1. Cas de la Collecte des déchets :**

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

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

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

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

Par ailleurs, la mécanisation complexe des bennes tasseuses exige un entretien régulier et coûteux, ce qui est difficilement maîtrisé par les communes.

## **2. Cas de la mise en Décharge :**

Contrairement à la décharge brute, la décharge contrôlée doit répondre à un certain nombre d'impératifs concernant l'hygiène et la protection de l'environnement, dont les plus importants sont d'une part la protection des nappes d'eaux souterraines, des lixiviats drainés à travers la masse des déchets, par un fond imperméable (soit naturel soit artificiel) et d'autre part le drainage et le traitement des biogaz afin d'éviter les nuisances et la dispersion des gaz à effet de serre.

C'est en réalité à partir du moment où un fond imperméable existe, que la véritable complexité du fonctionnement de la décharge de type « PED » est apparue en raison de la composition organique des déchets et l'importante teneur en eau en conséquence. Ces particularités ainsi que la climatologie influent spécifiquement sur les différents paramètres d'exploitation de la décharge, tels que :

- les taux de compactage,
- l'épaisseur des couches de mise en dépôt et les modalités de gestion,
- la durée minimale avant le recouvrement,
- la composition quantitative et qualitative, la diffusion et le traitement des lixiviats,
- la composition quantitative et qualitative du biogaz, son captage et son traitement.

Ces principaux paramètres d'exploitation de la décharge contrôlée doivent être impérativement connus et maîtrisés avant sa conception. Cependant, dans les PED, rares (si ce n'est inexistantes) sont les décharges contrôlées dont les paramètres sont entièrement connus et maîtrisés. La plupart du temps, les projets de décharge sont basés sur des critères de fonctionnement propres aux pays développés, ce qui a pour conséquence des comportements « inattendus » très différents de ce qui a été prévu lors des conceptions initiales.

Les cas particuliers des décharges de Borj Chékir (en Tunisie) et de Gaza (en Palestine) présentés précédemment, mettent en évidence l'importance de l'écart de ce qui a été prévu avec ces comportements « inattendus » :

- une production de lixiviats beaucoup plus importante que celle prévue (6 fois plus dans le cas de Tunis et 5 fois plus dans le cas de Gaza),
- un traitement des lixiviats inopérant,
- un compactage inefficace,
- un captage de biogaz défaillant.

Ce qui remet en cause la viabilité technique et économique du choix de la décharge.

### **3. Cas du Compostage :**

Le processus de compostage consiste en diverses phases de traitement mécanique (séparation des fractions, réduction des granulométries, etc.) et biologique (fermentation, hygiénisation, etc.) des ordures. L'ensemble de ces traitements doivent être assurés par des équipements et selon une logique spécifiques aux déchets concernés et tenant compte des contraintes techniques et économiques locales.

En préalable à tout projet industriel de compostage, les paramètres de traitement adaptés aux déchets traités doivent donc être non seulement identifiés, mais également traduits en critères économiques (quantifiés). Ces paramètres sont par exemple :

- la gestion de l'humidité initiale des déchets,
- la durée et l'évolution de la fermentation,
- les mailles des criblages,
- les contrôles des températures et des humidités en cours de compostage,
- l'efficacité du tri,
- l'évolution des granulométries,
- l'évolution des contaminants et des inertes.

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

#### **4. Cas de l'Incinération :**

Le procédé d'incinération des ordures ménagères est un procédé lié principalement aux critères du PCI et de l'humidité. Il ne peut être fiable et efficace avec un rendement calorifique et électrique satisfaisants que lorsque le PCI est au moins égal à 1400 mth/kg [17]. Ce qui est la limite de l'auto-combustion. L'importante teneur en composantes combustibles non organiques dans les déchets des Pays Industrialisés (et le taux réduit d'humidité en conséquence) font que leur PCI soit supérieur à 1600 mth/kg, ce qui permet leur combustion et la récupération d'énergie.

Dans le cas des pays en développement, les teneurs élevées en matières organiques et l'humidité des déchets font que leur PCI est souvent inférieur à 1400 ou même à 1000 mth/kg, ce qui n'assure pas leur auto-combustion et au contraire oblige au rajout de combustible (pétrole ou gaz naturel).

En dehors des problèmes spécifiques techniques (colmatage par les poussières, formation de fumées acides et corrosives, gestions de masses de jus de fosses, par exemple) l'appoint indispensable et important de combustibles pour faire brûler les déchets, amène automatiquement à une augmentation des coûts d'exploitation de ces installations et à une remise en cause des fondements de cette voie de traitement.

Dans les pays en développement, l'incinération des déchets est donc dépourvue d'intérêt en raison :

- du faible (ou très faible) pouvoir calorifique des déchets à haute teneur organique,
- des coûts d'investissement et de fonctionnement inappropriés,
- des contraintes techniques d'exploitation.

Dans les projets d'incinération, ces contraintes (ou réalités) incontournables ne sont pas pris en compte, ce qui conduit à la remise en cause de cette filière comme nous l'avons décrit à travers les cas particuliers des usines de Pudong en Chine et de Sourabaya en Indonésie.

#### **5. Cas des Collectes Sélectives & du Recyclage :**

La volonté de développer des collectes sélectives des déchets ménagers sur le mode européen est très répandue dans les programmes de coopération avec les PED, mais les tentatives concrètes révèlent pour la plupart des échecs et mettent en évidence l'approche peu fondée et inefficace. En effet, les très faibles proportions de produits recyclables dans les déchets ménagers, la difficile mobilisation des populations pour les actes de séparation, rendent inopérant et sur-coûteux un tel choix pour les municipalités, qui ont par ailleurs bien des difficultés à accomplir et à financer le service de collecte de

base. Le cas particulier de la Tunisie où tous les systèmes possibles de collectes sélectives ont été successivement testées sans succès, en est un argument difficilement contestable.

### **III. NECESSITE D'UNE DEMARCHE DE « RECHERCHE-DEVELOPPEMENT » POUR LE CHOIX DE TRAITEMENTS ADAPTES AUX CONTEXTES DES PED**

Selon l'analyse de la Banque Mondiale [55], l'échec des projets dans le secteur des « Déchets » dans les pays en développement est principalement dû à des faiblesses institutionnelles et financières ; la disponibilité de technologies adaptées n'étant en réalité pas prise en considération. En particulier les arguments suivants sont avancés :

- les unités de compostage ne peuvent produire de manière efficace du compost de qualité tant que les systèmes de collectes sélectives ne sont pas mis en place,
- les incinérateurs ne peuvent fonctionner de manière efficace si leurs frais d'entretien et d'exploitation dépassent la capacité financière de l'opérateur.

Bien qu'il soit fondamental de bien évaluer les contraintes économiques et institutionnelles dans toute politique ou projet, cet argumentaire n'est pas fondé car il ne reconnaît ni l'expertise réelle du terrain, ni le constat des erreurs ou approximations techniques des projets lourds de conséquence. La question préalable et incontournable se situe au niveau technologique, de la prise en compte de la nature propre des déchets, des adaptations possibles ou nécessaires des technologies et des performances des installations. Tous ces éléments se traduisant bien sûr en termes économiques.

L'analyse de la situation des déchets dans les PED fait apparaître que les projets « Déchets » - qu'ils soient réalisés par les gouvernements ou par les bailleurs de fonds- se caractérisent le plus souvent par l'inadaptation des technologies et par l'absence d'analyses spécifiques aux conditions locales. Ces défaillances sont elles-mêmes explicables par :

- l'insuffisance des analyses nécessaires pour connaître de manière détaillée la nature des déchets et les spécificités locales,
- l'absence des tests paramétriques préalables pour caractériser les process lors des procédures de Schémas-Directeurs ou d'études de gestion des déchets,
- l'absence de programmes de Recherche-Développement et finalisée dans le domaine des déchets, qui est liée à l'absence de budgets de recherche en ce domaine.

#### **1. Nécessité d'une démarche expérimentale pour caractériser les systèmes de traitement :**

Que ce soit pour la décharge, l'incinération ou le compostage, la Recherche-Développement doit se traduire par une démarche expérimentale, prenant en compte les paramètres réels et basant ses

hypothèses et conclusions sur des données chiffrées et mesurées localement. La caractérisation et l'implantation d'un système de traitement selon un procédé adapté dans un contexte donné, doit donc s'appuyer sur des tests de terrain pour cerner les paramètres de base de ce système.

■ Dans le cas de la décharge :

Le suivi de l'évolution des caractéristiques des déchets selon les contraintes d'exploitation va conditionner le choix des modalités d'exploitation de la décharge, par la détermination en particulier : de l'aptitude des déchets au compactage, de leur taux de dégradation, de la production des lixiviats et du biogaz.

■ Dans le cas du compostage :

C'est par l'expérimentation en vraie grandeur que les différentes étapes du procédé peuvent être identifiées ainsi que les bases techniques et économiques nécessaires à sa conception : capacité optimale, superficies nécessaires, types et puissances des équipements, rendements de traitement et de production, coût de production et prix de revient, etc.

■ Dans le cas de l'incinération :

Les tests vont permettre de caler les paramètres de l'incinération et de fixer les conditions de sa gestion en fonction de la nature et de la diversité des déchets. Ces paramètres sont en particulier : les quantités d'oxygène nécessaires à la combustion, la température des gaz à la sortie de la chambre de combustion, les modes de refroidissement des gaz, etc.

## **2. Nécessité d'une démarche préalable de caractérisation des déchets :**

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

■ Dans le cas de la décharge :

La réelle connaissance des déchets est essentielle pour définir les caractéristiques géotechniques de la décharge, sa durée de vie et son mode d'exploitation. Ces données sont en particulier :

- l'origine et les flux des déchets entrants,
- leur composition physique et chimique,
- la variation de la densité et de la teneur en eau durant l'exploitation.

■ Dans le cas du compostage :

La connaissance de la composition et des caractéristiques physico-chimiques des déchets à composter est fondamentale pour caractériser les modalités de leur traitement dans une chaîne de compostage. Ces données sont en particulier :

- la composition chimique pour équilibrer les mélanges,
- la composition exacte en matière organique et éléments non compostables qui devront être triés,
- la composition granulométrique pour le dimensionnement des équipements de tri,
- la présence d'éventuels facteurs nocifs : polluants, métaux lourds, pathogènes, etc.

■ Dans le cas de l'incinération :

L'incinération comporte les trois phases successives de la combustion suivantes : le séchage, la combustion proprement dite, la fin de la combustion et le refroidissement des mâchefers. A ces trois phases correspondent trois constituants des déchets, dont la connaissance est essentielle :

- les matières combustibles,
- les inertes,
- l'eau.

Une connaissance précise des paramètres de fonctionnement de chaque système de traitement est une condition préalable et objective à une démarche de choix de traitements des déchets.

L'analyse présentée dans ce chapitre montre que les critères de ces choix peuvent être entièrement modifiés dans l'absolu ou dans un système de priorité. De plus, la mauvaise prise en compte de la nature des déchets, de manière laxiste, insouciant ou approximative, apparaît dans tous les cas à la source d'erreurs lourdes de conséquences.

La nécessité de caractériser précisément les déchets est donc essentielle pour la connaissance de ces paramètres. La caractérisation des déchets doit être basée sur une méthode rigoureuse et adaptée à la finalité d'identification de ces critères de manière parfaitement définie.

C'est l'objet de ce travail de thèse.

**1ERE PARTIE**

**SITUATION DES DECHETS DANS LES PAYS EN DEVELOPPEMENT  
ET ENJEUX DE LEUR CARACTERISATION**

**CHAPITRE 2**

**LE BESOIN PREALABLE  
DE LA CARACTERISATION DES DECHETS**

## I. CARACTERISTIQUES GENERALES DES DECHETS URBAINS DANS LES PAYS EN DEVELOPPEMENT

### 1. Identification des flux

Dans le langage courant, les déchets ménagers n'évoquent que les déchets de la vie domestique. Cependant, les activités de la vie urbaine ont conduit à élargir cette notion à celle de déchets urbains (ou municipaux) qui englobe tous les déchets générés par une agglomération à l'exception de certains déchets spéciaux tels que : les déchets de démolition, les déchets industriels et les déchets des hôpitaux. Les déchets urbains se composent ainsi, de deux principaux flux selon leur provenance, leur importance et leur composition :

- Le 1<sup>er</sup> flux est constitué par les déchets ménagers et assimilés qui se composent eux-mêmes de 2 types de déchets :
  - o les déchets ménagers au sens strict : provenant strictement des ménages ;
  - o les déchets assimilés : provenant des activités économiques (artisans, commerçants, administrations, etc.) générés à l'intérieur du périmètre urbain.
- le 2<sup>ème</sup> flux est constitué par les déchets produits par les communes qui comportent :
  - o les déchets des espaces verts : taille des arbres, feuilles, etc.,
  - o les déchets des marchés,
  - o les déchets d'assainissement (les boues provenant des stations d'épuration des eaux usées et des fosses septiques).

A ces flux s'ajoutent les déchets de balayage des voies publiques.

Ces flux diffèrent de part leur importance et leur nature :

- le flux constitué par les déchets ménagers et assimilés est le plus important ( généralement plus de 70% de la totalité des déchets urbains). Il se distingue par une composition extrêmement hétérogène où toutes les catégories des déchets sont présentes (matières organiques, papiers, plastiques, toxiques, etc.).
- le flux constitué par les déchets des communes est composé de déchets totalement organiques dont la quantité (notamment celle des déchets verts) varie selon les régions et les contextes climatiques.

D'une manière schématique, on peut représenter les divers flux des déchets urbains par le tableau 3.

Dans les pays en développement ces flux sont toujours présents, cependant leurs proportions varient d'un pays à l'autre et d'une ville à l'autre. Dans un Schéma Directeur de gestion des déchets ces proportions doivent être identifiées et quantifiées au cas par cas.

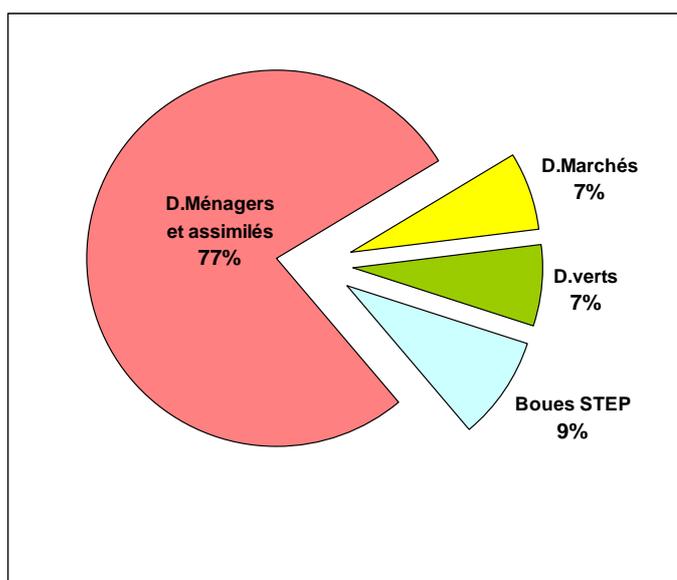
A titre d'exemple, dans le cas de la ville de Tunis (700 000 habitants), ces proportions que nous avons estimées à partir d'une enquête menée auprès de la Direction de la Propreté de la ville (voir 3<sup>ème</sup> partie, Chap.2) s'établissent de la manière suivante, schématisée par la figure 1.

**Tableau 3. Identification des divers flux des déchets urbains**

Flux	Constituants	Nature et importance
Les déchets ménagers et assimilés	- les déchets provenant des ménages - les déchets provenant des activités économiques	Flux majoritaire à composition extrêmement hétérogène
Les déchets produits par les communes	- les déchets des espaces verts - les déchets des marchés - les déchets d'assainissement	Flux composé de déchets totalement organiques, mais avec un taux d'humidité très variable selon le type de déchets

Dans les PED, ces divers flux sont souvent collectés en mélange, auxquelles s'ajoutent des déchets toxiques provenant des industries et des activités de soins (hôpitaux, laboratoires d'analyses, etc.). Ce mode de collecte pose de sérieux problèmes sur le plan environnemental et sanitaire et en particulier pour le choix et la mise en place des systèmes de traitement.

**Figure 1. Composition des principaux flux de déchets urbains produits dans la ville de Tunis**



## 2. Caractéristiques des déchets ménagers et assimilés :

Un résidu de la vie urbaine devient déchet à partir du moment où il a perdu une valeur d'usage pour la production. Cette valeur d'usage est variable à la fois d'une ville à l'autre, d'un pays à l'autre, mais aussi dans le temps sur une même agglomération. C'est cette valeur d'usage qui influence en partie la quantité et la composition des déchets, question clef de la gestion des déchets. Conjointement, le niveau et le mode de vie selon chaque lieu ou chaque pays vont amener au rejet de déchets alimentaires et de matières diverses et spécifiques, en particulier liées au développement et caractéristiques des modes de conditionnement.

Contrairement aux pays industrialisés où les déchets sont homogènes à l'intérieur d'un même pays et d'une même ville, les quantités et les qualités des déchets produits dans les pays en développement connaissent d'extrêmes variations selon le mode et le niveau de vie, le tissu urbain et la structure économique et industrielle.

**Tableau 4. Caractéristiques quantitatives et qualitatives des déchets ménagers dans les PED et les PI**

	<b>Pays En Développement</b>	<b>Pays Industrialisés <sup>(a)</sup></b>
Production de déchets ménagers (kg/hab.jour)	0,1 à 1,8	1 à 1,5
Humidités (% du poids brut)	60 à 80 %	25 à 35 %
Matières organiques putrescibles (% du poids brut)	60 à 85 %	10 à 40 %
Matières recyclables (% du poids brut)	2 à 15 %	40 à 60 %

(a) : [36]

### 2.1 Les aspects quantitatifs :

Dans les PED, les quantités des déchets sont invariablement plus faibles (quelques centaines de grammes par habitant et par an) que dans les Pays industrialisés. Cette faible production des déchets est due :

- d'une part, au niveau de vie moins élevé qui se traduit par une moins grande consommation et donc par un plus faible développement du conditionnement et des emballages,
- et d'autre part, à la récupération à laquelle se livrent les plus pauvres.

Cependant, on assiste dans certaines villes à des productions de déchets très importantes qui peuvent égaler et même dépasser celles générées dans les Pays Industrialisés.

## 2.2 Les aspects qualitatifs :

Les ordures ménagères sont généralement caractérisées par la détermination d'un certain nombre de paramètres physico-chimiques dont les plus importants sont : la densité, l'humidité et le pouvoir calorifique. Dans les PED, les déchets sont plus denses, plus humides et à pouvoirs calorifiques plus faibles que ceux des pays industrialisés, comme on peut le voir dans le tableau 6 qui regroupe les caractéristiques des ordures ménagères dans 49 pays en développement (cf. §. II). Ces différences sont dues à leur richesse en matières organiques putrescibles (végétaux, restes de cuisines, etc.) et par conséquent leur faible teneur en produits recyclables.

### ■ La Densité :

La densité met en évidence la relation qui existe entre la masse des ordures et le volume qu'elles occupent. Sa connaissance est essentielle pour le choix des moyens de collecte des déchets et aussi pour leur traitement. Toutefois, comme les ordures ménagères sont essentiellement compressibles, mais aussi sujettes à un certain foisonnement, leur densité peut varier largement au cours des manipulations qu'elles subissent.

Dans les PED, la densité varie généralement de 0,3 à 0,5. Elle est fortement supérieure à celle des déchets des pays industrialisés (de l'ordre de 0,1), [68] en raison de :

- la grande proportion de matières organiques fermentescibles et par conséquent de la faible part des emballages (papiers, plastiques, etc.) ;
- l'importante teneur en eau des déchets et l'effet des pluies ;
- une proportion élevée de cendres, résultant de la cuisson des aliments et/ou du chauffage, ainsi que de cailloux et graviers, en raison des voies non recouvertes.

### ■ L'Humidité :

Les ordures ménagères renferment une quantité d'eau qui est celle contenue dans leurs composants, de sorte que la teneur en eau globale varie essentiellement avec les proportions respectives de ces composants.

Contrairement aux pays industrialisés où le taux moyen d'humidité des ordures oscille entre 25% et 35%, l'humidité des déchets ménagers dans les PED est souvent très élevée de l'ordre de 60 à 80%, en raison de l'importante fraction organique putrescible qui les composent.

Cependant, les conditions de stockage et de collecte spécifiques aux PED (abandon des ordures en tas ou stockage des récipients sans couvercles) en les exposant aux intempéries, influencent énormément les taux d'humidité des déchets comme suit [38] :

- en milieu tropical, durant la saison des pluies, l'humidité des ordures non protégées peut s'accroître jusqu'à arriver à saturation complète. A la suite des pluies intenses, il arrive qu'elles nagent dans l'eau retenue à l'intérieur des récipients non fermés, exposés à l'air libre.
- en milieu tropical ou sub-tropical également, durant la saison sèche, les ordures abandonnées en plein soleil subissent une dessiccation intense qui peut faire chuter leur taux d'humidité à moins de 10%. Ce phénomène est également observé dans les régions désertiques.

#### ■ Le Pouvoir Calorifique :

Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) des ordures ménagères est la quantité de chaleur dégagée par la combustion de l'unité de poids d'ordures brutes. En règle générale, plus la teneur en eau est élevée, plus le PCI est faible.

Contrairement aux pays industrialisés [5]<sup>2</sup>, les PCI des déchets des PED sont faibles (<1000 mth/kg) en raison de leurs faibles teneurs en matières cellulosiques et plastiques et leurs taux d'humidités élevés.

#### ■ La Fraction putrescible :

Les ordures ménagères générées dans les pays en développement, se caractérisent généralement par une part prépondérante de matières putrescibles (plus de 50%) principalement composées de déchets de cuisine. Ce constat s'explique par les types de consommation basés sur les produits frais et par l'absence d'emballages dans les modes de conditionnement.

Parfois, cette fraction comprend d'autres matières organiques qui ne proviennent pas des ménages. C'est le cas des zones rurales ou même des agglomérations urbaines de certaines villes de l'Asie et du Proche-Orient, où les crottins des animaux domestiques qui vivent avec les humains, ainsi que les débris de leur litière et les fourrages dont ils s'alimentent se trouvent mélangés aux ordures ménagères [38].

---

<sup>2</sup> A titre d'exemple, le PCI des déchets en France est de 1814 mth/kg soit 7592 kJ/kg d'OM brutes (à 35% d'humidité).

### ■ La Fraction recyclable :

La fraction recyclable est composée de papiers, cartons, plastiques, verre et métaux. Dans les PED, cette fraction est généralement faible ne dépassant pas les 15%, alors qu'elle est supérieure à 50% dans les pays industrialisés.

### ■ la Fraction inerte « fine » :

Les déchets contiennent souvent une fraction importante d'éléments inertes plus ou moins riche en matières organiques dont la granulométrie est inférieure à 10 mm. Dans certains pays d'Afrique, cette fraction qui peut dépasser les 50% est constituée de sable et de matériaux inertes provenant des balayages des voies publiques généralement non revêtues. Dans les pays asiatiques, la fraction inorganique (pouvant dépasser les 80%) est principalement formée de cendres de charbon.

Toutes ces caractéristiques ont à l'évidence, des conséquences importantes sur les modes de traitement et de valorisation des ordures ménagères mais aussi sur leur collecte.

## 3. Hétérogénéités et Facteurs de variations :

La production et la composition des déchets varient d'un pays à l'autre et d'une ville à l'autre, en relation étroite avec les niveaux et modes de vie, le tissu urbain et les climats.

Dans les villes des pays en développement, ces variations sont beaucoup plus importantes que dans les pays industrialisés en raison :

- des variations saisonnières importantes,
- de l'importante disparité des niveaux de revenus des populations et des municipalités,
- de la multiplicité et de l'hétérogénéité des situations urbaines,
- de l'influence des événements culturels et religieux (Ramadan, ...).

### 3.1. Influence des variations saisonnières :

Dans certains PED, les variations saisonnières sont souvent très sensibles, notamment lorsque les saisons sont très différenciées telles que :

- les saisons sèches (où les pluies sont inférieures à 50 mm/an)
- les saisons pluvieuses (où les pluies peuvent dépasser les 4 000 mm/an)

Ces grandes hétérogénéités entre les saisons impliquent de fortes disparités au niveau des paramètres physico-chimiques des déchets. Par exemple à Douala (au Cameroun), la densité des déchets peut passer de 180kg/m<sup>3</sup> en saison sèche à 400 kg/m<sup>3</sup> en saison humide, soit une augmentation de 200% [59].

Par ailleurs, ces extrêmes variations saisonnières peuvent avoir des incidences très importantes sur la composition des déchets lorsqu'elles sont couplées à des différences sociales au sein de la population. Par exemple dans les pays asiatiques pendant l'hiver, les déchets contiennent, dans les quartiers pauvres non équipés de gaz naturel, une importante quantité de cendres résultant du charbon utilisé pour le chauffage et la cuisson.

Par exemple à Pékin (en Chine) la composition des déchets inorganiques peut varier en hiver d'un quartier à l'autre de 17% à 86% [30].

**Tableau 5. Variation saisonnière de la composition des déchets en matières inorganiques à Pékin**

	En été	En hiver
Quartiers utilisant le charbon	39%	86%
Quartiers équipés de gaz	0%	17%

### 3.2. Influence des situations urbaines et socio-économiques :

Dans les villes des PED, il existe le plus souvent des différences urbaines et socio-économiques très marquées entre les différents quartiers d'une même ville. On assiste ainsi à :

- une juxtaposition brutale des formes et de l'organisation des espaces urbains
- une occupation anarchique et sauvage de l'espace urbain par les ménages à faibles revenus
- d'énormes différences sociales séparant les populations.

#### ■ Juxtaposition brutale des formes et de l'organisation des espaces urbains :

On assiste souvent à un urbanisme contrasté où se juxtaposent une ville ancienne aux voies étroites (exemple la Médina dans les pays du Maghreb), une ville moderne (coloniale) aux avenues surdimensionnées et une multitude de quartiers périphériques en croissance rapide et au bâti hétérogène.

#### ■ Occupation anarchique et sauvage de l'espace urbain :

L'espace urbain est souvent consommé par des quartiers « spontanés » aux rues étroites et non revêtues où les logements sont construits de manière traditionnelle avec des matériaux provisoires. Par exemple au Cameroun, 60% de l'espace urbain à Douala et à Yaoundé est anarchiquement occupé [59]. Dans ces quartiers les équipements d'assainissement ne sont pas en place et les services basiques ne sont pas assurés.

### ■ Extrêmes différences sociales séparant les populations :

D'extrêmes richesses côtoient généralement d'extrêmes pauvretés :

- une population « très riche » occupant les quartiers résidentiels de haut standing desservis par un important réseau de voiries bitumées,
- une population « très pauvre » occupant les quartiers « spontanés » sous-structurés.

Ces hétérogénéités et variabilités urbaines et socio-économiques extrêmes ont à l'évidence, des conséquences importantes sur la production et la composition des déchets, mais aussi sur l'organisation de leur collecte.

- dans les quartiers anarchiquement occupés, les difficultés d'accès rendent extrêmement difficile l'organisation et la collecte des déchets ;
- la production des déchets dans les quartiers riches est beaucoup plus importante que celle générée par les quartiers pauvres. Par exemple dans la commune de Tunis (en Tunisie) les déchets produits (par habitant) dans les quartiers riches sont 4 fois plus importants que ceux produits dans les quartiers pauvres ;
- les déchets dans les quartiers sous-structurés sont composés d'une fraction importante de sable et de matériaux inertes provenant essentiellement du balayage des voies publiques non revêtues.

## II. FAIBLE CONNAISSANCE DES DECHETS MENAGERS DANS LES PAYS EN DEVELOPPEMENT

### 1. Revue des données existantes :

A partir d'une recherche bibliographique sur les 20 dernières années [25], [26], [27], [28], [33], [34], [38], [45], [48], [50], [53], [54], [60], [61], [64], [66], [67], [69], nous avons pu regrouper par région géographique, les résultats de caractérisation des déchets ménagers de 49 pays en développement (cf. tableau 6). Dans ce tableau nous avons indiqué les principales caractéristiques quantitatives et qualitatives des déchets :

- les ratios de production de déchets par habitant et par jour,
- les principaux paramètres physico-chimiques : la densité, l'humidité et le PCI,
- les principales composantes : la fraction organique putrescible, la fraction recyclable (papiers-cartons et plastiques) et la fraction inerte fine.

**Tableau 6. Caractéristiques des Ordures Ménagères dans quelques PED (49 pays classés par régions géographiques)**

Pays	Production (Kg/hab.j)	Paramètres physico-chimiques			Principales composantes (en % de la masse brute)			
		Densité (t/m <sup>3</sup> )	Humidité (%)	PCI (mth/kg)	Fraction organique Putrescible	Fraction Recyclable		Fr. inerte fine
						Papiers/cartons	Plastiques	
<b>Afrique du Nord</b>								
Algérie	0,3-1,3	0,3-0,5	58-62	-	67-89	7-9	2-3	0,2-23
Libye	0,6	0,2	-	-	42-48	16-19	2	3
Maroc	0,4-0,8	0,4-0,6	65-72	900-1000	50-70	5-20	2-8	5-20
Mauritanie	-	-	-	-	4,6	3	17	44,5
Tunisie	0,2-0,8	0,2-0,5	35-68	-	37-81	1-23	1-16	0-2
<b>Afrique de l'Ouest</b>								
Burkina Faso	0,65	0,3	45	-	60	2	0,5	32,5
Mali	-	-	-	-	36	3,5	2	51
Niger	0,4	-	-	-	60	-	-	35
Guinée	0,17 - 0,44	-	-	-	66-69	4-6	0,5-6	-
Sénégal	0,6	0,87	5-42	-	44-52	8-10	4-5	30-46
Sierra-Leone	0,2-0,5	0,4	40	1300	43-72	5-14	2-5	2-11
Benin	0,4-0,5	0,38	47	-	40-70	1	-	36-53
Côte d'Ivoire	0,3-1,5	0,49	39	1000-1500	30-45	4-20	1-3	30-45
Ghana	0,25-0,55	-	50-60	-	87	6	1	1
Nigéria	0,2-0,4	0,28	45	-	43-76	7-17	2-4	9
<b>Afrique Centrale</b>								
Cameroun	0,9	0,2-0,65	50-65	-	62-84	3-4	2-3	0,4-25
Congo	-	-	80-90	-	-	-	-	-
Gabon	1,1	-	-	-	-	-	-	-
Zaïre(Rép.Dém.Congo)	0,3-0,6	0,2	31	-	37-76	2-9	2-3	11-58
Tchad	0,5	0,7-0,8	-	-	-	-	-	-
<b>Afrique de l'Est</b>								
Burundi	0,3	0,4	-	-	-	-	-	-
Tanzanie	0,95	0,39	-	-	63	6	<1	-
Rwanda	0,65	0,35	-	-	53	<1	-	45
<b>Corne de l'Afrique</b>								
Ethiopie	0,1	0,4	-	-	9-42	2-4	1	54
Djibouti	0,4	-	-	-	12-40	10-24	2-7	8-45
<b>Océan Indien</b>								
Ile Maurice	0,5-0,9	0,3	50	-	48-53	14	3	19

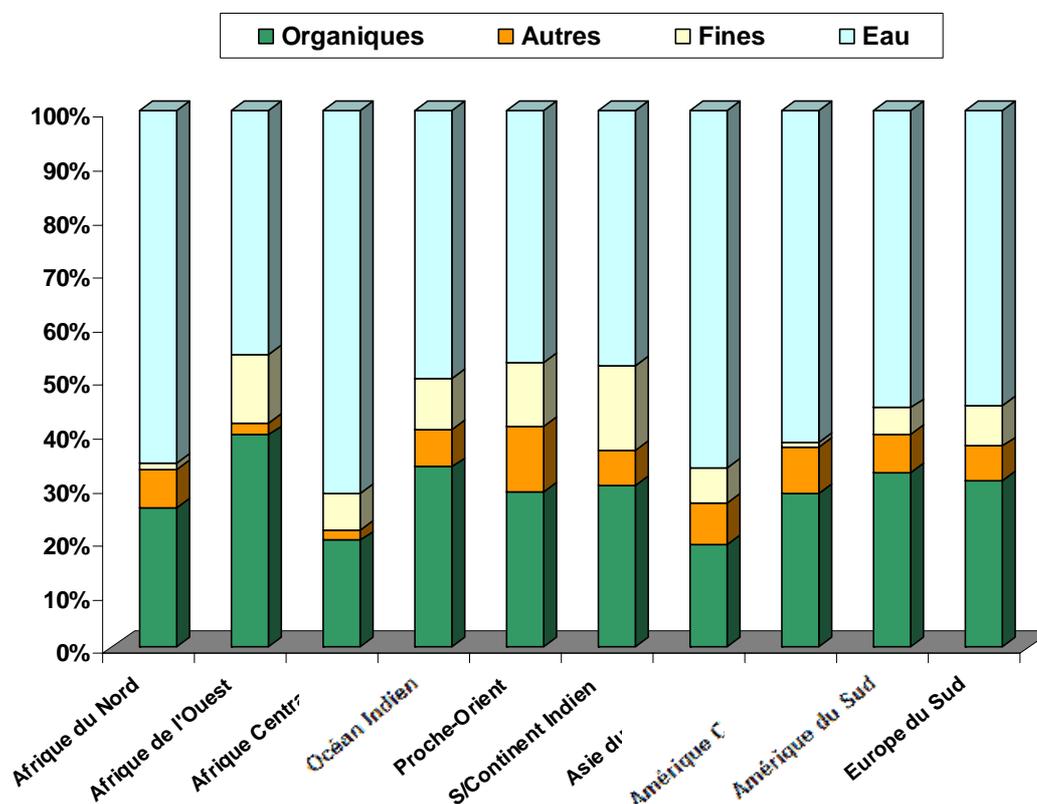
P a y s	Production (Kg/hab.j)	Paramètres physico-chimiques			Principales composantes (en % de la masse brute)			
		Densité (t/ m <sup>3</sup> )	Humidité (%)	PCI (mth/kg)	Fraction organique Putrescible	Fraction Recyclable		Fr. inerte fine
						Papiers/cartons	Plastiques	
<b>Proche-Orient</b>								
Egypte	0,5-1,0	0,2-0,3	30-60	1550	36-62	9-24	2-6	10-25
Syrie	0,2-0,6	0,35	54	-	39-65	10-26	5-12	19,5
Jordanie	0,65-0,85	-	-	-	56	16	13	-
Palestine	-	0,3-0,6	-	-	69-72	10,6	9-11	-
<b>Golfe</b>								
Yemen	0,4	0,13	18	-	43-57	15-18	3	2
Iran	0,2-0,7	0,2-0,3	-	-	56-60	22-24	-	-
Arabie Saoudite	0,8	-	25	-	-	-	-	-
<b>Sous-Continent Indien</b>								
Pakistan	0,5-0,6	-	50-60	-	51	4	2	25
Inde	0,2-1	0,4-0,6	20-30	800-1100	26-78	1-6	0,9-1	12-61
Sri-Lanka	0,75	0,3	37-44	600-2100	46-61	5-14	2-3	21-35
<b>Asie du Nord-Est</b>								
Chine	0,3-1,4	-	-	700-1100	11-87	2-6	2-16	4-78
Hong-Kong	0,85	-	-	-	9	32	6	14
Taiwan	0,7	0,3	5,6	1000-1500	25	8-22	2-12	-
<b>Asie du Sud-Est</b>								
Indonésie	0,5-0,8	0,25-0,3	65-80	500-1100	60 – 84	8 – 12	5-10	3
Philippines	0,7-0,9	-	60	1400	50	13	2	18-21
Thaïlande	0,6-0,8	0,25	60	-	40-45	24	7	5
<b>Amérique Centrale</b>								
Mexique	0,6-0,9	0,3	-	-	49,5	20	4	-
Répub.Dominicaine	0,55	0,3	62	-	65	16	5	2
<b>Amérique du Sud</b>								
Venezuela	0,6	-	-	-	40	35	8	2
Colombie	0,4-0,9	-	60-70	-	56-62	18-22	5-7	5
Perou	0,65-2	-	-	-	34	24	-	32
Brésil	0,3-1,75	0,17	46	-	20-48	29-32	4-10	2-12
Paraguay	1	-	-	-	61	12-22	9	13
<b>Europe du Sud</b>								
Turquie	0,4-0,9	0,33	45-65	811-1000	45-88	3 – 21	3-11	6-29

L'analyse de ce tableau ainsi constitué montre :

- des ratios de production de déchets extrêmement variables : allant de 0,1 à 1,8 kg par habitant et par jour ;
- des densités très importantes pouvant atteindre 0,6 ;
- des pouvoirs calorifiques faibles généralement inférieurs à 1500 mth/kg ;
- une fraction organique putrescible prépondérante pouvant atteindre les 80% ;
- des teneurs en papiers-cartons et plastiques assez faibles, généralement moins de 20% ;
- des teneurs en matières fines très variables, allant de 0,3 à 78% ;
- des humidités généralement très importantes pouvant atteindre les 80%.

Nous constatons ainsi des compositions de déchets ménagers présentant des parts quasi exclusives de matières organiques fermentescibles. Les taux d'humidités très importants qui s'en suivent sont mis en évidence dans le graphique de la figure 2. Ce graphique représente les principaux constituants physiques des ordures ménagères (l'eau, la matière sèche putrescible et les fines) à partir des compositions moyennes calculées par région.

**Figure 2. Les Constituants physiques des déchets ménagers dans quelques régions géographiques des PED**



Les prévisions à moyen et à long terme laissent supposer que dans les villes des PED, les déchets deviendraient progressivement moins riches en matières organiques (et donc moins humides) étant remplacées par des emballages importants, à l'image de ce qui est observé dans les pays développés. Cependant, même si dans certaines villes à croissances accélérées, comme Singapour ou Jeddah (en Arabie Saoudite) la composition des déchets commence à ressembler à celle des villes occidentales, il est évident que cette tendance ne peut être généralisée dans les PED, en raison d'une part, de la stagnation du pouvoir d'achat (surtout dans les classes populaires) et d'autre part, du facteur déterminant culturel qui se caractérise souvent par la consommation du « frais ».

## **2. Divers constats de la faiblesse des données existantes :**

### **2.1. Constat général :**

L'analyse des résultats quantitatifs et qualitatifs de caractérisations cités dans la bibliographie fait apparaître les éléments suivants :

- les mesures et les analyses sont souvent incomplètes :
  - l'humidité et le PCI ne sont pas toujours mesurés,
  - les constituants des déchets ne sont pas tous quantifiés,
  - les polluants présents dans les déchets sont rarement recherchés.
- les chiffres cités sont la plupart du temps des moyennes qui couvrent les importantes disparités entre les saisons et entre les quartiers d'une même ville.
- les résultats sont parfois irrationnels, ou apparaissent contradictoires, en l'absence d'une réflexion critique, tels que (cf. Tableau 6) :
  - une densité des déchets de 0,87 (au Sénégal),
  - une fraction putrescible de 4,6% (en Mauritanie),
  - des teneurs en eau de 5,6% (à Taiwan)

### **2.2. Cas particuliers :**

Le constat de faiblesse des résultats de caractérisation des déchets peut être mis en évidence à partir des cas particuliers de la Guinée et de la Tunisie, présentés dans les tableaux 7 et 8.

Bien qu'il s'agissent d'études réalisées par des bailleurs de fonds internationaux (ONU, Banque Mondiale, etc.), nous constatons à travers ces 2 cas, de très grandes disparités entre les résultats des caractérisations dans une même ville (Conakry) et dans un même pays (la Tunisie). De telles différences à ce niveau d'études officielles ne peuvent rendre compte d'une réalité et ne peuvent être acceptées sans se poser des questions fondamentales de méthodes, de lieux, de représentativité des échantillonnages, etc.

**Tableau 7. Composition (en % du poids brut) des déchets ménagers  
à Conakry (en Guinée)**

Fraction	en 1993 <sup>a</sup>	en 1995 <sup>b</sup>
Matières Organiques	58	88
Textiles & Chiffons	4	1
Papiers & Cartons	9	-
Métaux	4	3
Verre	1	1
Plastiques	4	1
Cuir & Caoutchouc	1	-
Cailloux, sable, divers	19	6
Total	100	100

(a) : [74] - (b) : [72]

**Tableau 8. Composition (en % du poids brut) des déchets  
ménagers et assimilés en Tunisie**

Catégories de déchets	en 1997 <sup>c</sup>	en 2002 <sup>d</sup>	en 2003 <sup>e</sup>	en 2004 <sup>d</sup>
Matières organiques	68	50-60	68	72,7
Papiers-cartons	11	5-10	9	11,9
Plastiques	7	10-20	11	8
Cuir-caoutchouc			2	
Textiles	3	5-10	2	2,8
Métaux	4		4	2,4
Verre	2		2	
Céramiques				1,3
Bois				0,9
Fines		10-30		0,2
Divers	5		2	
Total	100%		100%	100%

(c) : [45] - (d) : [25] - (e) : [54]

### 3. Causes et conséquences de la méconnaissance des déchets :

#### 3.1. Les Causes :

Le constat de la faible connaissance des déchets dans les PED, qui vient d'être mis en évidence et qui apparaît comme la source des nombreux échecs ou erreurs, doit être analysé en détail et amener à des identifications claires des causes. On doit principalement citer :

- la conscience peu développée du besoin d'une caractérisation précise des déchets comme fondement des positions d'une politique,
- l'absence de méthodes de caractérisations rigoureuses, qui ont été adaptées réellement, aux contraintes et aux objectifs de caractérisation des PED,

- les difficultés administratives et financières pour retenir des fonds pour la réalisation de la caractérisation qui est une opération lourde,
- l'absence de laboratoires spécialisés, aptes à disposer des compétences pour mettre en œuvre une méthode adaptée et pour réaliser des analyses elles-mêmes spécifiques.

■ Les difficultés administratives et financières :

Dans la majorité des cas, les experts sont obligés d'envoyer les échantillons des déchets dans des laboratoires spécialisés à l'étranger. Les échantillons doivent alors être transportés en avion dans des récipients métalliques hermétiques. Mais là on se heurte à d'autres problèmes [38] :

- difficultés de se procurer les récipients métalliques hermétiques pour stocker les déchets,
- difficultés administratives : licence d'exportation, passage de douane, certificat sanitaire, etc.,
- difficultés financières : les analyses ne sont généralement pas budgétisées dans les projets.

■ L'absence de méthodes de caractérisation rigoureuses :

Pour la caractérisation des déchets dans les PED, on se base souvent sur des méthodes peu fiables en ce qui concerne la représentativité des prélèvements, la précision du tri et des analyses physico-chimiques. Par exemple, dans la procédure d'échantillonnage recommandée par la coopération allemande (GTZ) en Tunisie [61] :

- la prise d'échantillon correspond au contenu d'un seau de 12 litres, sans aucun fondement statistique,
- le matériel de tri est une simple bâche en plastique,
- les éléments fins ne sont ni triés ni analysés : on suppose qu'ils sont composés de 50% de matières organiques (qu'elle que soit la saison et le lieu d'échantillonnage).

■ Le manque de moyens d'analyses et l'absence de laboratoires spécialisés, par exemple :

- la non disponibilité de balances pour peser les déchets,
- la difficulté pour la confection de tamis ayant des mailles appropriées au tri,

- l'absence dans les laboratoires d'étuves de grandes capacités, pour le séchage des déchets (très humides), ce qui ne permettra pas une détermination correcte de l'humidité,
- l'absence dans les laboratoires de broyeur de déchets, ce qui ne permettra pas l'obtention des poudres nécessaires aux analyses.

### **3.2. Les Conséquences :**

Le bilan de la situation examinée précédemment fait apparaître un ensemble de lacunes qui aboutissent à une méconnaissance des déchets, autant sur le plan quantitatif (production) que qualitatif (composition). Ces lacunes consistent à la non prise en compte des réels paramètres de terrain, l'absence de méthodes conçues pour en tenir compte, la déficience locale des matériels et des compétences indispensables et la sous-estimation fréquente de l'importance de la caractérisation des déchets pour tout choix technique ou politique.

Cette méconnaissance des gisements à traiter ne peut qu'engendrer des erreurs dans la gestion des déchets et les choix des modes de traitement. Par exemple :

- la méconnaissance des variations de production des déchets dans une ville ne permettra pas de dimensionner convenablement les moyens et les matériels de collecte adéquats, ainsi que d'organiser les circuits, ou de faire un suivi de performance des collectes ;
- la méconnaissance des compositions exactes des produits valorisables par recyclage ne permettra pas de définir précisément le réel intérêt de telle ou telle fraction par rapport aux contraintes spécifiques de chaque filière (composition, quantité, localisations, état de souillure, humidité, etc.) ;
- la méconnaissance des réelles teneurs en eau des déchets faussera la conception et l'exploitation correctes des systèmes de traitement, autant pour ce qui est de la décharge, de l'incinération ou du compostage.

La caractérisation des déchets est donc un préalable indispensable à toute stratégie ou projet de leur traitement. En particulier dans les PED, où les variations des déchets sont très importantes, la caractérisation est indispensable pour donner les bases réelles de jugement aux décideurs pour effectuer des choix rationnels à tous niveaux de la politique ou des choix technico-économiques, concernant tout autant la collecte et son organisation, que les modes de traitement.

**1ERE PARTIE**

**SITUATION DES DECHETS DANS LES PAYS EN DEVELOPPEMENT  
ET ENJEUX DE LEUR CARACTERISATION**

**CHAPITRE 3**

**BESOIN DE METHODES DE CARACTERISATION  
ADAPTEES AUX CAS DES PED**

## I. LES ENJEUX DE LA CARACTERISATION DES DECHETS

Il n'est pas possible d'envisager le traitement d'un produit quelconque dans un procédé industriel, sans connaître en préalable et avec précision sa nature et sa composition. Les déchets ménagers exigent d'autant plus ce souci de caractérisation, qu'ils sont totalement hétérogènes, entre les différentes fractions qui les composent (matières putrescibles, papiers-cartons, verre, etc.) et subissent de grandes variations du fait de l'influence de divers facteurs locaux. L'ordure ménagère est en réalité le produit le plus hétérogène qui soit à la surface de la terre, puisque chacune de ses composantes est d'une origine entièrement différente : naturelle et organique ou minérale et chimique issue de la transformation par tous types de procédés industriels. Ces produits sont d'autre part mélangés et se souillent les uns les autres.

Les facteurs expliquant les variations qualitatives ou quantitatives des déchets sont par exemple, la localisation géographique et les secteurs de la commune, les jours de la semaine, les saisons, les habitudes alimentaires, les niveaux socio-économiques des populations concernées.

Dans les pays en développement les variations attendues dans la composition des déchets peuvent être extrêmement importantes en raison des grandes hétérogénéités entre les saisons et les fortes disparités urbaines et socio-économiques (décrites dans le chapitre précédent). La démarche de caractérisation, devient alors un préalable d'autant plus nécessaire pour déterminer les choix de traitement en apportant les réponses aux questions qui se posent de manière très précise. Par exemple :

- dans le cas de la solution de traitement en décharge, quelles seraient les contraintes d'exploitation ainsi que les quantités de biogaz et de lixiviats produites ?
- dans le cas de la solution de traitement par compostage, quelle serait l'aptitude des déchets au compostage et quelle serait la qualité du compost produit ?
- les déchets ont-ils un pouvoir calorifique assez élevé pour être incinérés ?
- la fraction « produits recyclables » est-elle suffisante et quelle est la nature précise de ses composants pour mettre en place un système de collecte sélective économiquement viable ? et dans quel secteur de la ville se trouve ce gisement ?

Les éléments à rechercher concernent divers aspects quantitatifs et qualitatifs des déchets. On distingue ainsi 3 groupes :

- les matériaux en tant que composants spécifiques des déchets : ex. le papier, le verre, les métaux, etc.
- les paramètres physiques, chimiques ou biologiques des déchets : ex. la densité, la teneur en eau, la biodégradabilité, etc.
- les concentrations des éléments chimiques : ex. concentrations en carbone ou en mercure, etc.

Dans une caractérisation, la recherche de tel ou tel groupe doit se faire selon le besoin, pour orienter ou caractériser les modalités de traitement des déchets. On cherchera par exemple :

- la composition en éléments inertes et indésirables (verres, métaux, plastiques, sable) en vue de pouvoir les éliminer lors du compostage,
- les compositions pondérales des constituants recyclables (papiers, cartons, plastiques) en vue de pouvoir dimensionner les systèmes de collectes sélectives,
- la teneur en eau des déchets en vue de pouvoir concevoir les principes et les paramètres d'exploitation de la décharge et du compostage,
- les concentrations en carbone des déchets mis en décharge, afin de pouvoir évaluer les productions de méthane et maîtriser ainsi son captage,
- le PCI, l'humidité et les teneurs en chlore et en soufre pour pouvoir définir le processus d'incinération.

## II. LES PRINCIPALES METHODES DE CARACTERISATION DES DECHETS

Dans les pays industrialisés, c'est seulement dans les années 80 que la démarche de caractérisation des déchets, est apparue comme un préalable indispensable et logique tant pour la mise au point des stratégies nationales des déchets, que pour la préparation de projets locaux. La caractérisation a pu être alors abordée de 2 manières différentes :

- soit par des méthodes et modèles théoriques,
- soit par des méthodes d'analyse directe sur les déchets.

### 1. Les Méthodes et Modèles théoriques :

Ces méthodes sont nombreuses. La plus utilisée est la méthode dite « *material flows methodology* » développée par l'Agence américaine de Protection de l'Environnement [37]. Cette méthode se base sur l'analyse des produits mis sur le marché et repose sur le principe suivant :

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

Comme toutes les méthodes théoriques, cette méthode est plus rapide et moins coûteuse, si on la compare aux méthodes d'analyse directe sur les déchets. Cependant elle présente les inconvénients suivants [29] :

- elle se limite à seulement quelques produits dont les données peuvent être accessibles (tels que le papier, le verre, les plastiques, ...),
- elle ne peut pas réellement rendre compte des facteurs de variation locaux, comme par exemple, les modes et niveaux de vie ou les facteurs climatiques.

## 2. Les Méthodes d'analyse directe :

Les méthodes d'analyse directe sont basées sur l'échantillonnage et le tri manuel des déchets (dans un secteur donné) pour déterminer leur composition selon des catégories prédéfinies. Ces méthodes reposent généralement sur des protocoles qui définissent les principes d'échantillonnage et de tri de déchets lors d'une campagne de caractérisation.

Ces protocoles notamment le nombre de catégories des déchets triés varient selon les méthodes et les pays. Ainsi dans le cas des pays européens présentés dans les tableaux 9 et 10 [71] les catégories varient de 11 à 18 et les sous-catégories de 17 à 55. Le nombre très important de sous-catégories s'explique par l'importance et la diversité des emballages (en papiers, en plastiques et métalliques) dans les pays développés.

**Tableau 9. Nombre de Catégories et de sous-Catégories  
recherchées dans 7 pays européens [71]**

Pays	Nombre de catégories	Nombre de sous-catégories
Autriche	11	25
Allemagne	13	41
Angleterre	11	33
Finlande, Suède et Norvège	11	≥ 20
France	13	39
Irlande	13	55
Pays Bas	18	17

Pour la détermination des paramètres physiques et chimiques des catégories triées, des échantillons y sont prélevés et préparés (séchés, broyés, tamisés) puis analysés au laboratoire.

### 2.1. Envergures et coûts des opérations :

Comparées aux méthodes théoriques, les méthodes d'analyse directe semblent plus précises, mais par contre plus fastidieuses et plus coûteuses, car l'échantillonnage et le tri des déchets nécessitent :

**Tableau 10. Catégories recherchées dans 7 pays européens [71]**

<b>Autriche (11)</b>	<b>Allemagne (13)</b>	<b>Angleterre (11)</b>	<b>Finlande, Suède et Norvège (11)</b>	<b>France (13)</b>	<b>Irlande (13)</b>	<b>Pays Bas (18)</b>
Papier	Métaux ferreux	Métaux ferreux	Papiers	Déchets putrescibles	Déchets organiques	Déchets ménagers résiduels
Verre	Métaux non ferreux	Métaux non ferreux	Cartons	Papiers	Papiers	Déchets ménagers encombrants résiduels
Textiles	Papiers et Cartons	Papiers et Cartons	Déchets dégradables	Cartons	Cartons	Déchets résiduels de bâtiments
Plastiques	Verre	Verre	Plastiques	Composites	Composites	Déchets organiques
Bois	Plastiques	Divers combustibles	Serviettes et serviettes sanitaires	Textiles	Textiles	Déchets organiques encombrants
Métaux	Déchets organiques	Divers non-combustibles	Autres combustibles	Textiles sanitaires	Textiles sanitaires	Papiers et Cartons
Composites	Bois	Plastiques denses	Verre	Plastiques	Plastiques	Verre
Produits de soins	Textiles	Plastiques (films)	Métaux	Combustibles non classé	Verre	Déchets dangereux
Déchets toxiques	Minéraux (autres que verre)	Putrescibles	Divers non combustibles	Verre	Métaux	Textiles
Organiques	Composites	Textiles	Déchets dangereux	Métaux	Déchets municipaux spéciaux	Déchets électroniques
Autres	Déchets dangereux	Eléments fins <10mm	Autres résidus	Incombustibles non classés	Combustibles non classé	Métaux
	Autres			Déchets ménagers spéciaux	Incombustibles non classés	Plastiques
	Eléments fins <10mm			Eléments fins <20mm	Eléments fins <20mm	Bois
						Minéraux
						Résidus d'amiante
						Meubles
						Cartons d'emballages
						Autres

- des équipements lourds : tractopelle, matériel de tri et de criblage, balances industrielles, etc.
- de la main d'œuvre importante (au minimum 5 à 6 personnes) et qualifiée ou ayant subi une formation,
- du temps : au minimum 1 journée pour trier un échantillon.

Les tableaux 11 et 12 rendent compte de chacune de ces contraintes [1], [65].

**Tableau 11. Coûts des opérations d'échantillonnage et de tri d'une campagne (en Allemagne et en France)**

Méthode	Allemande	Française
<b>Personnel nécessaire pour l'échantillonnage et le tri</b>	5 à 6 personnes et 1 responsable	6 personnes et 1 responsable
<b>Coût (en euro) de l'échantillonnage et du tri (sans analyses)</b>	Pour l'échantillonnage et le tri de 30 m <sup>3</sup> (env. 6 tonnes) <b>12 782 – 15 339 €</b> (25.000-30.000 DEM)	Pour l'échantillonnage et le tri de 2,5 tonnes <b>8 843 à 12 043 €</b> (68 000 à 96 000 FF)

NB : 1 € = 1,95583 DEM = 6,55957 FF

Ce besoin en matériel et (surtout) en main d'œuvre rend ce type de caractérisation très coûteuse. Le coût d'une campagne (seulement l'échantillonnage et le tri) peut varier (dans les années 90) de 9000 à 15000 euros (cf. tableau 11).

**Tableau 12. Coût prévisionnel d'une campagne de cinq échantillons (sur base année 1992) [1]**

Opérations et Moyens nécessaires	Durées	Coûts TTC (convertis en euros)
Enquête préliminaire	1 à 2 jours	1524 à 2592
Organisation de la campagne	2 à 3 jours	
Main d'œuvre pour l'échantillonnage et l'encadrement : 1 ingénieur responsable	0,5 jour par échantillon	3049 à 4573
Location d'une pelle mécanique avec chauffeur		915 à 1220
Main d'œuvre pour le tri	1 journée de travail par échantillon	2745 à 3660 1067 à 1372
- 6 trieurs		
- 1 technicien		
Matériel :		(peut-être prêtée)
- balance		307 à 381
- 20 caisses cartons sur palettes de 800l		457 à 534
- 25 poubelles 80l		303
- divers		
<b>Total</b>		<b>10 367 à 14 635</b>

Dans le cas de la méthode française MODECOM<sup>TM</sup> [1], le coût prévisionnel d'une campagne (tri de cinq échantillons), montre que près de 70% des coûts sont liés au personnel, notamment celui chargé de l'échantillonnage et du tri (cf. tableau 12). Le coût d'une campagne qui varie de 10 367 à 14 635 €, n'inclut ni les frais de séjour et de déplacement du personnel ni les frais d'analyses et de prestation de bureaux d'études

## **2.2. Harmonisation des méthodes européennes :**

De nombreuses méthodes d'analyse directe peuvent exister dans chaque pays. Cette multiplicité de méthodes montre que plusieurs d'entre elles pouvaient être employées et donner lieu à des divergences de résultats et d'interprétations. Un effort d'homogénéisation ou de concertation a pu être fait dans chaque pays, et plus globalement dans l'Union Européenne, sans que pour autant une harmonisation soit définitivement acquise.

Les principales méthodes sont les suivantes [65] :

- la méthode allemande de l'ARGUS : méthode développée par l'Agence allemande de l'Environnement en 1979-80 et en 1983-85 ;
- la méthode belge de l'IBGE : méthode développée par l'Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement ;
- la méthode française MODECOM<sup>TM</sup> : méthode développée par l'Agence française de l'Environnement (ADEME) en 1994 ;
- la méthode irlandaise de l'EPA : méthode développée par l'Agence irlandaise de l'Environnement.

Dans le but d'harmoniser toutes les méthodes européennes, une méthode dénommée REMECOM (Réseau de Mesure Européen des Ordures Ménagères) a été mise au point en 1998 [65] dans le cadre d'un programme européen coordonné par l'ADEME, impliquant 5 pays européens (l'Allemagne, la Belgique, la France, l'Irlande, l'Italie).

Cette harmonisation qui a été testée dans 18 villes européennes, a porté essentiellement sur la nomenclature et les procédures de tri. Les méthodes d'échantillonnages par contre sont restées celles propres à chaque pays (développées dans les méthodes nationales).

## **3. Limites et Faiblesses des méthodes de caractérisation des déchets :**

Dans une opération de caractérisation des déchets ménagers, il est impossible de prendre en compte (prélever ou mesurer) la totalité du gisement d'une agglomération pouvant représenter plusieurs centaines ou milliers de tonnes. Les mesures doivent alors être réalisées sur une fraction de taille

réduite (quelques dizaines ou centaines de kilogrammes) selon des principes statistiques et les résultats des analyses seront ensuite étendus au gisement initial des déchets.

En raison de l'extrême hétérogénéité de la composition des déchets et de leur granulométrie très variable pour une même fraction, des questions statistiques fondamentales de précision et de représentativité<sup>3</sup> sont alors posées.

### **3.1. La précision des résultats :**

Dans le cas de l'échantillonnage des ordures ménagères, une erreur est inévitablement commise quelque soit le soin apporté à sa réalisation en raison de l'importante hétérogénéité de la matière. Cette erreur dite « fondamentale » est calculée à partir de *la théorie de l'échantillonnage des matières morcelées*, qui est décrite dans la 2<sup>ème</sup> partie de ce document. Elle doit être évaluée pour chaque constituant des déchets afin de pouvoir apprécier sa réelle représentativité dans le gisement étudié.

*A partir d'une masse à prélever, on calculera à posteriori la précision de la mesure et inversement, en fonction de la précision souhaitée, on déduira la masse à analyser.*

### **3.2. La représentativité des prélèvements :**

La taille des échantillons prélevés peut être suffisante dans le cas de certaines catégories (comme le papier), du fait de leur part relative importante dans la masse globale, mais sera insuffisante pour d'autres catégories peu présentes dans les déchets (les déchets spéciaux par exemple). A titre d'exemple dans le cas des déchets ménagers français, une erreur fondamentale équivalente de l'ordre de 7% [73] :

- est obtenue sur « le papier » suite au tri d'un échantillon de masse 500 kg,
- mais ne peut être obtenue sur « les déchets spéciaux » que suite au tri d'un échantillon d'une masse minimale de 8 500kg,

*L'échantillonnage des déchets se conçoit donc toujours vis-à-vis d'une grandeur mesurée. Si plusieurs grandeurs sont à prendre en compte, il importe de les hiérarchiser.*

### **3.3. Le manque de fondements statistiques des méthodes existantes :**

Les méthodes de caractérisation existantes souffrent généralement d'un manque de fondements statistiques au niveau de la représentativité de l'échantillonnage ainsi que de la précision des résultats.

---

<sup>3</sup> La notion de représentativité est définie dans la 2<sup>ème</sup> partie du document (chapitre 2)

La méthode française MODECOM<sup>TM</sup>, est l'une des rares méthodes qui estime la précision d'échantillonnage en la calculant à posteriori, une fois la composition des ordures ménagères connue [1]. Cependant, dans cette méthode la taille des prises d'échantillons est fixée à 50 kg [11], sans vérification préalable de sa représentativité vis-à-vis des grandeurs recherchées. De même, l'erreur expérimentale au sein d'une même benne de collecte des déchets ne peut être calculée car les 10 prélèvements de 50 kg mélangés pour constituer un échantillon de 500 kg ne peuvent être analysés séparément.

### III. LE BESOIN DE METHODES DE CARACTERISATION RIGOUREUSES, OPERATIONNELLES ET ADAPTEES POUR LES PED

L'analyse de la situation des déchets dans les PED qui a été précédemment décrite dans les chapitres 1 et 2 de cette 1<sup>ère</sup> partie, montre qu'en matière de caractérisation des déchets, l'ensemble des données existantes sont d'ordre estimatif.

Dans la plupart des cas, ces données ont été obtenues à l'aide soit de formules mathématiques soit d'une quelconque prise d'échantillon qui ne reposent pas sur un fondement statistique précis et justifié. Dans les meilleurs des cas, elles ont été obtenues suite à l'utilisation (par des experts étrangers) des méthodes développées dans les pays industrialisés.

#### 1. Inadaptation des méthodes développées dans les Pays Industrialisés :

Ces méthodes ont été développées dans les contextes des pays industrialisés qui sont complètement différents de ceux des PED et par conséquent, elles ne peuvent être utilisées telles qu'elles dans ces pays. Les principales différences qui doivent être prises en compte, détaillées précédemment, doivent être rappelées :

- les saisons très différenciées (sèches et humides) ;
- les espaces urbains énormément désorganisés et anarchiquement occupés ;
- les très grandes différences sociales séparant les populations ;
- la nature des déchets très différente en quantités, en qualités et en dispersions spatiales ;
- les très difficiles conditions de conduite des opérations pratiques (absence d'aires échantillonnage, manque de moyens de tri, etc.) et d'analyses (manque de laboratoire spécialisé et de matériel spécifique aux déchets, etc.).

## **2. Besoin de prise en compte des spécificités des Pays En Développement :**

Pour garantir une représentativité (fiable) de la réalité, l'utilisation d'une méthode rigoureuse s'impose. Cette méthode doit être basée sur des mesures et analyses réelles d'échantillons représentatifs, selon des protocoles précis et de plus adaptés à la nature des déchets et aux contextes locaux des pays en développement. Cette méthode doit ainsi prendre en compte toutes les contraintes et spécificités des PED. Pour cela :

- les campagnes de caractérisation doivent être menées durant les saisons extrêmes afin de connaître les caractéristiques des déchets selon chacune de ces périodes de l'année,
- les communes doivent être découpées en zones présentant des caractéristiques spatiales et socio-économiques, homogènes afin de réduire l'extrême variabilité dans la composition des déchets,
- les protocoles d'échantillonnage et de tri doivent être rigoureux et basés sur des caractéristiques propres aux déchets locaux,
- des analyses physico-chimiques doivent être réalisées sur les déchets triés afin d'obtenir les indications nécessaires aux choix des traitements. En particulier :
  - o l'humidité (globalement et pour chaque catégorie)
  - o les granulométries,
  - o la présence d'inertes et de polluants dans les déchets.

**2EME PARTIE**

**MISE AU POINT D'UNE METHODE DE CARACTERISATION DES  
DECHETS ADAPTEE A LA SITUATION DES PED**

**CHAPITRE 1**

**CADRE ET APPROCHE METHODOLOGIQUE  
POUR LA CARACTERISATION DES DECHETS MENAGERS  
DANS LES PAYS EN DEVELOPPEMENT**

## I. CADRE INSTITUTIONNEL ET PRATIQUE DE LA CONCEPTION DE LA METHODE DE CARACTERISATION DES DECHETS MENAGERS

Un objectif de fond pouvant permettre la conception d'une méthode, telle que celle de caractérisation des déchets ménagers dans les PED ne pouvait être envisageable sans un cadre de travail institutionnel et des moyens de travail importants. La méthode de caractérisation des déchets ménagers adaptée aux PED à travers le cas de la Tunisie, a été mise au point dans le cadre du Programme de Recherche « Mise en place d'une filière compostage en Tunisie ». Ce programme financé par le Ministère tunisien de la Recherche est mis en œuvre par la Technopôle de Borj Cedria et s'appuie sur la « *Plate-forme Expérimentale sur les Déchets* » que la technopôle est en train de développer. Le programme a démarré en Octobre 2003. Il bénéficie par ailleurs, de l'appui institutionnel et financier de l'Agence française De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME).

### 1. Description du Programme « Compostage » :

#### 1.1. Les Objectifs et les Partenariats du Programme:

Le programme de R & D « Mise en place d'une filière compostage en Tunisie » doit permettre à la Tunisie de disposer des bases scientifiques et techniques pour développer des projets industriels de compostage. Ce programme qui est conduit en partenariat avec diverses institutions tunisiennes couvre toutes les étapes de la filière compostage avec :

- la caractérisation des déchets pour définir leur aptitude et leur innocuité pour le compostage,
- la mise au point de procédés de compostage adaptés à la nature des divers types de déchets organiques (municipaux et non municipaux),
- la valorisation agronomique du compost produit.

Pour mener à bien chacune des composantes de ce programme de recherche, des accords de coopérations ont été établis avec les institutions tunisiennes concernées par la gestion des déchets et le compostage. Ces institutions identifiées ci-après, ont contribué de diverses manières au développement de ce programme :

- l'Agence Nationale de Gestion des Déchets (ANGED), garantissant l'accès à la décharge du Grand Tunis et la mise à disposition des données (tonnages des déchets, registres d'exploitation de la décharge, etc.) et des équipements lourds (pont bascule, chargeuse) ;
- la Ville de Tunis, mettant à disposition les données de collecte, le personnel (trieurs) et les équipements lourds (citerne, mini-chargeuse) ;

- l'Agence de l'Urbanisme du Grand Tunis (AUGT), mettant à disposition les données démographiques et socio-économiques du Grand Tunis et la cartographie des résultats ;
- l'Union Tunisienne de l'Agriculture et de la Pêche (UTAP), mettant à disposition des parcelles agricoles en vue de constituer le réseau d'essais agronomiques ;
- l'Institut National de Recherche en Génie Rural et Forêts (INRGREF), apportant le suivi scientifique des essais agronomiques ;
- l'Agence de Vulgarisation et de Formation Agricole (AVFA), agissant pour la vulgarisation des résultats agronomiques.

Le programme a bénéficié du conseil et de l'expérience de l'ADEME pour la mise au point de la méthode de caractérisation des déchets, le développement des procédés de compostage et la mise en place des essais agronomiques.

## **1.2. Les Composantes et les Résultats attendus du Programme :**

Le programme de recherche comporte deux phases principales pour aboutir à la mise en place d'une filière compostage en Tunisie :

- une phase expérimentale : qui consiste à acquérir les bases scientifiques et techniques nécessaires dans les 3 domaines complémentaires de la caractérisation des déchets, des paramétrages de procédés de compostage et des expérimentations agronomiques. Cette phase comporte :
  - des campagnes de caractérisation des déchets ménagers en vue de la conception d'une méthode de référence pour la Tunisie et sa validation dans le Grand Tunis ;
  - des essais de compostage des divers types de déchets organiques en vue du paramétrage industriel de leur traitement,
  - la mise en place d'expérimentations agronomiques pour définir les conditions d'usage du compost en agriculture.
- une phase de consolidation : qui consiste à mettre au point les outils méthodologiques nécessaires au développement des projets, dont les principaux sont :
  - la mise au point d'une méthode de caractérisation des déchets ménagers adaptée à la Tunisie (avec Guide méthodologique et logiciel d'utilisation) ;
  - la conception de procédés de compostage adaptés au contexte tunisien et à la nature des divers types de déchets traités : bilans technico-économiques, cahiers de charge type pour appels d'offre d'usines de compostage, cahiers de charge type pour le suivi de la qualité des compost produits dans les usines.

- la définition d'une stratégie de vulgarisation du compost en agriculture : bilans technico-économiques d'une utilisation rationnelle du compost, essais de démonstration et modalités de vulgarisation
- élaboration d'un document de normes d'utilisation du compost.

A l'issue de ces deux phases expérimentale et de consolidation, les bases scientifiques et techniques ainsi que les outils nécessaires seront disponibles pour développer des projets industriels de compostage. Les actions opérationnelles suivantes pourraient ainsi être menées : campagnes de caractérisation dans les villes, implantation d'usines de compostage, valorisation du compost en agriculture.

## **2. Description de la « Plate-forme Expérimentale sur les Déchets » :**

Dans le cadre de la restructuration de la recherche tunisienne, les activités de la Technopole de Borj Cedria (TBC) doivent être orientées vers des résultats opérationnels et concrets pour le développement du pays. La TBC développe actuellement une « *Plate-forme Expérimentale sur les Déchets* », qui constitue un cas exemplaire des orientations de la recherche en Tunisie. Cette plate-forme d'essais et d'expertises a été conçue pour manipuler dans des conditions semi-industrielles les déchets en vue de leur caractérisation et de leur traitement en général et celui par compostage en particulier.

### **2.1. La Structure et l'Organisation de la Plate-forme :**

La Plate-forme se compose d'un « Hall Déchets » et d'une « Station Pilote de Compostage ». Actuellement en cours de construction, elle sera opérationnelle en 2008.

- « Le Hall Déchets » (200m<sup>2</sup>) abritera les locaux suivants :
  - des Locaux d'expérimentations comportant des réacteurs et des pilotes semi-industriels pour : la mise au point de procédés de traitement des déchets, la réalisation de tests de traitement des effluents, etc.
  - des Locaux de stockage et de manipulations des déchets : pour la conservation, le pesage, le séchage, le broyage, la calcination, le lavage, le stockage, etc.
  - un Laboratoire d'analyses physico-chimiques.
- La Station Pilote de Compostage » (800m<sup>2</sup>) aura une capacité de traitement de 5 tonnes/jour.
  - elle permettra la réalisation d'essais de compostage en grandeurs réelles,
  - elle sera équipée en particulier : d'une mini-chargeuse, d'un crible rotatif, d'un broyeur de déchets verts, d'appareils de mesure (température, humidité), etc.

## 2.2. Les Objectifs de la Plate-forme :

La Plate-forme permettra de réaliser un ensemble de prestations étroitement liées : la Recherche-Développement, l'Expertise et la Formation.

### 2.2.1. La Recherche-Développement :

- Dans le domaine général des déchets, les expérimentations en réacteurs et pilotes semi-industriels concerneront en particulier :
  - le traitement des effluents des décharges (lixiviats, biogaz),
  - le tri, le stockage et le compactage des déchets,
  - la décontamination et la réhabilitation des sols pollués,
  - les tests granulométriques, densimétriques et gravimétriques des déchets,
  - les tests de stabilisation, d'humification et d'hygiénisation du compost,
  - la modélisation des transferts de polluants.
  
- Dans le domaine du compostage, les essais en grandeurs réelles permettront :
  - l'optimisation des paramètres techniques de base du compostage : dimension des andains, durées de fermentation, fréquences des retournements, humidification des déchets, etc.
  - le suivi du comportement des déchets durant le processus du compostage : suivi granulométrique, taux d'extraction de la matière organique, etc.
  - la maîtrise des contaminants inertes et toxiques : en amont, en cours et à l'aval du traitement,
  - la détermination des paramètres économiques du compostage : superficies, consommations énergétiques, rendements et bilans matières, main d'œuvre, etc.

### 2.2.2. L'Expertise :

La « Plate-forme Expérimentale sur les Déchets » est appelée à apporter des solutions techniques, économiques et environnementales aux problèmes rencontrés par les opérateurs industriels et les collectivités locales pour la gestion et le traitement de leurs déchets. Ces expertises consisteront à réaliser, en particulier :

- la caractérisation des déchets produits : contaminants, matières compostables et autres,
- des tests permettant la comparaison technico-économique des divers procédés,
- des tests permettant la définition ou l'amélioration des procédés existants par leur adaptation aux spécificités des déchets produits.

### **2.2.3. La Formation :**

La Plate-forme Expérimentale sur les Déchets constitue un outil pédagogique unique en Tunisie pour :

- la formation universitaire : enseignement (travaux pratiques), préparation de diplômes (techniciens, ingénieurs, thésards, etc.),
- la formation à destination des maîtres d'ouvrages et opérateurs de terrain pour leur fournir les bases stratégiques et techniques leur permettant de maîtriser leurs projets, tel que mener des campagnes de caractérisation des déchets, concevoir et définir les paramètres du compostage, etc.

### **2.3. Le Recyclage des déchets de la Technopôle :**

La station pilote de compostage permettra également l'application des principes écologiques du recyclage à son propre cas et d'en faire une démonstration et une promotion concrète pour le Développement Durable. Il s'agira de traiter tous les déchets organiques de la Technopôle : déchets issus des cantines et des restaurants universitaires, déchets issus de l'entretien des espaces verts (taille des arbres, gazon), déchets provenant des cultures sous serre. La capacité de traitement de la station est de 5 tonnes/jour. Le compost produit aura les 3 destinations suivantes :

- il sera testé dans les cultures sous serre,
- il servira de fertilisant pour l'entretien des espaces verts de la Technopôle,
- l'excédent pourra être vendu aux agriculteurs de la région, procurant ainsi des recettes pour la Recherche.

### **2.4. Lieux actuels des expérimentations:**

La « Plate-forme Expérimentale sur les Déchets » est en cours de construction et de structuration : bâtiments, personnel et équipements. Actuellement, les travaux de recherche sur les déchets se déroulent dans les divers lieux suivants :

- la Décharge du Grand Tunis (à Borj Chékir) : en ce qui concerne les essais de compostage et de caractérisation des déchets,
- l'actuel « Hall Déchets » qui est un local provisoire (ancien restaurant de la TBC) : en ce qui concerne la manipulation des déchets (pesées, tris, dénombrements, etc.),
- le laboratoire de traitement et de recyclage des eaux usées : en ce qui concerne les analyses physico-chimiques des déchets.

## **II. APPROCHE METHODOLOGIQUE POUR LE CADRAGE D'UNE METHODE DE CARACTERISATION DES DECHETS MENAGERS DANS LES PED**

Ainsi qu'il apparaît des analyses développées dans la partie précédente (cf. Chapitre 3), la démarche habituelle généralement suivie pour la caractérisation des déchets ménagers comporte les quatre étapes suivantes :

- la réalisation d'enquêtes préalables dans le but de connaître la zone d'étude,
- l'organisation de(s) la campagne(s) sur la base des informations recueillies,
- la réalisation de(s) la campagne(s) comportant les opérations d'échantillonnages et de tris,
- la réalisation des analyses au laboratoire.

Les opérations que comporte chacune de ces étapes sont très complexes et fastidieuses. Elles nécessitent des manipulations et des équipements importants et mobilisent de la main d'œuvre dont il faut s'assurer de la qualification. Dans les pays en développement, ces opérations sont encore plus lourdes, car elles se trouvent confrontées à des contraintes et difficultés nombreuses et spécifiques à ces pays, depuis la collecte des données jusqu'à l'analyse des résultats. En préalable d'une telle démarche de mise au point méthodologique, il est fondamental d'identifier ces contraintes et d'évaluer les conséquences sur les principes et les modalités opérationnelles de cette méthode de caractérisation des déchets ménagers.

### **1. Identification des contraintes des PED :**

De très nombreuses contraintes spécifiques aux PED peuvent être rencontrées lors de la caractérisation des déchets. Elles se situent en particulier au niveau : de la collecte des données, de la préparation des opérations pratiques, de la mise au point des protocoles d'échantillonnage et de tri et de la réalisation des analyses physico-chimiques.

#### **1.1. Au niveau de la collecte des données :**

Les informations et données nécessaires pour organiser et mener une campagne de caractérisation des déchets sont généralement les suivantes :

- les caractéristiques générales de la zone d'étude :
  - l'identification des communes,
  - l'évaluation de la population sédentaire,
  - l'identification des niveaux socio-économiques des ménages,
  - la détermination des activités économiques.
- l'évaluation de la production d'ordures ménagères générée pendant une année de référence,

- l'organisation de la collecte des déchets : le type de collecte, les types de contenants utilisés, la fréquence de collecte.

Si dans les Pays développés, l'acquisition de toutes ces données se fait en quelques jours (1 à 2 jours en France, cf. Tableau 12), dans les PED elle pourrait nécessiter et s'étaler sur plusieurs mois d'enquêtes, en raison de leur absence, ou de leur faible degré de fiabilité lorsqu'elles existent. Les incertitudes et les difficultés auxquelles la collecte des informations pourrait être confrontée sont nombreuses. Elles se rapportent par exemple :

- aux superficies et aux découpages administratifs qui sont souvent imprécis,
- aux données statistiques sur les populations (le nombre de ménages et les développements économiques) qui sont généralement aléatoires car soumises à de grandes variations dans l'espace et dans le temps,
- aux données concernant les déchets qui sont la plupart du temps peu précises, car il est difficile de connaître avec certitude :
  - les réelles quantités générées par les communes en raison de pesées inexistantes,
  - les proportions des divers flux en raison des collectes en mélange,
  - l'origine des flux en raison de circuits de collectes non maîtrisés.

### **1.2. Au niveau de la préparation des opérations pratiques :**

Une campagne de caractérisation repose sur des opérations de tris et d'échantillonnages qui :

- doivent se dérouler dans des sites aménagés et équipés pour la réception des déchets, leur pesage, leur échantillonnage et leur tri ;
- nécessitent un personnel formé et du matériel de tri adapté.

La bonne préparation de ces opérations est essentielle pour l'organisation et la conduite des campagnes de caractérisation. Dans les PED, cette phase de préparation se trouve souvent confrontée, à de grandes difficultés, liées d'une part au manque de moyens locaux et au faibles budgets alloués, et d'autre part à la nature elle-même des déchets, très contraignante pour leur manipulation et leur tri, en particulier à cause de leur humidité.

#### **■ Les équipements de pesage et les sites d'échantillonnage adéquats sont rares :**

Les opérations de réception, de pesage et d'échantillonnage des déchets se déroulent généralement sur les décharges. Elles nécessitent des équipements de pesage de grandes capacités (plusieurs tonnes) « les ponts bascules » et des aires bétonnées de plusieurs centaines de m<sup>2</sup> pour l'échantillonnage. Ces équipements sont rares voir inexistants dans les pays en développement car :

- seules les décharges contrôlées sont équipées de ponts-basculés,
- les décharges (même celles contrôlées) ne disposent généralement pas d'aires bétonnées assez vastes pour le déversement des déchets et leur échantillonnage.

■ **Les conditions de tri sont très difficiles :**

Dans les pays développés, les déchets sont transportés suite à leur échantillonnage, vers des locaux abrités et équipés en eau et en électricité pour être triés. Dans le cas des PED, le transport des déchets n'est pas possible en raison de leur nature très organique et donc fortement putrescible.

Immédiatement après leur échantillonnage, les déchets doivent être triés sur place (à la décharge) dans des conditions très difficiles :

- non hygiéniques vu l'absence d'eau courante,
- très rudes pour le personnel, exposé aux aléas climatiques qui peuvent être très extrêmes (vent, pluies, soleil),
- non aisées pour la conduite des travaux, du fait de l'absence d'électricité, de bureaux, etc.

■ **Le personnel n'est pas qualifié :**

Le tri des déchets par catégories (et sous-catégories) n'est pas une tâche facile. Le personnel chargé du tri doit être qualifié et bien expérimenté dans la séparation et l'identification des divers matériaux. Ce type de personnel est souvent déficient dans les PED, en raison de la rareté (ou même l'inexistence) de laboratoires spécialisés dans le domaine des déchets.

■ **Les équipements de tri sont déficients :**

Le criblage et le tri des déchets nécessitent des équipements spécifiques à la caractérisation des déchets : table de tri, crible rotatif (trommel), balances industrielles, etc. Ces équipements sont généralement déficients dans les laboratoires des pays en développement.

### **1.3. Au niveau des protocoles d'échantillonnage et de tri :**

L'échantillonnage et le tri représentent des étapes essentielles dans la caractérisation des déchets. Ils doivent reposer sur des protocoles rigoureux qui précisent la représentativité des prélèvements et les modes opératoires de tri. Dans les PED, les protocoles utilisés sont généralement ceux mis au point dans les pays développés sur la base de données très différentes, d'où leur inadéquation.

■ **Les protocoles d'échantillonnage existants sont établis sur la base de données très différentes de celles des PED :**

L'échantillonnage est l'ensemble des manipulations et prélèvements qui conduisent, à partir du contenu de la benne à analyser (plusieurs tonnes de déchets), à l'échantillon à trier (quelques dizaines de kilogrammes). Pour que cet échantillonnage soit représentatif, il doit reposer sur des protocoles dont les paramètres doivent être déterminés statistiquement en s'appuyant sur des données propres aux déchets locaux. De tels protocoles ainsi que les bases de données sur lesquelles ils doivent s'appuyer, sont souvent inexistantes dans les PED.

■ **Les modes de tri existants ne sont pas adaptés à la nature des déchets des PED :**

Le tri des déchets consiste à la séparation manuelle des diverses catégories selon une nomenclature prédéfinie. Il repose généralement sur des protocoles qui précisent les diverses opérations de criblage et de tri. Les deux modes opératoires de tri existants (et qui sont décrits dans le chapitre suivant) ne sont pas adaptés à la nature des déchets très organique et très humide des PED.

**1.4. Au niveau de la réalisation des analyses :**

Pour la détermination des paramètres physiques et chimiques des catégories triées, des échantillons doivent être prélevés et préparés puis analysés au laboratoire. Ces opérations analytiques sont souvent négligées en raison de l'absence de laboratoires spécialisés dans le domaine des déchets, du manque de maîtrise des pratiques analytiques dans ce domaine peu développé et des faibles (ou même absence) budgets alloués aux analyses.

■ **Difficultés pour la préparation des échantillons :**

La préparation des échantillons consiste en leur séchage, leur broyage puis leur tamisage. Ces opérations nécessitent des équipements spécifiques : des étuves de séchage de grandes capacités, des broyeurs de déchets (qui doivent garantir une non contamination) et des tamis normalisés. Ces équipements sont souvent inexistantes dans les laboratoires des PED.

■ **Difficultés pour l'analyse des échantillons :**

L'analyse des déchets nécessite des équipements coûteux et des méthodes analytiques spécifiques aux déchets. Dans les PED, ces équipements sont souvent déficients et ces méthodes peuvent ne pas être adaptées ou peu maîtrisées.

## 2. Intégration des contraintes dans la démarche méthodologique :

La collecte des données, la préparation et l'organisation des opérations pratiques, l'acquisition des moyens d'analyse et la mise au point des protocoles d'échantillonnage et de tri sont des étapes essentielles dans la démarche de caractérisation des déchets. ***La démarche méthodologique en préalable à la réalisation des campagnes doit donc comprendre les quatre étapes suivantes :***

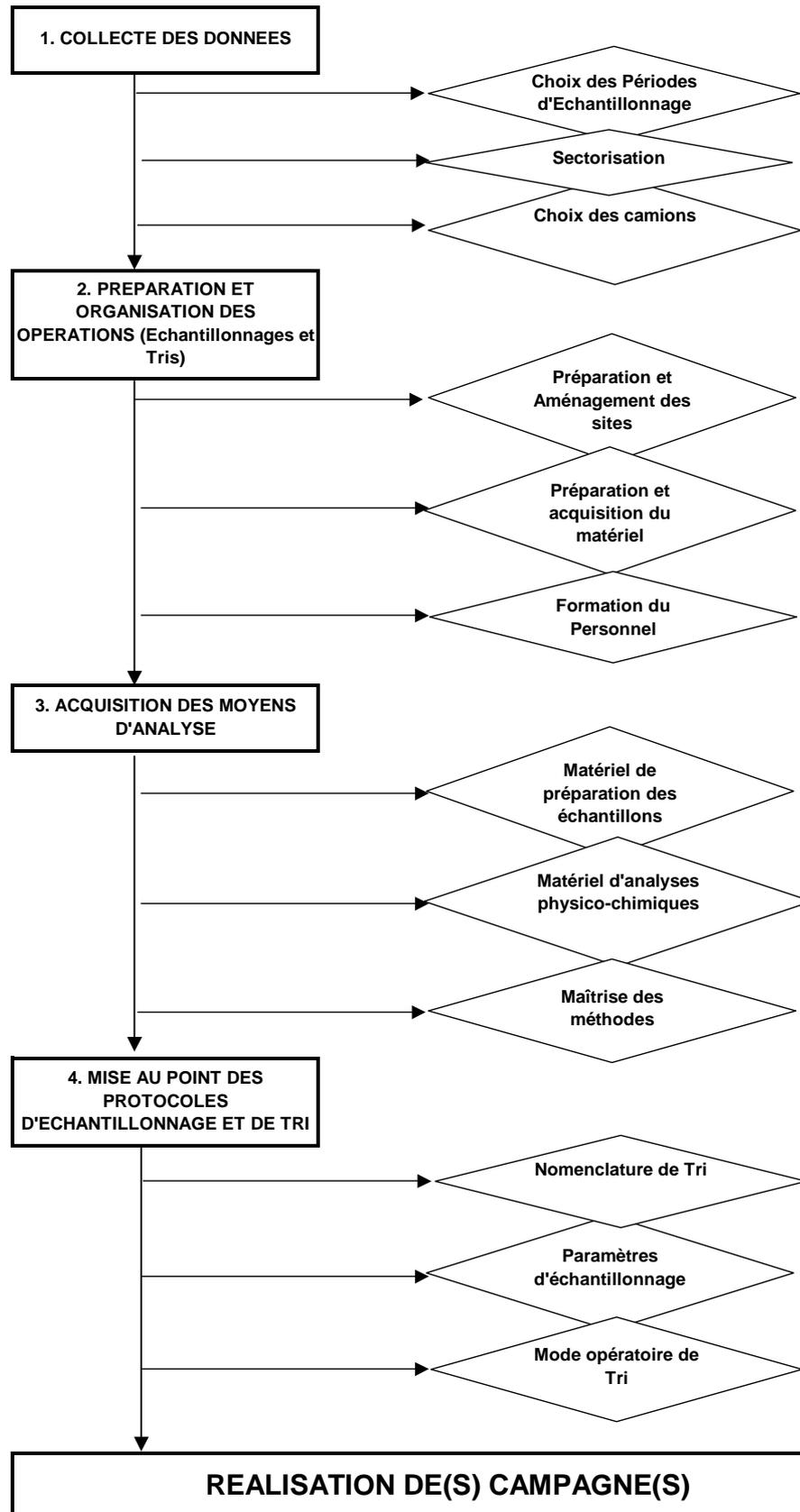
- **la Collecte des Données** : qui va permettre le choix des périodes d'échantillonnage, la sectorisation de la zone d'étude et le choix des camions à échantillonner ;
- **la Préparation et l'Organisation des Opérations** : qui va permettre la préparation et l'aménagement des sites d'échantillonnage et de tri, l'acquisition du matériel de tri et la formation du personnel ;
- **l'Acquisition des Moyens d'Analyses** : qui va permettre l'identification, l'acquisition et la mise en place des équipements et la maîtrise des méthodes d'analyse ;
- **la Mise au point des Protocoles d'Echantillonnage et de Tri** : qui va permettre de préciser la nomenclature de tri (catégories), les paramètres d'échantillonnage et le mode de tri adapté.

Cette phase préalable est synthétisée dans le schéma de la figure 3. ***Elle est d'autant plus fondamentale dans les pays en développement en raison de leurs grandes diversités urbaines et socio-économiques.***

A cause des nombreuses contraintes et difficultés spécifiques aux PED qui viennent d'être identifiées, ***cette phase peut nécessiter plusieurs mois d'enquête et de préparation.*** Pourtant, le temps qui lui est habituellement consacré dans « les études de caractérisation », ne dépasse généralement pas les deux semaines. Il est ainsi évident que ce temps trop court est insuffisant à la préparation des opérations et par conséquent à la bonne conduite des campagnes de caractérisation. Les situations suivantes, lourdes de conséquences négatives, sont alors constatées :

- les données collectées sont souvent sommaires ou peu précises,
- des erreurs de tri sont commises, car :
  - o d'une part, le personnel non formé ne maîtrise pas l'identification et le tri des matériaux,
  - o et d'autre part, le matériel de tri est souvent rudimentaire : par ex. une bâche en plastique est utilisée à la place de la table de tri,
- les résultats sont approximatifs, car issus de protocoles d'échantillonnage non fondés et de modes de tri non adaptés,
- les analyses physico-chimiques sont rarement réalisées.

**Figure 3. Démarche Méthodologique Préalable à la réalisation de(s) campagne(s) de caractérisation**



## 2.1. La collecte des données :

La collecte des données doit aboutir principalement à :

- une description de la zone d'étude : superficies, populations, activités économiques, données climatiques, etc.
- une évaluation de la production des ordures ménagères : origine des flux, quantités produites, etc.

Cette étape doit permettre de connaître et d'étudier les productions des déchets selon tous leurs paramètres de variations. Elle est fondamentale car elle influe énormément sur le choix des périodes d'échantillonnage, la sectorisation et le choix des camions à échantillonner. Elle ne doit pas être négligée d'autant plus que dans les PED (comme cela a été décrit dans la 1<sup>ère</sup> partie) :

- les saisons sont souvent très différenciées.
- les contextes urbains sont généralement très diversifiés et les productions de déchets sont extrêmement variables.

Des données précises doivent être recherchées auprès de tous les organismes concernés : les services de recensements démographiques, les municipalités, les gestionnaires des déchets, etc. Ainsi :

- les données de recensement et les dossiers d'urbanisme doivent permettre d'obtenir les données socio-économique et démographiques ;
- les dossiers d'imposition foncière (valeur des habitations) doivent permettre de connaître le niveau des revenus des ménages ;
- les registres de livraison des déchets à la décharge (lorsqu'ils existent) doivent fournir l'information sur : les zones desservies par la décharge, les poids des déchets provenant des diverses collectivités et les types de producteurs ;
- les itinéraires de ramassage des déchets auprès des municipalité ou des collecteurs privés doivent permettre de connaître le nombre et le type de producteurs de déchets.

Par ailleurs, il est hautement recommandé de recueillir les mêmes informations auprès de plusieurs sources afin de pouvoir les confronter et de s'assurer de leur fiabilité.

### ■ Le choix des périodes d'échantillonnage :

Les pays en développement se caractérisent par des variations saisonnières extrêmes. Le choix des périodes d'échantillonnage doit correspondre à ces variations pour saisir les variabilités des déchets dans le temps.

### ■ La sectorisation de la zone d'étude :

La sectorisation consiste au découpage de la zone d'étude en secteurs présentant des caractéristiques de production de déchets similaires, permettant ainsi de réduire la variabilité dans la composition des déchets.

Dans les PED, la sectorisation est souvent complexe en raison de la grande diversité urbaine et des grands écarts entre les revenus des populations. Pour qu'elle soit fiable, elle doit être réalisée selon des critères précis, traduisant cette importante diversification des contextes urbains et socio-économiques. Ainsi, trois critères principaux devront être pris en compte : le type de collectivité (urbaine, péri-urbaine et rurale), le type de revenus des ménages (revenu élevé, revenu moyen et faible revenu) et la densité de l'habitat qui est extrêmement variable et fortement corrélée avec le niveau de vie et le type d'activité.

### ■ Le choix des camions à échantillonner :

Les camions à échantillonner doivent être choisis au hasard parmi tous ceux desservant les secteurs sélectionnés pour la caractérisation. Cependant, le mode de collecte en mélange (déchets ménagers mélangés aux déchets organiques municipaux et même aux déchets industriels et d'activités de soins) généralement adopté dans les PED incite à la prudence lors du choix de ces camions.

Une pré-sélection des camions transportant uniquement (ou majoritairement) les déchets ménagers et assimilés doit donc précéder le choix des camions à échantillonner. Cette pré-sélection doit se faire sur la base des itinéraires de ramassage des déchets.

## 2.2. La préparation et l'organisation des opérations d'échantillonnages et de tris :

Afin de pouvoir réaliser les opérations d'échantillonnages et de tris, le lieu de décharge est un lieu préférentiel. Il est alors nécessaire d'établir un accord avec le gestionnaire de la décharge afin de permettre l'accès à la décharge, l'utilisation des équipements lourds (pont bascule, chargeur) et l'aménagement de sites pour l'échantillonnage et le tri. La préparation des opérations doit alors concerner : le pesage des camions, l'aménagement des sites, l'acquisition du matériel et la formation du personnel.

### ■ Le pesage des camions à analyser :

Dans le cas de non disponibilité de pont bascule, le poids du camion peut être évalué à partir d'une estimation du volume et du calcul de la densité des déchets.

### ■ L'aménagement des sites d'échantillonnage et de tri :

#### Le site d'échantillonnage :

Le site d'échantillonnage doit être aménagé sur une aire assez éloignée des dépôts d'ordures. Il doit être nettoyé et raclé (dans le cas où il n'est pas bétonné) afin de minimiser le risque d'intrusion d'éléments exogènes lors de la réception et de l'échantillonnage des déchets.

#### Le site de tri :

Le site de tri doit être aménagé à proximité de l'aire d'échantillonnage. Il doit être couvert afin d'abriter le personnel et le matériel des aléas climatiques. La couverture peut être réalisée avec des matériaux récupérés sur la décharge (tôle, cartons, plastiques, etc.). Durant la réalisation des campagnes, le site doit être approvisionné en eau (des récipients remplis d'eau doivent être disponibles en permanence) afin de garantir un minimum d'hygiène au personnel trieur.

### ■ La préparation du matériel d'échantillonnage et de tri :

#### Le matériel d'échantillonnage :

L'échantillonnage des déchets nécessite des engins lourds (chargeuses). Ces engins se trouvent généralement sur la décharge et peuvent être prêtés (ou loués) pendant les opérations d'échantillonnage.

#### Le matériel de tri :

En ce qui concerne le tri des déchets le matériel suivant doit être disponible :

- une balance industrielle de capacité 60kg ou plus, fonctionnant avec batterie (car le site n'est pas alimenté en électricité) : elle peut être prêtée ou louée, sinon elle peut être remplacée par une bascule manuelle.
- une table de tri composée de bacs de différentes mailles : elle peut être construite soit en aluminium soit en bois ;
- du petit matériel : poubelles, sceaux, sacs en plastiques, etc.
- des équipements de sécurité : gants, masques, combinaisons, bottes, etc.

### ■ La formation du personnel :

Un personnel qualifié composé de 5 à 6 personnes doit être chargé du tri des déchets. Ce personnel qui peut être celui de la municipalité (impliquée dans l'étude de la caractérisation) doit avoir bénéficié d'une formation ou d'une opération « à blanc », afin de pouvoir identifier les matériaux puis les séparer en diverses catégories. La cadence du tri doit être maîtrisée et bien évaluée.

Dans l'organisation d'une campagne, il faut également bien apprécier et soutenir le degré de motivation de ce personnel.

### **2.3. L'acquisition des moyens d'analyses physico-chimiques :**

Les analyses physico-chimiques nécessitent des méthodes et des équipements spécifiques aux déchets qui doivent être clairement identifiés et disponibles avant toute campagne de caractérisation.

#### **■ Les équipements nécessaires à la préparation des échantillons :**

La préparation des échantillons consiste en leur séchage, leur broyage et leur tamisage. Elle doit se faire dans un laboratoire disposant : d'étuves de séchage de grandes capacités, d'un broyeur de déchets non contaminant et de tamis normalisés. Dans le cas de non disponibilité de ces équipements, ils peuvent être remplacés par un matériel moins coûteux, comme suit :

- les étuves peuvent être remplacées par des armoires thermostatées fabriquées localement,
- le broyeur peut être remplacé par un moulin à légumes,
- les tamis normalisés peuvent être remplacés par des tamis ordinaires.

Cependant, ce matériel non scientifique peut induire des erreurs dans les résultats d'analyse. Il est donc souhaitable d'identifier et de programmer les besoins en matériel scientifique dès la préparation du projet.

#### **■ Les équipements nécessaires aux analyses physico-chimiques :**

L'analyse physico-chimique des poudres préalablement préparées, nécessite des équipements généralement coûteux, tels que :

- les Carmographs : pour le dosage du carbone,
- les Spectrophotomètres à Absorption Atomique : pour le dosage des métaux lourds,
- les Bombes Calorimétriques pour la détermination du pouvoir calorifique,
- etc.

En cas de non disponibilité de ces équipements dans les laboratoires locaux, les analyses peuvent être réalisées dans des laboratoires spécialisés étrangers. L'expédition des échantillons des déchets préalablement préparés (en petites quantités à l'état de poudre sèche) est alors moins contraignante que si les déchets étaient à l'état brut (en grandes quantités de déchets humides).

#### 2.4. La mise au point des protocoles d'échantillonnage et de tri :

Les protocoles d'échantillonnage et de tri doivent préciser impérativement la nomenclature de tri, les paramètres d'échantillonnage et le mode de tri adapté. L'absence, l'improvisation ou l'approximation de ces protocoles ne peuvent apporter aucune justification scientifique, ni efficacité pratique à la démarche de caractérisation.

##### ■ La définition de la nomenclature de tri :

Une fois l'échantillon constitué, les déchets doivent être triés selon une nomenclature qui précise le nombre de catégories et de sous-catégories. Cette nomenclature doit être spécifique à la nature des déchets locaux et les catégories doivent être hiérarchisées selon leur importance dans les ordures étudiées. Les catégories peuvent généralement correspondre à celles des déchets des pays développés, mais il n'en sera pas de même pour les sous-catégories, qui seront beaucoup moins importantes, en raison de la part marginale des emballages dans les déchets des PED.

##### ■ La précision des paramètres d'échantillonnage :

Etant donné l'extrême variabilité de la composition intrinsèque, spatiale, et granulométrique des déchets, la représentativité des prélèvements doit être justifiée statistiquement. Il s'agit d'une acquisition fondamentale, indispensable à tout développement de stratégie de caractérisation des déchets ménagers au niveau d'un pays. Une « analyse test » doit être réalisée en préalable des campagnes de caractérisation. *Elle doit permettre la détermination des paramètres d'échantillonnages (c'est-à-dire la masse et le nombre des prélèvements à effectuer) et des erreurs fondamentales commises* en s'appuyant sur des bases de données propres aux déchets locaux, en particulier celles concernant les masses fragmentaires.

Dans le cas de non disponibilité de ces bases de données (ce qui est souvent le cas dans les PED) leur acquisition pourrait se faire à l'occasion de « l'analyse test » elle-même.

##### ■ La précision et l'adaptation du mode de tri :

Le mode de tri doit être défini par des tests de laboratoire qui tiennent compte des spécificités et des contraintes des PED. Du fait de la nature des déchets très organique et très humide, l'importante adhérence qui peut provoquer le colmatage de la fraction organique aux autres fractions, aboutit à une imprécision dans la composition et dans les granulométries. D'autre part, les conditions de tri difficiles et les capacités de séchage limitées, sont des contraintes réelles et pratiques qui peuvent entièrement mettre en cause le sérieux des résultats.

### III. APPLICATION DE LA DEMARCHE METHODOLOGIQUE DANS LE CAS PARTICULIER DE LA CARACTERISATION DES DECHETS DANS LE GRAND TUNIS

#### 1. Identification des contraintes locales :

La caractérisation des déchets ménagers dans le Grand Tunis s'est heurtée à de nombreuses difficultés à chacune des étapes : de la collecte des données, de la préparation et de l'organisation des opérations pratiques et de l'acquisition des moyens d'analyses physico-chimiques.

L'identification précise de ces difficultés (présentée dans le tableau 13) témoigne de leur diversité et de leur importance et justifie l'analyse qui a été présentée dans le chapitre précédent. Le temps consacré à chaque étape de la phase préalable, les moyens mis à disposition ainsi que les difficultés rencontrées sont résumés dans ce tableau. Cette phase préalable qui a démarré en mars 2003, a nécessité près de 24 mois (temps effectif) d'enquêtes et de préparation.

#### 1.1. Manque de données complètes et précises :

Les informations météorologiques, socio-économiques, urbanistiques, démographiques et de production des déchets pour l'année de référence 2002, ont été recueillies auprès des institutions suivantes :

- l'Institut National de la Météorologie (INM),
- l'Institut National de Statistiques (INS),
- l'Agence de l'Urbanisme du Grand Tunis (AUGT),
- le Département « Déchets » (actuellement ANGED) de l'Agence Nationale de la Protection de l'Environnement (ANPE),
- La Direction de la Propreté de la Ville de Tunis,
- Les Directions de propreté de quelques communes.

#### 1.1.1. Absence de données démographiques et socio-économiques dans certaines communes et certains arrondissements :

Le Grand Tunis est composé de 31 communes constituées elles-mêmes de plusieurs arrondissements (cette organisation administrative est décrite dans le chapitre 1 de la 3<sup>ème</sup> partie). Les données démographiques et socio-économiques qui doivent être étudiées pour chaque commune et arrondissement se rapportent à l'activité économique, le nombre d'habitants sédentaires et le nombre et les revenus des ménages.

Les données démographiques pour l'année 2002 sont les résultats des estimations faites par l'INS sur la base du dernier recensement national de 1994. Ce recensement est réalisé selon un découpage administratif par délégations qui ne permet pas toujours d'avoir l'information au niveau des communes et des arrondissements seuls concernés par la collecte des déchets.

**Tableau 13. Phase préalable à la réalisation des campagnes de caractérisation du Grand Tunis : Envergure et Difficultés rencontrées**

Etapes	Envergure	Moyens disponibles	Difficultés rencontrées
Collecte des Données et leur interprétation	8 mois (de mars à octobre 2003)	Accords de coopérations établis avec : l'AUGT, l'ANPE et la Ville de Tunis.	-absence de données démographiques dans certaines communes et certains arrondissements, -méconnaissance des tonnages propres aux déchets ménagers et assimilés, -méconnaissance des tonnages produits dans les arrondissements, -méconnaissance des origines des déchets transportés par les privés, -manque de cohérence et non concordance de certains tonnages avec ceux communiqués par les communes.
Préparation et Organisation des opérations pratiques	6 mois (de juillet à décembre 2003)	Selon l'accord avec l'ANPE : -l'accès à la décharge -la mise à disposition : du pont bascule, du chargeur et de « l'aire de chiffonnage ». Les moyens matériels et humains du « Hall Déchets » : -un personnel qualifié (2 techniciens et 2 ouvriers) -le matériel de criblage et de tri.	-état insalubre des sites d'échantillonnage et de tri -la balance est inadaptée aux conditions de tri. -le personnel est insuffisant
Réparation des équipements d'analyses et acquisition des produits chimiques	7 mois (de juin à décembre 2003)	Le laboratoire dispose : -de 2 étuves de grandes capacité, d'un broyeur non contaminant, de tamis normalisés. -d'un Four, d'un analyseur d'Azote, d'un Spectrophotomètre d'Absorption Atomique.	- matériel en panne -capacité du four limitée -non disponibilité de Carmograph
Mise au point de la nomenclature et des protocoles d'échantillonnage et de tri	3mois (de janvier à mars 2004)	-Décharge : plate-forme et équipements lourds -« Hall Déchets » et Laboratoire : personnel, matériel de tri et d'analyses	-

**■ Le découpage administratif est non cohérent :**

Sur tout le territoire tunisien, deux types de découpages administratifs sont appliqués :

- un découpage par délégations et par secteurs, les délégations représentant les zones communales et celles non communales ;
- un découpage par communes et arrondissements, les communes ne représentant que les zones communales.

Ces deux découpages sont différents et ne se complètent pas. Ainsi les 4 cas de figure suivants peuvent se présenter :

- une délégation peut comporter plusieurs communes : c'est par exemple le cas de la délégation de Carthage qui est constituée de la commune de Sidi Bou Saïd et de celle de Carthage ;
- une délégation peut faire partie d'une commune : c'est par exemple le cas de la commune de Ben Arous qui est constituée des 2 délégations de Ben Arous et de la Medina Jedida ;
- une délégation peut correspondre à une commune : c'est par exemple le cas de la Marsa qui est en même temps une délégation et une commune ;
- une délégation peut correspondre à un arrondissement : c'est par exemple le cas de la Medina qui est en même temps une délégation et un arrondissement.

**■ Les données ne sont disponibles qu'au niveau des délégations :**

Etant donné que le recensement démographique national (effectué par l'INS) se fait sur la base du découpage par délégations, les seules informations disponibles sont celles relatives aux délégations et aux secteurs, qui dans de nombreux cas, ne correspondent pas aux communes et aux arrondissements, seuls concernés par la collecte des déchets.

**1.1.2. Absence de données complètes et précises sur la production des déchets :**

Les déchets ménagers et assimilés générés par le Grand Tunis (soit environ 1800 tonnes/jour) sont acheminés vers la Décharge contrôlée de Borj Chékir soit directement (cas des  $\frac{3}{4}$  des communes) soit après leur transit dans les 2 centres de transfert de Ben Arous et de Jedeïda.

Les données concernant les déchets qui doivent être étudiées pour chaque commune et arrondissement se rapportent à de multiples aspects : les quantités produites, leurs origines, les zones desservies par la décharge et les centres de transfert, les types de producteurs, l'organisation de la collecte et les itinéraires de ramassage des déchets. Ces données ont été recherchées auprès du département « Déchets Solides » de l'ANPE qui dispose des registres d'admission des déchets à la décharge.

Cependant, les informations recueillies à partir de ces registres, ne permettaient pas de connaître avec précision :

- les tonnages propres aux déchets ménagers et assimilés,
- les quantités de déchets produites selon leur origine dans les arrondissements,
- les origines des déchets transportés par les privés,

De plus, dans certains cas, les tonnages ne concordaient pas avec ceux communiqués par les communes elles-mêmes.

#### ■ **Méconnaissance des tonnages propres aux déchets ménagers et assimilés :**

Dans le rapport national de l'environnement [46] seuls les déchets ménagers et assimilés sont admis à la décharge de Borj Chékir et ces déchets seraient composés de 85% de déchets ménagers et de 15% de déchets assimilés. Ces données ne sont pas exactes car :

- la décharge reçoit tous les déchets générés par le Grand Tunis, quelque soit leur provenance : les déchets ménagers et assimilés, les déchets des marchés, les déchets verts, les boues d'assainissement, les déchets des hôpitaux et même les déchets industriels (cf. figure 10, chap.1, 3<sup>ème</sup> partie) ;
- les déchets ménagers sont collectés en mélange avec les déchets assimilés, les déchets des marchés et même ceux des activités de soins.

En conséquence, les tonnages inscrits dans les relevés d'admission des déchets à la décharge ne permettent pas de connaître précisément les tonnages propres aux déchets ménagers et assimilés et encore moins ceux des déchets provenant strictement des ménages.

#### ■ **Méconnaissance des quantités de déchets produites par les arrondissements :**

Les déchets collectés dans les arrondissements sont enregistrés dans les relevés d'admission à la décharge au nom des communes. Ce type de relevé ne permet pas de connaître de façon distincte les tonnages produits par chaque arrondissement.

#### ■ **Méconnaissance des origines des déchets transportés par les privés :**

Les déchets produits par les communes sont transportés à la décharge soit par les services de propreté de ces communes soit par des transporteurs privés. Dans ce deuxième cas, les déchets sont enregistrés dans les relevés de la décharge, au nom des transporteurs et non au nom des communes. Ce type de relevé ne permet pas d'identifier les producteurs des déchets et donc leur origine.

■ **Manque de cohérence de certains tonnages et non concordance avec ceux communiqués par les communes :**

Parfois, les tonnages enregistrés dans les relevés d'admission à la décharge ne sont pas cohérents. C'est par exemple le cas du tonnage annuel de la commune de Radès (40 000 habitants) qui serait de 1050 tonnes, soit une production journalière par habitant de seulement 72 grammes!

Par ailleurs, les tonnages de la commune de Tunis enregistrés à la décharge ne concordent pas avec ceux communiqués par la commune elle-même.

**1.2. Insuffisance des moyens et difficultés dans la préparation et l'organisation des opérations pratiques :**

Les opérations d'échantillonnage et de tri des déchets devaient se dérouler à la décharge contrôlée du Grand Tunis à « Borj Chékir » qui apparaît être le lieu le plus approprié, et nécessitaient des équipements lourds, du matériel de tri et un personnel qualifié. La plupart de ces moyens ont pu être obtenus grâce :

- à l'accord de coopération établi en 2002 entre la TBC et l'ANPE, qui permettait l'accès à la décharge et la mise à disposition du site d'échantillonnage et des équipements lourds ;
- aux propres moyens du « Hall Déchets », qui dispose d'un personnel qualifié et d'un matériel spécifique aux déchets.

Malgré la mise à disposition convenue des moyens de la décharge, de grandes difficultés de préparation ont été rencontrées en raison de l'état insalubre des sites d'échantillonnage et de tri. Par ailleurs, l'inadaptation de certains équipements aux conditions de tri et le nombre insuffisant des trieurs n'ont pas rendu facile cette phase d'organisation.

■ **Etat insalubre des sites d'échantillonnage et de tri :**

Sur la base de l'accord de coopération établi avec l'ANPE, « l'aire de chiffonnage » de la décharge a pu être mise à la disposition des opérations d'échantillonnage et de tri. Il s'agit d'une aire bétonnée d'environ 800 m<sup>2</sup> initialement construite pour organiser le travail de récupération des chiffonniers acceptés sur la décharge. N'ayant pas pu être utilisée à cette fin, elle a alors servi pendant plusieurs années, de lieu de stockage des plastiques collectés par le système de reprise et de valorisation des emballages « Eco-Lef. » (décrit dans le chapitre 1-1<sup>ère</sup> partie). Cependant, en raison de son état insalubre dû au stockage des plastiques et même parfois de déchets toxiques, « l'aire de chiffonnage » ne pouvait être utilisée telle qu'elle pour l'échantillonnage des déchets. Au minimum, une superficie de 300 m<sup>2</sup> devait être libérée et nettoyée. De même, un espace d'environ 20 m<sup>2</sup> devait être aménagé (nettoyé et abrité) pour le tri des déchets.

### ■ Inadaptation de certains équipements et insuffisance du personnel :

La conduite des opérations d'échantillonnage et de tri nécessite des équipements lourds, du matériel de criblage et de tri et un personnel qualifié.

- les équipements lourds, pont bascule et chargeuse de la décharge, ont pu être mis à disposition grâce à l'accord de coopération établi avec l'ANPE,
- les moyens matériels et humains suivants, sont propres au « Hall Déchets » :
  - un matériel composé : d'une table de tri en aluminium, d'une balance industrielle et autre petit matériel (poubelles, seaux, sacs en plastiques, etc.),
  - un personnel qualifié constitué de 2 techniciens et de 2 ouvriers.

Cependant, la balance fonctionnant sur secteur était inopérante sur le site de tri non alimenté en électricité, et le personnel du laboratoire qui est composé de seulement 4 personnes était insuffisant pour accomplir toutes les opérations d'échantillonnage et de tri.

### 1.3. Equipements d'analyses non fonctionnels et limités :

Les analyses physico-chimiques à réaliser doivent permettre de caractériser les contraintes des diverses modalités de traitements choisis. Ainsi, en ce qui concerne la décharge et le compostage (modalités de traitements retenues par le PRONAGDES), les principales déterminations suivantes doivent être réalisées : l'humidité, la matière organique, les inertes, le carbone, l'azote et les métaux lourds. A cet effet, le laboratoire disposait des équipements suivants :

- Pour la détermination de l'humidité et la préparation des échantillons : 2 étuves de séchage de grandes capacités (350 litres chacune), un broyeur de déchets non contaminant (centrifuge à billes) et des tamis normalisés (AFNOR).
- Pour la détermination de la matière organique, des inertes, de l'azote et des métaux lourds : un four à moufle, un équipement pour l'analyse de l'azote Kjeldahl et un Spectrophotomètre d'Absorption Atomique en flamme.

Cependant, la plupart de ces équipements étaient en panne et nécessitaient des réparations souvent très coûteuses. Par ailleurs, le laboratoire ne disposait pas de Carmograph pour le dosage du carbone et la capacité du four limitée, ne permettait que 4 calcinations par jour.

## 2. Conditions de l'intégration des contraintes dans la phase préalable à la caractérisation :

La phase préalable a duré une année entière (cf. Tableau 13) en raison de l'envergure des travaux d'enquête et d'organisation et des grandes difficultés qu'il fallait surmonter au niveau de chaque étape de cette phase.

## **2.1. La recherche, l'analyse et la vérification des données :**

La collecte des données a nécessité plus de 8 mois de recherche, d'analyse et de vérification des informations.

### **2.1.1. Les données démographiques et socio-économiques :**

Les recensements de l'INS, ne permettent pas d'obtenir les données démographiques et socio-économiques dans le cas des communes ne correspondant pas aux délégations. Pour combler ce manque d'informations, nous avons dû procéder de la manière suivante :

- la population sédentaire a été obtenue à partir des estimations démographiques réalisées par l'AUGT,
- les activités socio-économiques et les niveaux de vie des ménages ont été évalués approximativement à partir d'enquêtes de terrain.

### **2.1.2. Les données de production des déchets :**

Les quantités de déchets ménagers et assimilés produites dans chaque commune et arrondissement du Grand Tunis, se sont révélées très difficiles à évaluer en raison de l'absence d'informations sur : les tonnages propres aux déchets ménagers et assimilés, les réels tonnages produits par les arrondissements et l'origine des déchets transportés par les privés et de la non cohérence de certains tonnages. Nous avons essayé de combler ce manque d'informations à partir des enquêtes suivantes :

- une enquête réalisée auprès de la commune de Tunis, afin d'évaluer les proportions des flux collectés en mélange, et d'évaluer les productions de déchets dans chaque arrondissement,
- une enquête auprès des transporteurs privés afin de déterminer les origines des déchets transportés,
- des enquêtes auprès de certaines communes afin de vérifier les tonnages qui apparaissaient « non cohérents ».

### **■ Evaluation des proportions des flux collectés en mélange et des tonnages dans les arrondissements à partir de l'étude du cas de la ville de Tunis :**

Les déchets municipaux et non municipaux transportés à la décharge de Borj Chékir par les services de propreté des communes sont généralement collectés en mélange. Par conséquent, les proportions relatives à chaque flux ne peuvent être connues. Nous avons essayé d'évaluer ces proportions et en particulier celles des déchets ménagers et assimilés, ainsi que les productions propres à chaque arrondissement, au niveau de la ville de Tunis, à partir de l'analyse des registres de collecte des déchets ainsi que d'enquêtes auprès des services de collecte. Ce travail d'analyse et d'enquête a consisté :

- à la saisie et à la synthèse de plus de 13 000 valeurs de tonnages journaliers produits durant l'année 2002 et réparties sur 3 circuits (mécanisé, porte-à-porte jour et porte-à-porte nuit),
- à l'établissement de fiches d'enquêtes et l'évaluation des tonnages de déchets produits par 31 marchés municipaux et de déchets verts générés par 9 arrondissements.

Cette analyse est décrite dans le chapitre.2 de la 3<sup>ème</sup> partie. Elle n'a pu concerner que la commune de Tunis, car c'est la seule dans le Grand Tunis qui disposait des tonnages spécifiques aux arrondissements.

Les principaux résultats de cette enquête sont les suivants :

- la collecte en mélange concerne 95% de la totalité des déchets collectés et principalement les 4 flux suivants : les déchets ménagers, les déchets assimilés, les déchets des marchés et une partie des déchets d'activités de soins,
- les proportions de chacun de ces flux (collectés en mélange) ont pu être estimées comme présenté dans le tableau 14 : 90% de déchets ménagers et assimilés, 8% de déchets des marchés et 2% de déchets d'activités de soins.

**Tableau 14. Répartition des Flux de déchets collectés en mélange**

Flux	Déchets Ménagers et Assimilés	Déchets des Marchés	Déchets d'Activités de Soins
Proportion	90%	8%	2%

Par ailleurs, il nous a été impossible (dans le cadre de notre étude) d'évaluer de manière distincte, les proportions des déchets strictement ménagers et ceux provenant des activités administratives et économiques (assimilés).

■ **Identification de l'origine des déchets transportés par les privés et vérification de certains tonnages « incohérents » :**

- L'identification de l'origine des déchets transportés par les privés nécessitait des enquêtes auprès des sociétés ayant transporté les déchets en 2002. Ces enquêtes se sont révélées très difficiles pour diverses raisons : registres de 2002 non disponibles, changement des zones desservies en 2003, etc.
- Le tonnage de 1 051 tonnes/an fourni par l'ANPE concernant la commune de Radès, semblait « incohérent » et nécessitait une vérification auprès de la commune elle-même. L'enquête auprès de cette commune a aboutit :

- à un tonnage (pour l'année 2002) de 11 600 tonnes,
- ce tonnage correspond à un ratio de 0,794 kg/hab.j, ce qui apparaît beaucoup plus cohérent que le ratio de 0,072 kg/hab.j relatif au tonnage de 1 051 tonnes.

L'interprétation et l'analyse de toutes ces informations ont permis la sectorisation du Grand Tunis ainsi que le choix des périodes d'échantillonnages et des camions à échantillonner. Ces opérations sont détaillées dans les chapitres 1 et 2 de la 3<sup>ème</sup> partie.

## **2.2. La préparation et l'organisation des opérations pratiques :**

Malgré tous les moyens mis à disposition sur la décharge et ceux propres au « Hall Déchets », les opérations d'échantillonnage et de tri ont nécessité plusieurs mois de préparation et d'organisation, en raison des difficultés rencontrées au niveau de la préparation des sites de tri et d'échantillonnage et dans l'acquisition de certains équipements.

- Il a fallu près de 3 mois de négociations pour le nettoyage et l'aménagement des sites d'échantillonnage et de tri :
  - aménagement d'une partie (environ 300m<sup>2</sup>) de l'aire de chiffonnage : enlèvement des plastiques, nettoyage, grattage ;
  - nettoyage et confection d'un abri rudimentaire en cartons pour le site de tri.

Les planches photographiques en annexe.1 permettent de visualiser l'état du site d'échantillonnage avant et après nettoyage.

- Il a fallu près de 6 mois pour l'acquisition d'une balance fonctionnant sur batteries, en raison :
  - des procédures administratives relatives au matériel importé : délai d'importation, passage de douane, etc. ;
  - de la lenteur des procédures administratives locales : établissement de devis, préparation du bon de commande, contrôle des dépenses, etc.

Par ailleurs, la convention établie avec la ville de Tunis a permis de bénéficier de l'aide de 4 ouvriers pour les opérations de tri et d'échantillonnage. Ce personnel non qualifié pour ce genre d'opérations, a dû être formé afin de maîtriser la séparation et l'identification des divers matériaux.

### **2.3. L'acquisition des moyens d'analyses physico-chimiques :**

La réparation des équipements en panne et l'acquisition des produits chimiques nécessaires aux analyses ont nécessité une durée de près de 7 mois, en raison d'une part des budgets limités, et d'autre part de la lenteur des procédures administratives.

Par ailleurs, vu que le budget d'analyse ne permettait pas l'acquisition d'un « Carmograph », nous avons retenu pour le dosage du carbone, la « méthode d'Anne » qui consiste à une simple oxydation du carbone par un mélange sulfochrômique.

### **3. La mise au point de la nomenclature et des protocoles d'échantillonnage et de tri :**

La nomenclature et les protocoles d'échantillonnage et de tri ont pu être précisés à partir d'études statistiques et d'analyses réalisées sur les déchets. Il s'agit :

- des catégories et des sous-catégories à trier,
- des paramètres et de la précision de l'échantillonnage,
- du mode de tri adapté.

#### **3.1. Le choix des catégories et des tranches granulométriques :**

##### **■ Les catégories :**

Le choix des catégories et des sous-catégories a été fait à partir d'une appréciation visuelle des ordures. Cette appréciation a permis de distinguer 13 catégories et 5 sous-catégories : 3 pour les plastiques et 2 pour les métaux (qui sont décrits dans le tableau 15). Les catégories identifiées et retenues, ainsi que leur hiérarchisation selon leur importance dans les ordures étudiées, correspondaient finalement à celles figurant dans la norme française NF XP X 30-408 [13].

##### **■ Les tranches granulométriques :**

Le criblage est destiné à séparer la totalité de l'échantillon en tranches granulométriques. La table de tri dont dispose le laboratoire est constituée de 2 bacs avec des mailles de 20mm et de 100mm. Ces deux coupures granulométriques qui correspondent à la norme NF XP X 30-408 ont toutefois deux objectifs différents :

- la coupure à 20 mm permet de séparer les éléments fins,
- la coupure à 100 mm permet de faciliter les opérations de tri en catégories, tout en séparant les éléments gros de ceux moyens.

Ces deux niveaux de coupure ont été retenus pour la caractérisation des déchets tunisiens. Pour pouvoir séparer les éléments « très fins », nous avons choisi la coupure à 6,3 mm ; cette maille correspondant à celle du tamis normalisé Afnor, disponible au laboratoire.

**Tableau 15. Nomenclature de tri correspondant aux déchets ménagers du Grand Tunis**

Catégories	Sous-Catégories	Nature des déchets identifiés
<b>Déchets Putrescibles</b>	-	Déchets alimentaires (sauf les os qui sont classés dans catégorie « combustibles ») et déchets de jardins
<b>Papiers</b>	-	Les emballages papier, les journaux-brochures, les magazines et publicités sur papier glacé, ainsi que les autres papiers, comme papiers de bureau.
<b>Cartons</b>	-	Les emballages en carton plat (boîtes de riz, par ex), les emballages en carton ondulé et les autres cartons
<b>Composites</b>	-	Déchets composés de différents matériaux intimement liés. En particulier : les briques de lait et de jus de fruits (aluminium, plastique et carton) ou les emballages de café et biscuits (plastique et aluminium).
<b>Textiles</b>	-	Vêtements et chiffons en fibres naturelles ou synthétiques
<b>Textiles Sanitaires</b>		Couches culottes, serviettes hygiéniques, cotons, mouchoirs en papier
<b>Plastiques</b>	les Films	Films polypropylènes (sacs poubelles, sacs de supermarché, ...)
	les Bouteilles et les Flacons	Bouteilles et autres emballages en PEHD, en PVC et en PET.
	les Autres	Emballages en polystyrène Autres déchets en polystyrène Autres déchets plastiques (tuyaux, jouets, ...)
<b>Combustibles non classés</b>	-	Matériaux combustibles autres que ceux évoqués dans les catégories précédentes : déchets de bois, de cuir, de caoutchouc, os, ...
<b>Verres</b>	-	Emballages en verre blanc ou coloré Déchets en verre (ampoules d'éclairage, verre d'optique, ...)
<b>Métaux</b>	les non Ferreux	Emballages métalliques en aluminium
	les Ferreux	Emballages métalliques ferreux Déchets métalliques divers (robinets, casseroles, tuyaux, fils de cuivre, ...)
<b>Incombustibles non classés</b>	-	Matériaux minéraux autres que les verres et les métaux : gravats, pierres, poteries, porcelaines, coquillages, ...
<b>Déchets ménagers Spéciaux</b>	-	Déchets à caractère dangereux susceptibles de se trouver dans les ordures ménagères : peintures, encres, colles, résines, vernis, solvants, produits chimiques (photographie), tubes fluorescents, piles et accumulateurs, aérosols, ...

### **3.2. La détermination des paramètres d'échantillonnage :**

Les paramètres d'échantillonnage ont pu être déterminés à partir de l'étude statistique d'une « analyse test » réalisée trois mois avant le démarrage des campagnes de caractérisation (le 11/01/2004). Cette analyse a concerné les ordures ménagères d'une benne choisie au hasard provenant du Grand Tunis. Le prélèvement des échantillons a été réalisé à la décharge de Borj Chékir. Le reste des opérations : séchage, criblage et tri a été réalisé dans le « Hall Déchets ».

L'étude statistique des résultats de « l'analyse test » qui est présentée dans le chapitre 2 de cette 2<sup>ème</sup> partie a permis de déterminer les deux points fondamentaux suivants:

- la stratégie d'échantillonnage à partir de l'estimation de la masse et du nombre de prélèvements élémentaires ainsi que du nombre d'échantillons à analyser ,
- l'erreur d'analyse minimale engendrée (sur chaque constituant des déchets) pour la masse totale prélevée.

#### **3.2.1. Le déroulement des opérations :**

##### **■ Le prélèvement :**

Suite au déversement et au quartage du contenu de la benne « test », 10 échantillons ont été prélevés dans 10 poubelles de 70 litres. Le poids total ainsi prélevé est de 200kg, le poids des déchets contenus dans 1 poubelle est d'environ 20kg.

##### **■ Le séchage :**

Le contenu de chaque poubelle a été déversé dans 2 bacs de séchage de 35 litres. Les échantillons ont été séchés à 80°C jusqu'à masse constante. La durée de séchage est d'environ 1 semaine.

##### **■ Le criblage et le tri :**

Les échantillons secs ont été criblés aux mailles de 100 et 20 mm à l'aide de la table de tri et à la maille de 6,3 mm à l'aide d'un tamis normalisé. Chaque fraction granulométrique a été triée selon les catégories définies dans le tableau.15.

##### **■ Le pesage et le dénombrement :**

Pour la détermination des masses fragmentaires de chaque catégorie des déchets étudiés, près de 4 700 fragments ont du être pesés puis dénombrés.

Toutes les opérations de séchage, de criblage, de tri et de dénombrement ont nécessité près d'un mois de travail.

**3.2.2. Les résultats de séchage, de tri, de criblage et de dénombrement :**

Les résultats de séchage, de tri, de criblage et de dénombrement des 10 échantillons prélevés sont présentés dans les tableaux 16, 17, 18 et 19. Ces résultats ont permis de déterminer principalement :

- l'humidité moyenne et la composition granulométrique des 10 prélèvements,
- la composition moyenne des 10 échantillons en 13 catégories,
- les masses fragmentaires de chaque catégorie constituant les déchets.

**Tableau 16. Les Résultats du séchage**

n°échantillon	Masse humide (g)	Masse sèche (g)	Humidité (% sur humide)	Matière sèche (% sur humide)
1	19780	8349	57,8	42,2
2	19360	8015	58,6	41,4
3	19710	7046	64,3	35,7
4	19850	7978	59,8	40,2
5	19740	7771	60,6	39,4
6	19370	7987	58,8	41,2
7	19780	7826	60,4	39,6
8	19870	9265	53,4	46,6
9	19730	9361	52,6	47,4
10	19450	7480	61,5	38,5
<b>Moyenne</b>	<b>19664</b>	<b>8108</b>	<b>58,8</b>	<b>41,2</b>
<b>Ecart type</b>	<b>195</b>	<b>724</b>	<b>3,6</b>	<b>3,6</b>

**Tableau 17. Les Résultats du Criblage (en % du poids sec)**

n°échantillon	Les Gros (>100mm)	les Moyens (20-100mm)	les Fins (6,3-20mm)	les Très Fins (<6,3mm)
1	33,5	40,2	18,7	7,6
2	30,7	32,6	24,6	12,1
3	34,8	45,9	12,4	6,9
4	31,9	42,1	15,0	11,0
5	22,8	43,5	22,5	11,3
6	41,0	41,1	10,6	7,2
7	35,2	36,9	22,3	5,6
8	52,5	27,4	13,6	6,5
9	40,7	46,3	6,2	6,8
10	18,2	41,6	27,6	12,6
<b>Moyenne</b>	<b>34,13</b>	<b>39,76</b>	<b>17,35</b>	<b>8,76</b>
<b>Ecart-type</b>	<b>9,6</b>	<b>5,9</b>	<b>6,9</b>	<b>2,7</b>

**Tableau 18. Les Résultats du Tri (en % du poids sec)**

n°échantillon	Les Gros (>100mm)	les Moyens (20-100mm)	les Fins (6,3-20mm)	les Très Fins (<6,3mm)	Totaux
Putrescibles	0,00	11,94	14,88		<b>26,82</b>
Papiers	9,99	6,78	0,25		<b>17,02</b>
Cartons	8,56	3,37	0,02		<b>11,94</b>
Composites	2,04	1,07	0,02		<b>3,13</b>
Textiles	0,86	1,25	0,01		<b>2,12</b>
Textiles Sanitaires	1,80	0,48	0,00		<b>2,28</b>
Plastiques	9,03	3,79	0,14		<b>12,96</b>
Combustibles N.C	0,14	0,83	0,27		<b>1,23</b>
Verre	0,00	3,63	0,90		<b>4,53</b>
Métaux	0,51	1,55	0,18		<b>2,25</b>
Incombustibles N.C	1,21	3,82	0,70		<b>5,73</b>
Déchets Spéciaux	0,00	1,25	0,00		<b>1,25</b>
Fines <6,3mm				8,76	<b>8,76</b>
<b>totaux</b>	<b>34,13</b>	<b>39,76</b>	<b>17,35</b>	<b>8,76</b>	<b>100,00</b>

**Tableau 19. Les Masses Fragmentaires Moyennes (en grammes sur sec)**

Catégories	Mf (sec)
Putrescibles	10,32
Papiers	18,93
Cartons	20,25
Composites	28,48
Textiles	34,62
T.sanitaires	38,62
Plastiques	18,34
Combustibles NC	57,33
Verre	82,44
Métaux	63,18
Incombustibles NC	150,00
D.Spéciaux	28,00
Fines<6,3mm	0,04

### 3.3. La détermination d'un mode de tri adapté :

Un mode de tri adapté aux contraintes et aux spécificités des déchets des PED qui permette de donner une solution opérationnelle à toutes les contraintes citées et analysées précédemment a pu être mis au point à partir de tests de laboratoire réalisés en préalable des campagnes de caractérisation. Ces tests ont été réalisés sur des ordures ménagères « synthétiques » préparées dans le « Hall Déchets ». Les principes de base de ce mode de tri ainsi que les résultats des tests sont présentés dans le chapitre 2 de cette 2<sup>ème</sup> partie.

**2EME PARTIE**

**MISE AU POINT D'UNE METHODE DE CARACTERISATION DES  
DECHETS ADAPTEE A LA SITUATION DES PED**

**CHAPITRE 2**

**BASES SCIENTIFIQUES DE LA METHODE**

## I. PROBLEMATIQUE DE L'ÉCHANTILLONNAGE DES DÉCHETS MÉNAGERS

### 1. L'échantillonnage : définition, importance et qualité

L'échantillonnage désigne toute opération cherchant à représenter un objet d'une certaine étendue, par une fraction de taille réduite au regard d'une grandeur que l'on veut déterminer. Dans le cas des ordures ménagères, l'étude de la composition d'un lot de déchets (par exemple le contenu d'un camion ou la production d'une journée), se fait par l'analyse d'un échantillon représentatif du lot, au regard d'une de ses composantes (par exemple : le papier, le verre, ...) afin que la composition du lot soit estimée suivant la précision relative souhaitée par celle obtenue sur l'échantillon.

L'échantillonnage est une opération importante comme en témoigne P.Gy dans sa théorie de l'échantillonnage [42] :

*« ...l'estimation de la qualité d'un lot de matière, qui peut peser de quelques grammes à quelques milliers de tonnes, fait appel à l'analyse, mais celle-ci présente deux défauts qui empêchent de lui soumettre l'intégralité du lot : elle est très coûteuse à l'unité de masse et elle est le plus souvent destructrice. C'est pourquoi dans toutes les industries, mais aussi en biologie, en médecine, dans l'agriculture ou la protection de l'environnement, l'analyse ne met en œuvre que des masses de matière minimales, voire infimes : les prises d'essai. Ces dernières sont obtenues à l'issue d'une suite de réductions progressives de masse : chacune d'entre elles est un échantillonnage et produit, soit un spécimen, soit un échantillon. Obtenu sans précaution particulière, il n'a aucune chance d'être représentatif du lot initial et n'est qu'un spécimen sans valeur, trompeur pour l'utilisateur... ».*

La qualité d'un échantillon est décrite par sa représentativité, soit indirectement à partir de l'erreur fondamentale d'échantillonnage définie par P.Gy dans sa théorie de l'échantillonnage dans le domaine des minerais, soit directement par J-L. Pineau [63] dans l'étude des déchets à composants majoritaires.

### 2. L'erreur fondamentale d'échantillonnage et notion de représentativité :

#### 2.1. Définitions :

L'efficacité d'un échantillonnage est évaluée à partir de l'erreur fondamentale d'échantillonnage (EF) ou ( $e$ ) définie par [41] :

$$e = \frac{(a_E - a_L)}{a_L} \quad (1)$$

avec :

- $a_L$  : la valeur réelle (inconnue) de la grandeur étudiée au sein du lot L
- $a_E$  : la valeur mesurée de la grandeur étudiée au sein de l'échantillon E.

Ainsi l'échantillonnage est dit :

- **non biaisé** : quand la moyenne de l'erreur  $e$  est nulle (il est dit biaisé dans le cas contraire). Cette propriété n'est cependant jamais observée dans la pratique.
- **juste** : quand l'espérance de l'erreur  $e$  «  $E(e)$  » est pratiquement nulle. Quand elle est nulle, à savoir quand l'estimation de la grandeur du lot est non biaisée, l'échantillon est dit extrêmement juste. Cette nuance entre juste et extrêmement juste est liée à la nature de la propriété étudiée.
- **fidèle ou reproductible** : quand la variance de l'erreur  $e$  est inférieure ou égale à un certain seuil de référence «  $s$  ». On parle dans ce cas de fidélité (ou de reproductibilité) de l'échantillonnage.
- **représentatif** : quand l'échantillonnage est à la fois juste et reproductible. La représentativité «  $r$  » de l'échantillon est définie par Gy par la relation suivante :

$$r^2 = E(e)^2 + \text{var}(e)$$

## 2.2. Origine de l'erreur d'échantillonnage :

L'erreur fondamentale est liée à l'hétérogénéité de constitution de la matière et correspond à une limite optimale idéalement atteinte lorsque toutes les particules ont une chance égale d'être prélevées dans l'échantillon. Cette erreur est irréductible sans modification de l'état physique de la matière.

Elle se différencie d'autres erreurs qui influencent la représentativité de l'échantillon. Ces erreurs sont [42]:

- les erreurs « de préparation et de prélèvement » :  
elles sont dues à la négligence ou à la maladresse (volontaire ou involontaire) des opérateurs (ex. mauvais nettoyage des appareils, mauvais étiquetage, etc.). Ces erreurs peuvent être éliminées en apportant un soin particulier aux différentes manipulations, lors de la constitution de l'échantillon.
- l'erreur de « ségrégation » :  
elle est due à l'hétérogénéité de distribution spatiale (ou temporelle) des différents constituants au sein du lot. Elle peut être réduite, voire annulée par homogénéisation du lot à échantillonner.

### 2.3. Calcul de l'erreur fondamentale :

L'industrie minière est un domaine où l'échantillonnage a été particulièrement étudié en raison des transactions sur les concentrés de minerais. *La théorie de l'échantillonnage des matières morcelées* développée par P.Gy en 1983 sert de référence. Dans sa théorie, P.Gy détermine la variance de l'erreur fondamentale d'échantillonnage qui est un des termes de la représentativité de l'échantillon, à partir de bases statistiques avec l'application de la loi hypergéométrique. La relation obtenue étant compliquée, il la simplifie à partir de considérations liées à des constats expérimentaux du traitement des minerais. La relation finale, donnée ci-après, tient compte des caractéristiques de la matière composant le lot [42] :

$$\sigma^2 (EF) = \left( \frac{1}{M_E} - \frac{1}{M_L} \right) \cdot K \cdot d^3 \quad (2)$$

avec :

- $\sigma^2 (EF)$  : la variance relative de l'erreur fondamentale d'échantillonnage
- $M_E$  : la masse de l'échantillon (en grammes)
- $M_L$  : la masse du lot échantillonné (en grammes)
- $d$  : la dimension des plus gros fragments (en cm)

K est défini mathématiquement en fonction des caractéristiques du minéral par la formule suivante :

$$K = g \cdot f \cdot l \cdot c$$

où :

- $g$  : est le coefficient de granulométrie égal à 0,25 pour une granulométrie étagée,
- $f$  : est le coefficient de forme de la particule,
- $l$  : est le paramètre de libération,
- $c$  : est le paramètre de constitution minéralogique.

#### Le paramètre de libération l :

l est le coefficient de libération de la partie de valeur de la particule. Il est égal à 0,8 quand le minéral de valeur est libéré et égal à 0,01 quand le minéral de valeur est de petite taille et est finement dispersé.

#### Le paramètre de constitution c :

c dépend des masses volumiques du minéral de valeur ( $\rho_0$ ) et du minéral stérile ( $\rho_s$ ) et de la teneur du minéral de valeur ( $a_0$ ) :

$$c = (a_0 - a) / (a_0 \cdot a) \cdot \{ (a_0 - a) \cdot \rho_0 + a \cdot \rho_s \} \quad (3)$$

Le paramètre de forme  $f_i$  :

Généralement Gy trouve que les différents facteurs des particules de minerais sont proches. Il pose qu'ils sont égaux à 0,5 exceptés ceux des particules en lamelle tels que l'or exprimé qui est passé dans un broyeur, égaux à 0,1.

Pour une catégorie donnée, la masse moyenne d'une particule composant cette catégorie peut être calculée à partir de sa masse volumique, sa granularité et sa forme, comme suit :

$$m_i = f_i \cdot \rho_i \cdot d_i^3 \quad (4)$$

avec :

- $f_i$  : paramètre de forme moyen des particules de la catégorie i.
- $\rho_i$  : masse volumique de la catégorie i
- $d_i$  : dimension unitaire moyenne des fragments de la catégorie i. C'est l'ouverture de la maille carrée la plus petite au travers de laquelle le fragment est susceptible de passer.

On accède généralement à cette dimension par tamisage sur une série de tamis. Par expérience, P.Gy a établi que d devait être définie comme l'ouverture du tamis à maille carrée qui laisse passer 95% de la masse totale de la matière, on parle alors de  $d_{95}$ .

La masse unitaire moyenne  $m_i$  des particules de chaque catégorie est un paramètre essentiel dans le calcul de l'erreur fondamentale d'échantillonnage. Dans le cas des minerais, il est possible de déterminer cette masse à partir d'un simple tamisage. Cependant, si les paramètres de forme des matières minérales peuvent être estimées avec suffisamment de précision, *il en va tout autrement lorsqu'on aborde le domaine des déchets où les formes tout à fait complexes rendent difficiles, voire impossibles, la détermination de leurs formes.*

### 3. L'échantillonnage des déchets à composants majoritaires :

Dans le cas des déchets, plus particulièrement les déchets à composants majoritaires tels que les ordures ménagères, la théorie de Gy ne peut pas être appliquée directement. Elle doit être adaptée.

La qualité de l'échantillon est établie suivant deux règles, l'une dans la continuité de la théorie d'échantillonnage de Gy, l'autre dans une autre approche directement liée à l'aide à la décision et développée par Pineau.

#### 3.1. La théorie de P.Gy étendue aux déchets :

L'échantillonnage représente une étape essentielle dans l'étude des déchets. Cependant une série d'erreurs peut influencer la qualité de cet échantillonnage. Les erreurs de manipulation et de ségrégation peuvent être réduites ou même annulées si les manipulations sont

soigneusement effectuées et le lot bien homogénéisé. L'erreur dite « fondamentale » est par contre irréductible et est inévitable, du moins en absence de toute opération de broyage.

Cette erreur fondamentale d'échantillonnage est liée à l'hétérogénéité de constitution du lot et peut être estimée, à partir des caractéristiques physico-chimiques des fragments constituant le déchet étudié : masse, densité, composition des particules, etc. Pour le calcul de cette erreur, la théorie de l'échantillonnage des matières morcelées est considérée comme transposable au domaine des déchets [3] et permettrait ainsi d'évaluer la répartition des différents composants d'un lot de déchets en paramétrant mathématiquement son hétérogénéité de constitution.

Les déchets ménagers se caractérisent par de très fortes hétérogénéités physiques dues à la variabilité et à l'instabilité de leur composition. Par exemple :

- les formes sont extrêmement variables : corps sphériques pleins, corps sphériques creux, corps plats, corps longilignes, etc. ,
- un même produit peut prendre diverses formes : un bout de papier peut avoir une forme sphérique s'il a été froissé ou lamellaire s'il ne l'a pas été, etc.

Par conséquent, les notions de masse volumique, de diamètre et de coefficient de forme, ne peuvent être applicables dans le calcul de la masse moyenne des particules. Elles sont donc abandonnées au profit de la notion de masses moyennes des fragments qui sont alors déterminées par pesées et dénombrements d'un nombre suffisamment grand d'individus. La variance de l'erreur fondamentale [56], [73] est déduite de la relation de Gy dans laquelle le facteur de constitution se limite au minéral de valeur, s'écrit :

$$\sigma_c^2 (EF) = \left( \frac{1}{M_E} - \frac{1}{M_L} \right) \cdot \left[ \left( m_c \cdot \frac{1-2 \cdot t_c}{t_c} \right) + \sum_{i=1}^n t_i \cdot m_i \right] \quad (5)$$

avec:

- $\sigma^2 (EF)$ : est la variance relative de l'erreur fondamentale d'échantillonnage, pour la catégorie c
- $M_E$  : est la masse de l'échantillon prélevé au sein du lot initial
- $M_L$  : est la masse du lot à échantillonner
- $t_c$  : est la proportion massique de la catégorie c au sein de l'échantillon ; c'est la grandeur que l'on cherche à déterminer à travers l'échantillonnage
- $m_c$  : est la masse unitaire moyenne d'une particule de la catégorie c.
- n : représente le nombre de catégories
- $t_i$  : est la proportion massique de la catégorie i au sein de l'échantillon
- $m_i$  : est la masse unitaire moyenne d'une particule de la catégorie i.

Comme il manque le terme décrivant le minéral stérile dans le facteur de constitution, la variance de l'erreur fondamentale n'est qu'une première approximation de l'erreur fondamentale exacte.

### 3.2. La représentativité associée à l'aide à la décision :

Selon Pineau [63], la représentativité est la qualité de l'échantillon qui sert à l'aide à la décision établie à partir de l'application de la loi Normale qui n'est obtenue que si le lot est homogénéisé.

#### Définition de la représentativité:

La représentativité de l'échantillon est le complément à 100% de la précision relative attendue ( $p_r$ ) sur la donnée ( $a$ ) quand l'échantillon est prélevé soit directement dans le lot si ce dernier est homogénéisé, soit dans un lot secondaire, homogénéisé si le lot étudié ou lot primaire, possède une hétérogénéité de distribution. Le lot secondaire est constitué par des prélèvements dans le lot primaire. L'échantillon prélevé doit être juste.

$$R = 1 - p_{r95\%}$$

avec :  $p_{r95\%} = 2 \cdot \sigma/a$

Remarque : la précision relative à 95% est deux fois la racine carrée de la variance de l'erreur fondamentale.

$$P_{r95\%} = 2 \sqrt{\text{var}(EF)}$$

#### La condition de vérification de la justesse de l'échantillon :

A partir de l'application de la règle de Cochran (in Pineau, 2005) et l'estimation du biais, la masse de l'échantillon doit être comprise entre deux limites égales à  $m (1 \pm \sqrt{0,2 (1-R)})$  pour que l'échantillon soit juste,  $m$  étant l'espérance de la masse de l'échantillon calculée à partir de la relation masse de l'échantillon et représentativité. Cela signifie que plus l'échantillon est représentatif, plus sa masse expérimentale doit être proche de la masse estimée avec le calcul.

#### Relation entre la représentativité (R) et la masse de l'échantillon (m) :

Le lot est stratifié suivant les composants majoritaires des ordures ménagères, définis par la composition étudiée. Chaque composant majoritaire est décrit à partir des éléments le constituant. Par exemple pour le verre, on a les bouteilles, les pots en verre, les morceaux de verre. La relation est alors la suivante :

$$m = \{4 / (1-R)^2\} \cdot \{K + k_c (1-2a_c) / a_c\} \quad (6)$$

avec :  $K = \sum a_i \cdot k_i$  avec  $k_i = \sum p_{ij} \cdot m_{ij}$

où :

- $i$  : est l'indice correspondant aux composants majoritaires,
- $m_{ij}$  : est la masse unitaire (dans la pratique la masse moyenne) de l'élément de référence du composant  $i$  telle la bouteille de verre pour le verre,
- $p_{ij}$  : est la proportion massique de cet élément dans le composant
- $c$  : est l'indice du composant majoritaire étudié.

Il ressort que la représentativité de l'échantillon varie d'un composant à l'autre pour une même masse d'échantillon.

Une recherche dans l'étude des éléments unitaires pour avoir les paramètres de la relation proposée par Pineau est actuellement en cours. Cette relation est elle-même une extension de la théorie de Gy [42]. Elle a été appliquée au Maroc [62].

## II. DETERMINATION DE LA STRATEGIE D'ECHANTILLONNAGE DANS LE CAS DU GRAND TUNIS

La stratégie (ou plan) d'échantillonnage est l'ensemble des opérations qui conduisent du lot à échantillonner à la prise d'essai. Le plan d'échantillonnage repose sur des paramètres qui doivent être conçus selon des impératifs de représentativité à respecter et visant une précision souhaitée à ne pas dépasser. La stratégie d'échantillonnage doit également tenir compte des moyens financiers ou matériels mis en œuvre. Ces contraintes, autant d'ordre d'exigence statistique, que de mise en œuvre pratique, qui peuvent se révéler contradictoires dans la réalité, doivent être absolument identifiées – comme cela a été mis en évidence dans le chapitre précédent – et aboutir à un « compromis opératoire » qui doit les respecter.

### 1. Les références de normalisation de l'échantillonnage des déchets ménagers :

#### 1.1. La norme française NF XP X30-411 :

La norme NF XP X30-411 a été publiée en 1996 [11]. Il s'agit d'un guide d'élaboration de procédures d'échantillonnage pour le domaine d'application des déchets. Dans cette norme la taille du prélèvement élémentaire des déchets à étudier, est définie par l'outil de prélèvement comme suit : « *l'outil de prélèvement présentant une ouverture dont la plus petite dimension correspond à quatre fois la dimension des plus grosses particules du lot* ».

Dans le cas des déchets ménagers, une masse de prélèvement élémentaire de 50kg a été retenue, car correspondant à la masse prélevée par une chargeuse ayant un godet de 1m de large (1m étant considéré comme quatre fois la dimension des plus grosses particules du lot). Un échantillon de 500kg est alors défini et constitué à partir de 10 prises unitaires de 50kg. Le

nombre d'analyses est égal au moins à 5. Bien que le principe de cette norme prenne en compte l'influence de l'hétérogénéité de distribution en prélevant 10 fois 50kg, il ne permet cependant pas l'analyse statistique des prélèvements unitaires.

***Cette norme doit être prochainement remplacée par la future norme européenne pr EN 14899.***

### **1.2. La future norme Européenne pr EN 14899 :**

La future norme européenne pr EN 14899 dont l'enquête est en cours d'achèvement [31], reprend la norme française NF XP X30-411 et précise la stratégie d'échantillonnage à adopter de la manière suivante :

- La masse élémentaire (M) sera considérée représentative si la normalité des distributions est vérifiée pour chaque mesure,
- Le nombre de prélèvements élémentaires (m) et le nombre d'échantillons à constituer (n) sont déterminés à partir du calcul de la variance de l'erreur d'échantillonnage globale selon la précision souhaitée.

➤ La variance totale de l'erreur d'échantillonnage étant :

$$VAR(\text{échantillon}) = \frac{\sigma_w^2}{m} + \sigma_a^2 + \sigma_b^2 \quad (7)$$

avec :

- $\sigma_w^2$  : est la variance entre les m prélèvements élémentaires de masse M,
- $\sigma_a^2$  : est la variance de l'erreur d'analyse (ou variance de l'erreur fondamentale)
- $\sigma_b^2$  : est la variance spatiale ou temporelle entre échantillons.
- m : est le nombre de prélèvements élémentaires pour constituer un échantillon

➤ Le nombre n d'analyses à réaliser (ou d'échantillons à constituer) étant :

$$n = \left( \frac{u_p}{p} \right)^2 \cdot \frac{\sigma_w^2}{m} + \sigma_a^2 + \sigma_b^2 \quad (8)$$

avec :

- p est la précision souhaitée,
- $u_p = 1,65$  pour un niveau de confiance de 90%.

Le calcul donne une multitude de valeurs pour n selon l'incrémentation de m. Le choix de m et de n se fait alors par une optimisation du coût de l'analyse qui est donnée par la formule :

$$T_c = (A \cdot m + B) \cdot n \quad (9)$$

avec :

- $T_c$  : coût total de l'analyse,
- $A$  : coût du prélèvement,
- $B$  : coût de l'analyse (pesées et tris).

Les coûts  $A$  et  $B$  sont estimés en temps (ex. minutes).

## 2. Détermination des paramètres d'échantillonnage :

Dans un plan d'échantillonnage les paramètres suivants doivent être identifiés :

- la masse élémentaire du prélèvement représentatif,
- le nombre de prélèvements élémentaires et le nombre d'échantillons à constituer.

Dans le cas du Grand Tunis, ces paramètres ont pu être déterminés à partir d'une analyse « test », dont le mode opératoire des prélèvements et les résultats de séchage, de criblage et de tri obtenus sont décrits et présentés dans le chapitre 1 de cette 2<sup>ème</sup> partie.

### 2.1. Détermination de la masse minimale du prélèvement représentatif :

La masse minimale du prélèvement représentatif doit être déterminée en fonction de l'étude de normalité de la distribution des grandeurs mesurées. Ainsi, la masse du prélèvement sera considérée représentative si la normalité des distributions est vérifiée pour chaque mesure.

#### 2.1.1. Les méthodes d'étude de la normalité :

Pour l'étude de la normalité, la norme AFNOR X06-050 [8] met à la disposition du praticien deux types de méthodes :

- les méthodes graphiques : qui ont l'avantage d'être des méthodes simples et rapides, mais « *dans lesquelles la décision dépend d'une appréciation visuelle, assez subjective dans certains cas* » (ex. la Droite de Henry, la Droite de Pearson, etc.) ;
- les méthodes numériques : plus efficaces qui « *impliquent le calcul de certaines fonctions des observations en vue de leur comparaison à des valeurs limites fixées, définissant la condition d'acceptation de l'hypothèse de normalité, à des risques choisis a priori de rejeter une hypothèse vraie* » (ex. le test de Shapiro-Wilk ou le test de Chi-Carré ( $\chi^2$ )).

Parmi les méthodes numériques, celle proposée par Shapiro et Wilk est considérée dans bien des cas, comme la plus puissante, en particulier lorsque l'échantillon provient d'une *distribution asymétrique*. Cette méthode implique l'emploi de tables, actuellement calculées pour un nombre de mesure  $n \leq 50$ , associant le test à un risque choisi à l'avance de rejeter une hypothèse vraie. Le test de Shapiro-Wilk est basé sur le rapport  $W$  de 2 estimations liées à la variance de la population dont provient l'échantillon :

- l'une, fonction des étendues partielles des  $n$  observations indépendantes d'un échantillon d'effectif  $n$ ,
- l'autre,  $S^2$ , fonction des carrés des écarts à la moyenne des observations.

L'hypothèse de normalité est rejetée si  $W$  est inférieur à la valeur  $W_{1-\alpha}$  tabulée en fonction du nombre de mesures ( $n$ ), pour le risque choisi  $\alpha$  (1% ou 5%).

### **2.1.2. L'étude de la normalité de la distribution des grandeurs mesurées à partir de « l'analyse test » :**

La masse du prélèvement élémentaire testée dans le cas de l'étude du Grand Tunis est égale à 20kg. Le choix d'une telle masse inférieure à la masse de 50kg retenue dans la norme française NF XP X30-411 est justifié par les moins importantes quantités d'emballages contenues dans les ordures tunisiennes par rapport aux ordures françaises.

L'échantillonnage et le tri des 10 prélèvements élémentaires, constitués à partir de « l'analyse test », ont permis d'obtenir une distribution pour les 13 catégories des déchets étudiés. La question posée est alors la suivante : ces distributions sont-elles suffisamment voisines d'une distribution normale pour considérer la masse élémentaire des prélèvements de 20kg représentative ?

Pour pouvoir répondre à cette question, nous avons étudié la normalité des distributions obtenues à l'aide de la méthode numérique de Shapiro-Wilk. Les coefficients  $W$  calculés pour chaque catégorie et chaque tranche granulométrique sont présentés dans les tableaux 20 et 21 ; les seuils pour lesquels l'hypothèse de normalité est rejetée étant respectivement  $W_{0,95} = 0,842$  et  $W_{0,99} = 0,781$  pour les risques d'erreur 5% et 1%.

$W$  n'a pu pas être calculé pour les catégories absentes dans les échantillons triés. Il s'agit des putrescibles, du verre et des déchets spéciaux (dans la fraction  $>100\text{mm}$ ) et des textiles sanitaires et des déchets spéciaux (dans la fraction fine comprise entre 6,3 et 20mm).

**Tableau 20. Résultats du test de Shapiro-Wilk - Calcul du coefficient W pour un risque de 5%**

Catégories	Les Gros >100mm	les Moyens 20-100mm	les Fins 6,3-20mm	les Très Fins <6,3mm	Totaux
Putrescibles	-	0,759	0,952		0,941
Papiers	0,906	0,826	0,918		0,823
Cartons	0,946	0,875	0,771		0,961
Composites	0,932	0,969	0,796		0,953
Textiles	0,761	0,943	0,630		0,924
Textiles Sanitaires	0,812	0,880	-		0,839
Plastiques	0,959	0,955	0,825		0,836
Combustibles N.C	0,503	0,668	0,921		0,811
Verre	-	0,787	0,716		0,797
Métaux	0,845	0,880	0,665		0,974
Incombustibles N.C	0,366	0,977	0,863		0,831
Déchets Spéciaux	-	0,890	-		0,890
Fines <6,3mm				0,854	0,854
<b>totaux</b>	<b>0,964</b>	<b>0,899</b>	<b>0,966</b>	<b>0,854</b>	

**Tableau 21. Résultats du test de Shapiro-Wilk - Calcul du coefficient W pour un risque de 1%**

Catégories	Les Gros >100mm	les Moyens 20-100mm	les Fins 6,3-20mm	les Très Fins <6,3mm	Totaux
Putrescibles	-	0,759	0,952		0,941
Papiers	0,906	0,826	0,918		0,823
Cartons	0,946	0,875	0,771		0,961
Composites	0,932	0,969	0,796		0,953
Textiles	0,761	0,943	0,630		0,924
Textiles Sanitaires	0,812	0,880	-		0,839
Plastiques	0,959	0,955	0,825		0,836
Combustibles N.C	0,503	0,668	0,921		0,811
Verre	-	0,787	0,716		0,797
Métaux	0,845	0,880	0,665		0,974
Incombustibles N.C	0,366	0,977	0,863		0,831
Déchets Spéciaux	-	0,890	-		0,890
Fines <6,3mm				0,854	0,854
<b>totaux</b>	<b>0,964</b>	<b>0,899</b>	<b>0,966</b>	<b>0,854</b>	

L'étude des distributions des tranches granulométriques montre que :

- $W > W_{0,95} > W_{0,99}$  pour :
  - 5 catégories >100mm
  - 8 catégories comprises entre 20 et 100 mm
  - 4 catégories comprises entre 6,3 et 20 mm
  - les Fines < 6,3mm.
- $W_{0,95} > W > W_{0,99}$  pour:
  - 6 catégories >100mm
  - 10 catégories comprises entre 20 et 100 mm
  - 6 catégories comprises entre 6,3 et 20 mm
  - les Fines < 6,3mm.

Par ailleurs, l'étude de la distribution des 13 catégories montre que :

- pour un risque d'erreur de 5%, l'hypothèse de normalité n'est pas vérifiée pour : les papiers, les textiles sanitaires, les plastiques, les combustibles non classés, le verre et les incombustibles non classés ;
- pour un risque d'erreur de 1%, l'hypothèse de normalité est acceptée pour toutes les catégories.

Ces résultats nous permettent de considérer que la masse de prélèvement élémentaire de 20kg :

- est représentative pour toutes les constituants des déchets, pour le risque choisi de 1%,
- n'est représentative que pour 7 constituants des déchets, pour le risque choisi de 5%.

## **2.2. Détermination du nombre de prélèvements élémentaires et du nombre d'échantillons à constituer :**

La future norme européenne prEN 14899 détermine le nombre de prélèvements élémentaires (m) et le nombre d'échantillons à constituer (n) à partir du calcul des variances d'échantillonnage  $\sigma_w^2$ ,  $\sigma_a^2$  et  $\sigma_b^2$  sur une grandeur mesurée selon la précision souhaitée (cf. formules 7 et 8).

### **2.2.1. Calcul des variances d'échantillonnage :**

Le calcul des variances d'échantillonnage doit reposer sur une série d'analyses des masses unitaires prélevées au hasard dans le lot. L'analyse des prélèvements effectués au sein de la benne et dans différentes bennes permettra le calcul respectif de la variance entre les prélèvements élémentaires ( $\sigma_w^2$ ) et la variance de l'erreur fondamentale engendrée ( $\sigma_a^2$ ) et de la variance spatiale entre les échantillons ( $\sigma_b^2$ ).

Dans le cas du Grand Tunis, les prélèvements élémentaires obtenus lors de « l'analyse test » permettent de déterminer les variances ( $\sigma_w^2$ ) et ( $\sigma_a^2$ ) mais pas la variance ( $\sigma_b^2$ ), car la lourdeur des opérations d'échantillonnage et de tri n'ont pas rendu possible l'analyse de plusieurs bennes.

Pour pouvoir calculer la variance spatiale entre les échantillons, nous avons pris pour hypothèse les résultats de « la campagne de caractérisation des déchets ménagers que nous avons déjà réalisée en 1998 dans le Grand Tunis »<sup>4</sup>.

Les variances d'échantillonnage ainsi calculées, sont présentées dans le Tableau.22.

**Tableau 22. Les Variances d'échantillonnage**

Catégories	$\sigma^2w$	$\sigma^2a$	$\sigma^2b$
Putrescibles	14,36	4,63	7,22
Papiers	14,17	6,88	4,21
Cartons	11,73	8,56	3,82
Composites	1,56	20,27	0,03
Textiles	1,98	27,60	0,06
Textiles Sanitaires	5,69	27,71	1,11
Plastiques	11,78	7,87	5,65
Combustibles N.C	0,81	46,11	1,41
Verre	15,61	28,01	1,75
Métaux	0,54	35,55	1,22
Incombustibles N.C	15,35	33,06	0,25
Déchets Spéciaux	1,13	32,10	1,04
Fines <6,3mm	7,08	3,64	7,03

### 2.2.2. Choix de m et de n :

Le choix du nombre de prélèvements élémentaires (m) et du nombre d'échantillons à constituer (n) dépend de la précision recherchée et des coûts de prélèvement et d'analyse comme c'est indiqué dans les formules (8) et (9). Le meilleur plan d'échantillonnage devra minimiser le coût des opérations (ce qui va minimiser la masse prélevée et analysée) pour une précision recherchée.

#### ■ Plan d'échantillonnage optimisé :

Dans le cas du Grand Tunis, le meilleur plan d'échantillonnage optimisant les coûts pour une précision égale à 5% est obtenu avec m =1 et n variant de 3 à 16 selon les catégories. Les résultats de cette optimisation sont présentés dans le tableau 23. Ce qui implique qu'un échantillonnage optimisé sera obtenu en prélevant dans chaque secteur, 1 fois la masse de 20kg à partir de 16 bennes soit une masse totale à analyser de 322kg par secteur.

<sup>4</sup> Campagne de caractérisation réalisée en 1998 avec la méthode MODECOM<sup>TM</sup>, ayant consisté à 12 prélèvements de bennes différentes.

**Tableau 23. Calcul de m et de n pour un coût optimum**

Catégories	m	n	Masse totale (kg)
Putrescibles	1	4	79
Papiers	1	4	87
Cartons	1	5	93
Composites	1	7	143
Textiles	1	10	204
T.sanitaires	1	10	206
Plastiques	1	4	84
Combustibles NC	1	16	322
Verre	1	11	228
Métaux	1	12	248
Incombustibles NC	1	13	264
D.Spéciaux	1	11	224
Fines<6,3mm	1	3	56

■ **Plan d'échantillonnage déterminé selon les contraintes locales :**

Dans le cas des PED, le plan d'échantillonnage doit impérativement prendre en compte les contraintes locales que nous avons analysées (par ex. conditions de travail difficiles, capacités de séchage limitées) en plus de la précision recherchée et des coûts de prélèvement et d'analyse. Généralement, ces contraintes ne permettent pas d'analyser plus de 3 bennes par jour.

Dans le Grand Tunis, si on considère les 5 secteurs objets de la caractérisation (cf Chap.2, 3<sup>ème</sup> partie) et un nombre maximum de 3 caractérisations par semaine, le nombre d'analyses par secteur (n) ne peut dépasser 3. Selon la formule 8, le calcul donne une multitude de valeurs de m pour n égal à 3. Ainsi, m va varier de 1 à plus de 50, ce qui conduit à une masse totale prélevée par secteur variant de 60kg à plus de 3 000kg. Les résultats de ces calculs sont présentés dans le tableau 24.

Etant donné l'impossibilité de trier et de sécher 3 tonnes de déchets par secteur (soit un total de 15 tonnes dans les 5 secteurs), nous avons décidé de ne retenir que 10 prélèvements élémentaires, ce qui implique que seules les catégories : putrescibles, papiers, cartons, plastiques et fines, seront déterminées avec une précision de 5%.

**Tableau 24.** Calcul de m pour n égal à 3

Catégories	m	Masse totale (kg)
Putrescibles	10	600
Papiers	3	180
Cartons	10	600
Composites	>50	>3000
Textiles	>50	>3000
T.sanitaires	>50	>3000
Plastiques	3	180
Combustibles NC	>50	>3000
Verre	>50	>3000
Métaux	>50	>3000
Incombustibles NC	>50	>3000
D.Spéciaux	>50	>3000
Fines<6,3mm	1	60

*Le plan d'échantillonnage retenu consistera donc à prélever dans chaque secteur, 10 fois la masse de 20 kg à partir de 3 bennes différentes, soit une masse totale à analyser de 600 kg par secteur et de 3 000 kg dans les 5 secteurs.*

### 3. Détermination de l'erreur fondamentale d'échantillonnage :

L'analyse de la variance de l'erreur fondamentale d'échantillonnage qui traduit l'hétérogénéité de constitution d'un lot de matière permet de déterminer la loi de variation de cette erreur en fonction de la masse d'échantillon retenue. Pour une masse donnée d'échantillon, on obtient ainsi une valeur de l'erreur fondamentale pour chaque constituant du déchet étudié qui correspond au seuil au-delà duquel il est illusoire de vouloir donner une précision sur une détermination effectuée sur l'échantillon.

Pour la masse d'échantillonnage retenue de 200kg, nous avons calculé la variance de l'erreur fondamentale d'échantillonnage (cf. formule 5) à partir des résultats de « l'analyse test » :

- la composition moyenne des 10 échantillons en 13 catégories (cf. Tab.18),
- les masses fragmentaires moyennes de chaque catégorie constituant les déchets (cf. Tab.19)

Le calcul présenté dans le tableau 25 montre que pour un échantillon analysé de masse 200kg, l'hétérogénéité de constitution des ordures ménagères engendre une erreur fondamentale (avec un coefficient de sécurité de 95%) variant selon les catégories de :

- 3,64 % à 46,11 % pour l'erreur relative,
- 0,32 % à 1,89 % pour l'erreur absolue.

**Tableau 25. Erreurs fondamentales calculées pour une masse de 200kg**

Catégories	Composition (%)	Mf(g)	EF-relative (%)	EF-absolue (%)
Putrescibles	26,82	10,32	4,63	1,24
Papiers	17,02	18,93	6,88	1,17
Cartons	11,94	20,25	8,56	1,02
Composites	3,13	28,48	20,27	0,63
Textiles	2,12	34,62	27,60	0,58
T.sanitaires	2,28	38,62	27,71	0,63
Plastiques	12,96	18,34	7,87	1,02
Combustibles NC	1,23	57,33	46,11	0,57
Verre	4,53	82,44	28,01	1,27
Métaux	2,25	63,18	35,55	0,80
Incombustibles NC	5,73	150,00	33,06	1,89
D.Spéciaux	1,25	28,00	32,10	0,40
Fines<6,3mm	8,76	0,04	3,64	0,32
Totaux	100,00			

Mf (g) : Masse unitaire en grammes

EF-relative (%) : erreur fondamentale relative d'échantillonnage en %

EF-absolue (%) : erreur fondamentale absolue d'échantillonnage en %.

Les erreurs fondamentales d'échantillonnage des constituants des déchets étant :

- < 10% pour les catégories : Putrescibles, Papiers, Cartons, Plastiques et Fines,
- < 40% pour les catégories : Composites, Textiles, Textiles Sanitaires, Verre, Métaux, Incombustibles NC et Déchets Spéciaux.
- > 40% pour la catégories : Combustibles NC.

Le calcul montre que, si l'on souhaite une erreur fondamentale d'échantillonnage inférieure à 10% pour toutes les catégories la masse de l'échantillon devra alors être de 4 390 kg (plus de 4 tonnes !).

### III. MISE AU POINT D'UN MODE OPERATOIRE DE TRI ADAPTE

Dans les PED, le tri des déchets est confronté à de nombreuses contraintes qui mettent en cause la fiabilité des résultats obtenus. Ces contraintes sont liées d'une part aux conditions de tri difficiles et aux capacités de séchage limitées et d'autre part à l'importante humidité des déchets qui peut induire des erreurs en modifiant la composition réelle des déchets.

Un mode de tri adapté aux contraintes et aux spécificités des déchets des PED doit être mis au point afin de permettre de donner une solution opérationnelle à toutes ces contraintes.

#### 1. Description et analyse comparative des modes opératoires existants :

##### 1.1. Description des modes de tri existants:

Suite à leur échantillonnage, les déchets sont criblés et triés manuellement. A cet effet, deux modes opératoires existent :

- Le tri sur humide qui consiste au tri des déchets bruts :

Ce mode de tri est décrit dans les normes françaises NF XP X30-408 [13] et NF XP X30-416 [14]. Il est inclus dans la méthode de caractérisation MODECOM™ développée par l'ADEME.

- Le tri sur sec qui consiste au tri des déchets après leur séchage :

Ce mode de tri est décrit dans la norme française NF XP X30-466 [15]. Il a été développé par le Centre de Machinisme Agricole, Eau et Forêt (CEMAGREF).

Le criblage des déchets se fait à l'aide d'une table de tri dans le cas du tri sur humide et à l'aide d'un crible rotatif (trommel) dans le cas du tri sur sec.

## **1.2. Analyse comparative des deux modes de tri « sec » et « humide » :**

Le tri sur humide a été développé en premier. Certains problèmes rencontrés liés à la lourdeur de ce type de tri et à des interrogations sur sa précision ont poussé à développer le tri sur sec. Mais en réalité, chacun de ces modes de tri présente des avantages et des inconvénients qu'il est nécessaire de bien évaluer.

### **1.2.1. Inconvénients du tri « sur humide » :**

Comparé au tri sur sec, le tri sur humide présenterait les inconvénients suivants [57] :

- **Le manque d'hygiène**, en raison de la manipulation d'ordures brutes.
- **Le manque de précision**. Le tri sur humide est considéré moins précis que le tri sur sec car :
  - les opérateurs trient moins bien sur humide que sur sec,
  - les souillures dues au colmatage des divers matériaux par les matières organiques putrescibles sont plus importantes.
- **Le coût et la lourdeur du tri**. Le tri sur humide est moins rapide que le tri sur sec et plus coûteux étant donné que le tri d'un échantillon de 500kg nécessite :
  - un travail effectif de 24 heures au lieu de 14 heures (temps requis pour le tri sur sec du même échantillon),
  - un personnel de 5 à 6 personnes au lieu de 2 à 3 personnes (personnel requis pour le tri sur sec du même échantillon).

### 1.2.2. Inconvénients du tri « sur sec » :

Comparé au tri sur humide, le tri sur sec fait cependant apparaître les inconvénients suivants :

- **La lourdeur et le coût du séchage.** Le tri sur sec implique des besoins de séchage beaucoup plus importants que le tri sur humide, étant donné que si on considère l'échantillon de 500kg :
  - toute sa masse devra être séchée alors que seulement 68,5kg [4] le seront dans le cas du tri sur humide,
  - ce qui nécessitera une capacité de séchage de l'ordre de 3 000 litres<sup>5</sup> au lieu de seulement 410 litres dans le cas du tri sur humide (soit un volume 7 fois plus grand). Il est à noter que cette capacité de séchage de 3 000 litres est extrêmement rare dans les laboratoires même ceux spécialisés.En conséquence, une caractérisation sur une ville impliquant au minimum 5 échantillons de 500kg (selon le MODECOM™) va exiger au minimum une capacité de séchage de l'ordre de 15 000 litres, ce qui n'est ni applicable ni réaliste.
- **Le manque d'informations sur l'humidité des catégories.** Étant donné que les déchets sont séchés avant d'être triés, l'humidité est alors obtenue globalement. Ce qui ne permettra pas d'avoir l'information sur l'humidité de chaque catégorie.
- **Le coût du matériel de tri.** Avant leur tri, les déchets secs sont criblés à l'aide d'un trommel 6 fois plus coûteux que la table de tri<sup>6</sup>.

## 2. Inadaptation des modes de tri existants au cas des PED et principes d'un mode de « tri adapté » :

### 2.1. Inadaptation aux contraintes et spécificités des PED :

Dans les pays en développement, les déchets ménagers présentent des contraintes dont il faudra tenir compte au moment de leur tri. Ces contraintes sont liées d'une part à la nature des déchets et d'autre part aux conditions de tri. Elles sont résumées dans le tableau 26.

#### ■ Les contraintes liées à la nature des déchets :

- Les déchets sont majoritairement organiques et donc très putrescibles. Ils ne peuvent être ni stockés, ni transportés. Par conséquent, leur tri doit se faire immédiatement après leur échantillonnage ;

<sup>5</sup> La capacité requise pour le séchage de 100kg de déchets (de densité 0,1 à 0,2) étant de l'ordre de 600litres

<sup>6</sup> La table de tri coûte 1000€ alors que le trommel coûte 6000€ (coûts Français)

- Les déchets sont majoritairement organiques et donc très humides. En conséquence :
  - les durées de séchage seront longues, ce qui nécessitera de grandes capacités de séchage ;
  - les souillures dues au colmatage seront très importantes : colmatage des inertes (ex. sables) à la fraction organique et colmatage de la matière organique aux autres matériaux, ce qui :
    - rendra le criblage des déchets très difficile et pas très efficace,
    - engendrera de grandes erreurs au niveau de la quantification des fractions organiques et autres matériaux,
    - rendra difficile la détermination des inertes.

**Tableau 26. Inadaptation des modes de tris existants aux contraintes et spécificités des PED**

Spécificités et Contraintes des PED		Conséquences	Modes de tri existants	
			Tri Humide	Tri Sec
Les déchets sont très putrescibles	- ne pourront être ni stockés ni transportés	- ce qui obligera leur tri immédiat sur place	-	Inopérant
Les déchets sont très humides	- les durées de séchage seront longues  - les souillures dues aux colmatage seront très importantes	- ce qui nécessitera de très grandes capacités de séchage  - ce qui rendra le criblage difficile et inefficace - ce qui engendrera de grandes erreurs dans la quantification des matériaux - ce qui rendra difficile la détermination des inertes	-  Inopérant	Inopérant  -
Le tri des déchets doit être réalisé sur la décharge	- les conditions de travail sont très rudes et non hygiéniques	- ce qui imposera un temps de travail maximum ne pouvant dépasser la demi-journée,	Inopérant	Inopérant
Les capacités de séchage sont souvent faibles	les étuves de séchage disponibles ne permettront pas le séchage de très grandes masses de déchets	- ce qui obligera à échantillonner les déchets avant leur séchage afin de réduire les quantités à sécher	-	Inopérant

■ **Les contraintes liées aux conditions de travail et aux moyens locaux :**

- Le tri est généralement réalisé sur la décharge dans des conditions pratiques très difficiles : pas de local abrité, absence d'eau et d'électricité, etc. Dans de telles conditions, le temps de travail maximum consacré au tri des déchets ne pourrait pas dépasser la demi-journée.

Les planches photographiques en annexe.2 donnent un aperçu de la rudesse de ces conditions de travail.

- Les capacités de séchage sont souvent faibles et les étuves disponibles ne permettent pas le séchage de très grandes masses de déchets : ce qui obligera à échantillonner les déchets avant leur séchage afin de réduire les quantités à sécher.

Les deux modes opératoires de tri se révèlent donc non adaptés à la nature et aux contextes des PED, puisque (Tab.26) :

- le tri sur humide sera inefficace, en raison :
  - des souillures trop importantes et des erreurs de tri qu'elles pourraient engendrer,
  - des conditions de travail difficiles qui ne permettent pas de trier les déchets au-delà d'une demi-journée
- le tri sur sec sera inopérant, en raison :
  - de l'impossibilité de transporter et de stocker les déchets dans l'attente de leur séchage vu leur importante putrescibilité.
  - des énormes capacités de séchage requises par ce mode de tri (3 000 litres pour 1 seul échantillon !) alors que ces capacités sont généralement très limitées dans les PED.

**2.2. Faible représentativité de la composition réelle des déchets des PED par les tris « sec » et « humide » :**

Cet aspect des choses est relativement mal perçu ou évalué dans les argumentaires présentés par les 2 modes de tris existants (cf. § 1.2). En réalité, aucune étude comparative n'a été identifiée dans la littérature. Il est d'autant plus nécessaire d'entreprendre une véritable mise au point comparative, dans le principe et particulièrement par rapport aux déchets des PED dont les caractéristiques et les contraintes opératoires sont très différentes.

Dans le cas du tri sur sec, les adhérences entre fractions seront limitées, rendant plus justes les compositions respectives des fractions. Cependant, le tri sur humide est plus réaliste car il rendra compte des comportements réels des fractions entre elles et l'objectif de traitement sera mieux renseigné. De même, lors du séchage, des fractions fragiles (ex. papiers-cartons et matières organiques) seront fractionnées et verront leur répartition granulométrique modifiée, ce qui entraînera une représentation modifiée de la réalité et du comportement dans les conditions de traitement. Dans le cas des déchets très humides des PED, l'étendue de ces erreurs sera encore

plus importante. Les distorsions des résultats dues à la réduction des fractions lors du séchage et aux adhérences entre fractions sont évalués quantitativement ci-après (cf. § 3).

### **2.3. Les fondements de la procédure de « tri adapté » :**

Le mode de tri « adapté » doit tenir compte de toutes les contraintes et les spécificités des PED qui viennent d'être décrites. On aboutit ainsi à la nécessité de concevoir une autre procédure limitant ou évitant ces contraintes. *Pour cela le protocole doit comprendre les deux phases complémentaires et successives suivantes :*

- **une phase de tri préalable des déchets bruts** en tranches granulométriques et en grandes catégories groupées selon le degré de putrescibilité des déchets. Cette phase va permettre de :
  - procéder au tri immédiat des déchets suite à leur échantillonnage,
  - réaliser un tri rapide ne dépassant pas 2 heures par échantillon, ce qui :
    - permettra de trier 2 échantillons (de 500kg) en une demi-journée,
    - rendra le travail des trieurs moins fatiguant et réduira ainsi les erreurs de tri.
  - réduire les quantités de déchets à sécher (et donc les capacités de séchage), en procédant à un échantillonnage des déchets avant leur séchage.
  
- **une phase de tri complet des déchets séchés**, concernant toutes les catégories et sous-catégories pré-définies. Cette phase va permettre de :
  - réduire les erreurs de colmatage dues à l'importante humidité des déchets,
  - réduire le coût du tri car cette phase nécessite un personnel moins important,
  - programmer le tri des fractions ultérieurement et indépendamment des opérations lourdes d'échantillonnage sur site.

*Cette méthode sera soumise, très prochainement, à une normalisation qui intégrera tous les détails de sa conception.*

## **3. Analyse comparative du « tri adapté » par rapport aux tris « sec » et « humide » :**

### **3.1. Analyse comparative de l'efficacité des tris :**

Des tests de tris réalisés selon les 3 modes opératoires (humide, sec et adapté) sur un même échantillon de déchets de 500kg, ont permis d'évaluer pour chaque mode de tri, les paramètres suivants : les durées de tri, le personnel nécessaire, les masses totales à sécher et les capacités de séchage nécessaires. Cependant, pour pouvoir faire cette comparaison, nous avons dû auparavant évaluer les paramètres des tris sur sec et sur humide propres aux déchets ménagers tunisiens (et des PED en général) qui sont très différents de déchets français. Ainsi :

- la faible part d'emballages va restreindre le nombre de sous-catégories (5 au lieu de 39 dans le cas des déchets tunisiens), ce qui rendra le tri plus rapide (environ 4 fois plus qu'avec les déchets français) ;
- l'importante densité des déchets (en moyenne 0,35 au lieu de 0,15) va réduire les volumes à sécher et donc les capacités de séchages nécessaires (soit 2 fois moins importantes que pour les déchets français).

Les résultats de cette évaluation ainsi que ceux de l'analyse comparative sont présentés dans les tableaux 27 et 28.

**Tableau 27. Evaluation des paramètres des tris « sec » et « humide »  
pour le cas des déchets des PED**

Type de déchets	Déchet de P.I (ex. France)		Déchets de PED (ex. Tunisie)	
Nombre de Catégories et de sous-Catégories	- 13 Catégories - 39 sous-Catégories		- 13 Catégories - 5 sous-Catégories	
Densité/cap séchage pou 100kg	0,1 à 0,2/ 600litres		0,3 à 0,4/300litres	
Mode de Tri	Humide	Sec	Humide	Sec
Temps nécessaire pour le tri d'un échantillon de 500kg	24h	14h	6h	4h
Capacité de séchage nécessaire pour le tri d'un échantillon de 500kg	410 litres	3000 litres	205 litres	1500 litres

**Tableau 28. Analyse comparative du tri d'un échantillon de 500kg (déchets tunisiens)  
selon les 3 modes de tris**

	Mode de Tri « sur Humide »	Mode de Tri « sur Sec »	Mode de Tri « Adapté »	
			Phase préalable	Phase complémentaire
Temps nécessaire pour le tri d'un échantillon	6h	4h	2h	2h
Personnel trieur nécessaire	5 à 6	2 à 3	5 à 6	2 à 3
Masse totale à sécher	68,5 kg	500kg	24 à 28 kg (séchage immédiat)	91 à 95 kg (séchage complémentaire)
Capacité de séchage nécessaire	205 litres	1 500 litres	72 à 84 litres	
Étuves de séchage nécessaires	1 étuve de 210 litres	5 étuves de 300 litres	1 étuve de 100 litres	

Cette analyse montre que le « tri adapté » est le plus efficient : du point de vue du coût et de la rapidité.

### 3.2. Analyse comparative de la précision des tris :

Quelque soit le mode de tri choisi (humide, sec ou adapté), des erreurs de tri sont inévitablement commises et entraîneront une représentation modifiée des compositions massique et granulométrique réelles de l'ordure étudiée. Ces erreurs sont dues soit aux adhérences entre les fractions humides soit à leur fractionnement lors du séchage. Pour pouvoir apprécier l'étendue des erreurs engendrées par chaque mode de tri, une analyse comparative par rapport à une ordure de référence s'impose.

Cette analyse a été réalisée 3 mois avant le démarrage des campagnes de caractérisation. Elle a consisté à la comparaison des résultats de tris réalisés sur une même ordure « synthétique » préparée au laboratoire et dont la composition est connue d'avance, selon les 3 étapes suivantes :

- la préparation des ordures synthétiques,
- le tri des ordures selon les 3 modes de tris,
- l'analyse des résultats de tris obtenus et la quantification des erreurs engendrées dans chaque cas.

#### 3.2.1. Description des tests de tris et déroulement des opérations :

##### ■ La préparation des ordures :

La préparation des ordures synthétiques s'est déroulée en deux étapes : une 1<sup>ère</sup> étape de fabrication et une 2<sup>ème</sup> d'homogénéisation.

##### ➤ Etape de Fabrication :

Une ordure ménagère de masse 25kg a été constituée artificiellement au laboratoire selon une même composition suivante pour ses 12 constituants. Cette composition présentée dans le tableau 29 se caractérise par :

- une fraction grosse (supérieure à 100 mm) de l'ordre de 27%,
- une fraction moyenne (comprise entre 20 et 100 mm) de l'ordre de 73%,

L'absence de la fraction fine (inférieure à 20 mm) est préméditée, afin de pouvoir étudier l'éventuelle apparition de cette fraction suite aux 3 modes de tri.

Deux poubelles de 70 litres ont été remplies par l'ordure ainsi constituée. Cette opération a été répétée 3 fois aboutissant ainsi à 6 poubelles contenant 3 ordures synthétiques d'une masse globale de 75kg. Cette étape de fabrication des 3 ordures a nécessité une demi-journée.

**Tableau 29. Composition de l'ordure ménagère synthétique (en % du poids humide)**

Catégories	les Gros >100mm	les Moyens 20-100mm	Les Fins <20mm	Total	Masses (en kg)
Putrescibles	0,00	55,00		55,0	13,75
Papiers	5,02	3,01		8,0	2,01
Cartons	6,03	3,01		9,0	2,26
Composites	1,00	1,00		2,0	0,50
Textiles	4,02	2,01		6,0	1,51
Textiles Sanitaires	4,02	1,00		5,0	1,26
Plastiques	4,02	2,01		6,0	1,51
Combustibles NC	1,00	1,57		2,6	0,64
Verre	0,00	2,01		2,0	0,50
Métaux	1,00	1,00		2,0	0,50
Incombustibles NC	1,00	1,00		2,0	0,50
Déchets Spéciaux	0,00	0,25		0,3	0,06
<b>Totaux</b>	<b>27,12</b>	<b>72,89</b>	<b>0,00</b>	<b>100,0</b>	<b>25,00</b>

➤ Etape d'homogénéisation :

Cette étape a consisté à la simulation des temps de séjour habituels des déchets avant leur enfouissement dans la décharge. Ainsi, nous avons laissé séjourné les déchets dans les poubelles pendant près de 20h, en nous basant sur les estimations suivantes :

- du temps de séjour des déchets dans la rue : de 10 à 12h
- du temps de collecte et de transport des déchets à la décharge : de 8 à 10h

Suite à cette étape d'homogénéisation, nous assistons à une nouvelle composition de l'ordure synthétique, qui est différente de la composition initiale. Cette nouvelle composition qui est présentée dans le tableau 30 a pu être estimée à partir d'une base de données des humidités des diverses catégories des déchets (constituée lors de nos précédents travaux).

**Tableau 30. Estimation de la composition de l'ordure ménagère synthétique homogénéisée (en % du poids humide)**

Catégories	les Gros >100mm	les Moyens 20-100mm	Les Fins <20mm	Total	Masses (en kg)
Putrescibles	0,00	21,81		21,8	5,45
Papiers	8,32	4,78		13,1	3,27
Cartons	9,82	4,96		14,8	3,70
Composites	1,97	1,87		3,8	0,96
Textiles	6,69	3,10		9,8	2,45
Textiles Sanitaires	7,02	1,87		8,9	2,22
Plastiques	7,89	3,73		11,6	2,90
Combustibles NC	1,78	2,64		4,4	1,10
Verre	0,00	3,98		4,0	1,00
Métaux	1,98	1,78		3,8	0,94
Incombustibles NC	1,87	1,87		3,7	0,94
Déchets Spéciaux	0,00	0,25		0,3	0,06
<b>Totaux</b>	<b>47,34</b>	<b>52,66</b>	<b>0,00</b>	<b>100,0</b>	<b>25,00</b>

On constate ainsi, les modifications suivantes des compositions massique et granulométrique :

- une augmentation de la fraction des « Gros » (de 27 à 47%) et une diminution de la fraction des « Moyens » (de 73 à 52%),
- une diminution de la catégorie des putrescibles (de 55 à 22%) et une augmentation des autres constituants essentiellement : les papiers, les cartons, les composites textiles, les textiles sanitaires et les plastiques ( de 36 à 62%).

#### ■ Le tri , le criblage et le séchage des ordures :

Les ordures ont été triées selon les 3 modes de tri présentés (cf. §1.1 et §2.3) : « le tri sur humide », « le tri sur sec » et « le tri adapté » en 12 catégories et en 3 tranches granulométriques :

- les éléments Gros : de granulométrie >100mm
- les éléments Moyens : de granulométrie comprise entre 20 et 100mm
- les éléments fins de granulométrie < 20mm

Le séchage des déchets à 80°C a permis de déterminer :

- l'humidité globale des échantillons,
- l'humidité de chaque catégorie

#### 3.2.2. Les résultats de tris :

Les compositions des ordures triées selon les 12 catégories et les 3 tranches granulométriques pré-définies, sont présentées dans le tableau 31, en % du poids humide en ce qui concerne le tri sur « humide » et dans les tableaux 32 et 33, en % du poids sec en ce qui concerne les tris sur « sec » et « adapté ».

**Tableau 31. Résultats du « tri humide » (en % du poids humide)**

Catégories	les Gros >100mm	les Moyens 20-100mm	Les Fins <20mm	Total
Putrescibles	0,00	16,83	0,00	16,83
Papiers	10,03	2,53	0,00	12,56
Cartons	8,45	4,47	0,00	12,92
Composites	2,07	1,17	0,00	3,24
Textiles	8,78	4,09	0,00	12,87
Textiles Sanitaires	7,64	0,39	0,00	8,03
Plastiques	8,58	3,54	0,00	12,12
Combustibles NC	3,92	2,33	0,00	6,25
Verre	0,00	3,02	0,00	3,02
Métaux	1,56	1,35	0,00	2,91
Incombustibles NC	1,80	1,18	0,00	2,98
Déchets Spéciaux	0,00	0,19	0,00	0,19
Fines	0,00	0,00	6,08	6,08
<b>totaux</b>	<b>52,83</b>	<b>41,09</b>	<b>6,08</b>	<b>100,00</b>

**Tableau 32. Résultats du « tri sec » (en % du poids sec)**

Catégories	les Gros >100mm	les Moyens 20-100mm	Les Fins <20mm	Total
Putrescibles	0,00	4,04		4,04
Papiers	7,39	2,41		9,80
Cartons	8,39	5,44		13,83
Composites	2,67	2,75		5,42
Textiles	6,10	3,37		9,47
Textiles Sanitaires	7,96	4,29		12,25
Plastiques	11,39	3,23		14,62
Combustibles NC	2,00	2,84		4,84
Verre	0,00	5,90		5,90
Métaux	2,75	2,31		5,06
Incombustibles NC	2,27	2,55		4,82
Déchets Spéciaux	0,00	0,43		0,43
Fines	0,00	0,00	9,51	9,51
<b>totaux</b>	<b>50,92</b>	<b>39,56</b>	<b>9,51</b>	<b>100,00</b>

**Tableau 33. Résultats du « tri adapté » (en % du poids sur sec)**

Catégories	les Gros >100mm	les Moyens 20-100mm	Les Fins <20mm	Total
Putrescibles	0,00	8,59		8,59
Papiers	8,24	4,06		12,30
Cartons	8,79	4,32		13,11
Composites	2,30	2,30		4,60
Textiles	6,57	3,00		9,57
Textiles Sanitaires	7,04	3,45		10,49
Plastiques	11,62	4,57		16,19
Combustibles NC	2,63	2,31		4,94
Verre	0,00	5,49		5,49
Métaux	2,84	2,09		4,93
Incombustibles NC	2,57	2,50		5,07
Déchets Spéciaux	0,00	0,33		0,33
Fines	0,00	0,00	4,39	4,39
<b>totaux</b>	<b>52,60</b>	<b>43,01</b>	<b>4,39</b>	<b>100,00</b>

### 3.2.3. Analyse des résultats et quantification des erreurs de tri engendrées :

Pour pouvoir quantifier les erreurs engendrées par les 3 modes de tris, nous avons comparé les 3 résultats de tri exprimés en % du poids sec à la composition réelle de l'ordure synthétique homogénéisée. Les résultats des compositions massiques sont présentés dans le tableau 34 et ceux des compositions granulométriques dans le tableau 35.

**Tableau 34. Comparaison des compositions massiques obtenues par les 3 modes de tris avec la composition réelle de l'ordure synthétique homogénéisée (en % du poids sec)**

Catégories	Composition réelle	Comp.issue du tri humide	Comp.issue du tri sec	Comp.issue du tri adapté
Putrescibles	10,55	8,61	4,04	8,59
Papiers	12,56	11,86	9,80	12,30
Cartons	14,27	13,43	13,83	13,11
Composites	5,35	4,51	5,42	4,60
Textiles	9,33	11,26	9,47	9,57
Textiles Sanitaires	10,42	11,06	12,25	10,49
Plastiques	16,40	16,70	14,62	16,19
Combustibles NC	4,82	6,87	4,84	4,94
Verre	5,95	4,77	5,90	5,49
Métaux	5,04	3,63	5,06	4,93
Incombustibles NC	4,94	4,15	4,82	5,07
Déchets Spéciaux	0,38	0,31	0,43	0,33
Fines<20	0,00	2,83	9,51	4,39
<b>Totaux</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>

**Tableau 35. Comparaison des compositions granulométriques obtenues par les 3 modes de tris avec la composition réelle de l'ordure synthétique homogénéisée (en % du poids sec)**

Tranches Granulométriques	Composition réelle	Comp.issue du tri Humide	Comp.issue du tri Sec	Comp.issue du tri Adapté
les Gros (>100)	54,34	59,93	50,92	52,60
les Moyens (20-100)	45,66	37,24	39,56	43,01
les Fines (<20)	0,00	2,83	9,51	4,39
<b>Totaux</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>

■ **Erreurs engendrées sur les compositions massiques :**

Les résultats des compositions massiques (cf. Tab 34) montrent que les écarts entre la composition réelle et celles obtenues avec les 3 modes de tris sont plus ou moins importants selon les catégories. Ces écarts sont :

- faibles (< 1%) pour les catégories : composites, verre, métaux, textiles sanitaires, plastiques, incombustibles non classés et déchets spéciaux ;
- assez importants (< 3%) pour les catégories : papiers, cartons, textiles, combustibles non classés,
- très importants (de 2 et 6%) pour la catégorie des putrescibles.

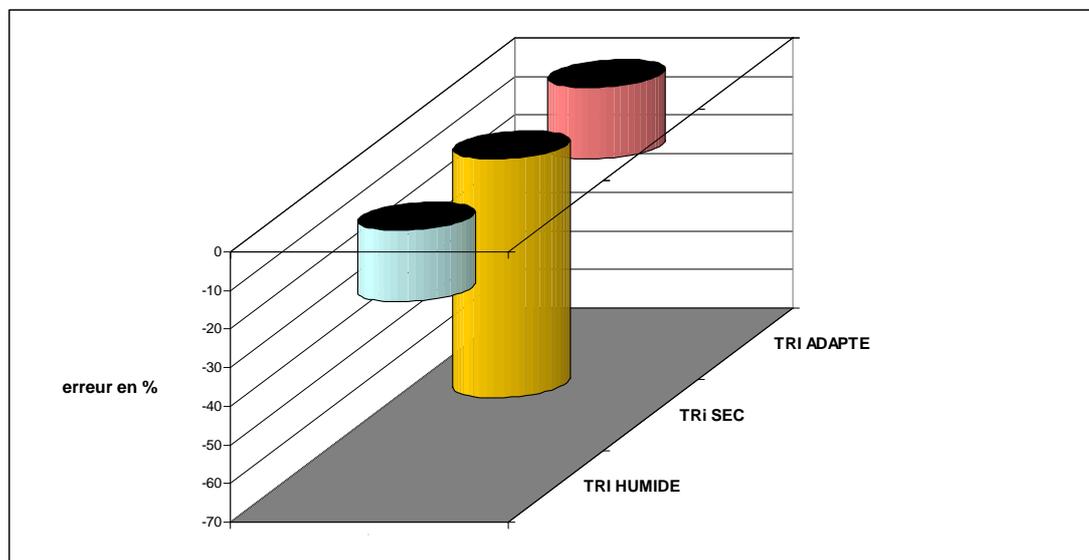
Ces écarts traduisent les erreurs engendrées essentiellement sur les putrescibles dans le cas du tri sur sec et sur certaines catégories (telles que les textiles et les incombustibles) dans le cas du tri sur humide.

➤ Erreurs engendrées sur les putrescibles :

Les putrescibles sont les plus concernés par les erreurs de tri. Les résultats des tris présentés dans la figure.4 montrent qu'ils sont sous-estimés :

- de 62% dans le cas du tri sur sec,
- de l'ordre de 18% dans le cas du tri sur humide et du tri adapté.

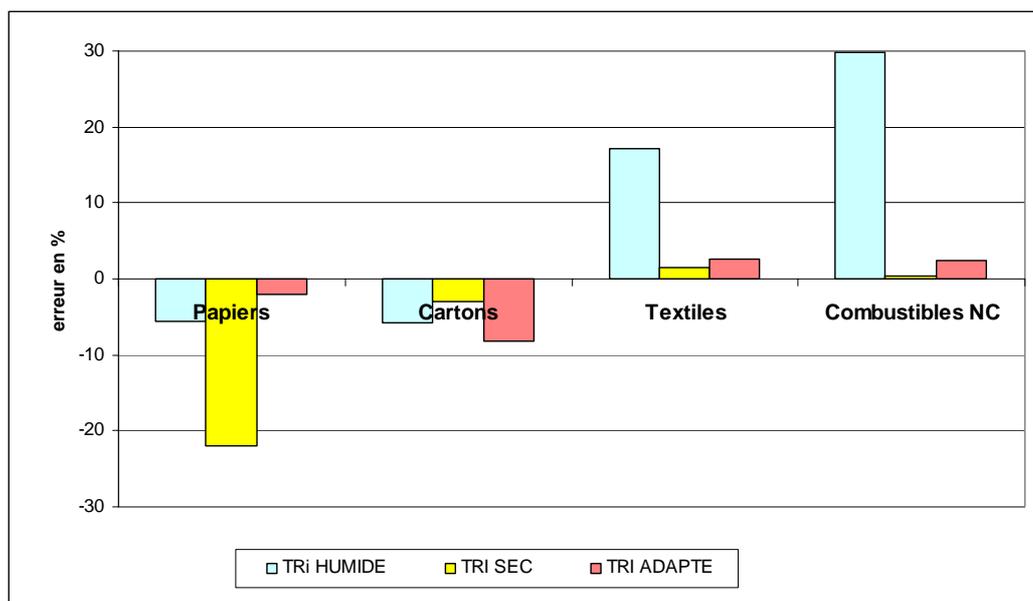
**Figure 4. Erreurs engendrées par les 3 modes de tris sur les putrescibles**



➤ Erreurs engendrées sur les autres catégories:

Les erreurs de tri sur les autres catégories sont essentiellement commises sur les papiers, les cartons, les textiles et les combustibles non classés. L'analyse de ces erreurs, présentée dans la Figure.5 montre que :

- les papiers et les cartons sont sous-estimés :
  - o de 6% dans le cas du tri sur humide,
  - o de 3 à 22% dans le cas du tri sur sec,
  - o de 2 à 8% dans le cas du tri adapté.
- les textiles et les combustibles sont sur-estimés :
  - o de 17 à 30% dans le cas du tri sur humide,
  - o de 0,3 à 2% dans le cas du tri sur sec.
  - o de 2 à 3% dans le cas du tri adapté.

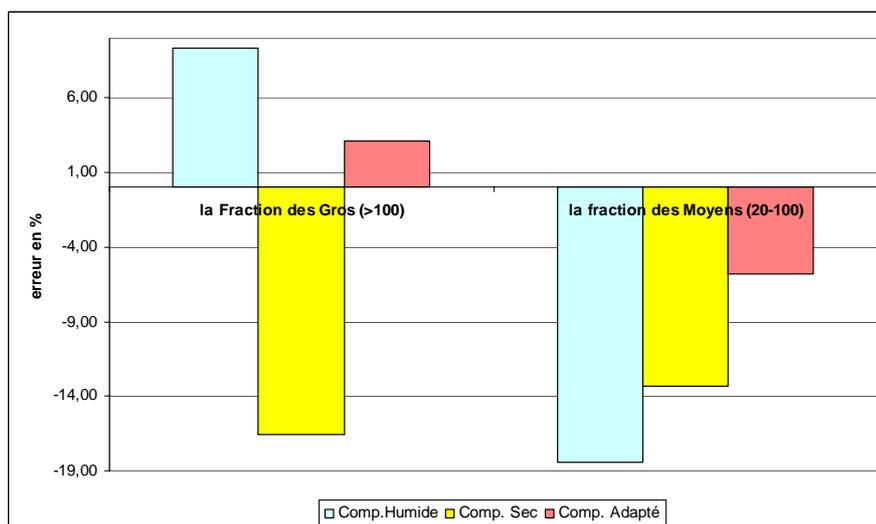
**Figure 5. Erreurs engendrées par les 3 modes de tris sur les autres catégories**

■ **Erreurs engendrées sur les compositions granulométriques :**

Les résultats des compositions granulométriques présentés dans le tableau 35 montrent des écarts entre les granulométries de l'ordure synthétique et celles obtenues avec les 3 modes de tris. Ces écarts traduisent des erreurs variant de 1,7 à 8,4 % en ce qui concerne les grosses et les moyennes fractions. Ces erreurs présentés dans la Figure 6 montrent que :

- la fraction des « Gros » est :
  - sur-estimée de 9,3% dans le cas du tri sur humide
  - sous-estimée de 16,6% dans le cas du tri sur sec
  - sous-estimée de 3,1% dans le cas du tri adapté

**Figure 6. Erreurs engendrées par les 3 modes de tris sur les fractions des « Gros » et des « Moyens »**



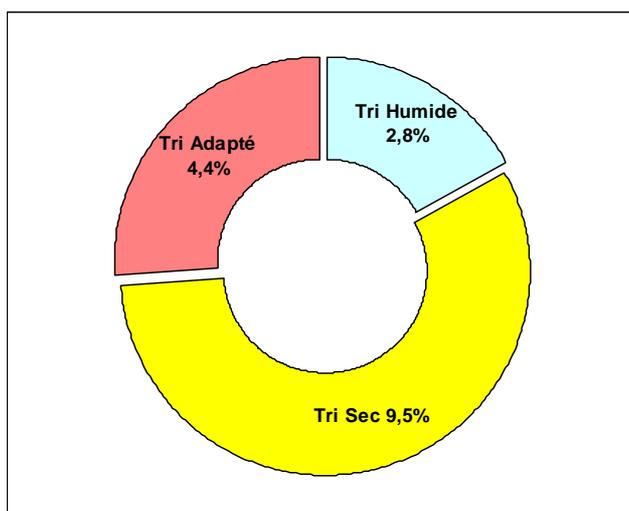
- la fraction des « Moyens » est sous-estimée :
  - o de 18,5 % dans le cas du tri sur humide
  - o de 13,4 % dans le cas du tri sur sec
  - o de 5,8 dans le cas du tri adapté

L'analyse comparative des compositions massiques et granulométriques permet de tirer les conclusions suivantes :

- Les plus grandes erreurs induites sur les putrescibles et les papiers sont celles dues au tri sur sec car, après séchage ces catégories tombent en majeure partie en poussières.
- Avec le tri sur humide, les erreurs sur les putrescibles sont moindres. Cependant, d'autres erreurs dues à l'humidité sont constatées telle que l'adhérence des putrescibles sur les autres catégories, essentiellement les textiles et les combustibles.
- Dans le cas des 2 modes de tri (sec et humide) les granulométries sont fortement modifiées : la surestimation des « Gros » dans le cas du tri sur humide étant due aux problèmes de colmatage et la sous-estimation des « Gros » et des « Moyens » dans le cas du tri sur sec étant due à la casse des putrescibles et des papiers.

Enfin, du point de vue de la cohérence du test comparatif réalisé sur l'ordure synthétique, il est nécessaire d'apporter un commentaire complémentaire concernant l'apparition de la fraction « Fine ».

**Figure 7. Les fractions « Fines » engendrées par les 3 modes de tris**



Le fractionnement des catégories fragiles telles que : les putrescibles, les papiers et les cartons fait en effet apparaître la fraction « Fine » qui est absente dans l'ordure de référence. Cette fraction que la figure 7 permet de visualiser, varie de 2,8% à 9,5% selon les modes de tri testés.

L'apparition de cette fraction fine pourrait s'expliquer selon les résultats des compositions massiques et granulométriques précédemment présentés comme suit :

- dans le cas du tri « sec », les fines proviendraient essentiellement des putrescibles et des papiers ;
- dans le cas du tri « humide », les fines proviendraient essentiellement des papiers, des cartons et d'une partie des putrescibles (celle libre) ;
- dans le cas du tri « adapté », les fines proviendraient essentiellement des cartons et des deux composantes des putrescibles (celle adhérente et celle libre).

#### **4. Bilan comparatif et avantages avérés du « tri adapté » par rapport aux modes de tris existants :**

L'analyse comparative des 3 modes de tri, qui vient d'être présentée fait clairement apparaître que le « tri adapté » est plus efficace que les tris « sur humide » et « sur sec » : *il est plus rapide, moins coûteux et plus précis, tout en répondant aux contraintes des PED.*

➤ Sur le plan du coût et de la rapidité, le tri adapté est :

- deux fois plus rapide que le tri sur humide,
- moins coûteux en matériel de séchage que le tri sec, car il nécessite 15 fois moins de capacité de séchage,
- moins coûteux en main d'œuvre que le tri sur humide car il nécessite 2 fois moins de personnel.

➤ Sur le plan de la précision, le tri adapté bénéficie des avantages des deux modes de tri (sec et humide) sans supporter leurs inconvénients :

- comme le tri sur humide, il réduit le fractionnement des putrescibles suite à leur séchage : ce qui réduit les erreurs de près de 44% (ces erreurs sont de 18% contre 62% avec le tri sur sec),
- comme le tri sur sec, il réduit le colmatage des putrescibles sur certains matériaux, en les libérant après séchage : ce qui réduit les erreurs de près de 30% (ces erreurs sont de 3% au lieu de 30% avec le tri sur humide dans le cas des textiles et des combustibles).

- Sur le plan opérationnel, le tri adapté est le seul à pouvoir répondre aux contraintes et aux spécificités des PED :
- il permet le tri immédiat des déchets suite à leur échantillonnage,
  - il n'alourdit pas le travail des trieurs sur site qui se fait dans des conditions très difficiles,
  - il permet de réduire les quantités de déchets à sécher et donc les capacités de séchage nécessaires,
  - il permet de programmer le tri des fractions ultérieurement et indépendamment des opérations lourdes d'échantillonnage sur site.

**3EME PARTIE**

**VALIDATION DE LA METHODE DE CARACTERISATION**

**CHAPITRE 1**

**CONTEXTE GENERAL**

**ET**

**VALIDATION DE LA METHODE DANS LE GRAND TUNIS**

## **I. CONTEXTE GENERAL ET BESOIN D'UNE REELLE CONNAISSANCE DES DECHETS MENAGERS EN TUNISIE**

La Tunisie, pays du Maghreb, située entre l'Algérie à l'ouest et la Libye à l'est, couvre une superficie totale de 162 555 km<sup>2</sup>. Sa population compte 9,91 Millions d'habitants avec un taux de croissance naturel de 1,14%. Environ 1/5 de la population se trouve à Tunis la capitale politique et économique, soit 2 247 800 habitants (selon le recensement national de la population en 2004).

### **1. La stratégie nationale en matière de la gestion des déchets solides :**

La stratégie nationale en matière de gestion des déchets a été développée en 1992. Elle s'appuie sur un Programme National de Gestion des Déchets Solides (PRONAGDES) ambitieux dont les principaux objectifs, en ce qui concerne les déchets ménagers et assimilés, sont :

- la réalisation de 29 décharges contrôlées (ou centres d'enfouissements techniques) dans l'ensemble des villes chefs-lieux des gouvernorats et dans les villes touristiques importantes ;
- le développement de systèmes de collectes sélectives dans les grandes villes et la réalisation de centres de tri ;
- la réalisation d'unités de compostage en tant que compléments aux décharges et potentiellement fournisseurs d'amendements organiques.

Les responsabilités en matière de gestion des déchets solides sont partagées entre le Ministère de l'Intérieur et les collectivités locales d'une part et le Ministère de l'Environnement et du Développement Durable et l'Agence Nationale de Protection de l'Environnement (ANPE) d'autre part. Les communes assurent la collecte des déchets par leurs propres moyens ou en faisant appel aux opérateurs privés et l'ANPE se charge de la mise en œuvre de la stratégie « Déchets ». Elle lance et gère les études et textes législatifs, réalise les infrastructures nécessaires et assiste les municipalités. Depuis Septembre 2005, le département « Déchets Solides » de l'ANPE a été converti en agence autonome : l'Agence Nationale de Gestion des Déchets (ANGED).

#### **1.1. Bilan des principaux projets réalisés dans le cadre du PRONAGDES et difficultés rencontrées :**

La Tunisie est le premier pays de la région MENA (sigle de la Banque Mondiale pour : Moyen-Orient et Afrique du Nord) qui a bâti une stratégie globale de gestion intégrée des déchets solides municipaux, depuis la collecte jusqu'à l'élimination finale. Tout au long des dix dernières années, un nombre important de projets a été réalisé dont la plupart sont soutenus par les bailleurs de fonds internationaux, tels que la Banque Mondiale (BM), la Banque Européenne d'Investissements (BEI), la coopération allemande (KfW), et la coopération Luxembourgeoise.

De même, un grand nombre d'études a été réalisé par des bureaux d'études nationaux et internationaux avec l'appui d'assistances techniques d'institutions étrangères telles que l'USAID et la GTZ. Le bilan de ces projets est présenté dans le tableau 36.

Que ce soit dans le domaine de la décharge, des collectes sélectives ou du compostage, la mise en œuvre des projets réalisés dans le cadre du PRONAGDES, s'est heurtée à de grandes difficultés qui se sont traduites dans la plupart des cas :

- soit par des échecs et des abandons, tels que :
  - o les collectes sélectives des déchets ménagers en porte-à-porte à Tunis et à Sousse,
  - o les collectes sélectives des emballages en apport volontaire.
- soit par de grands problèmes de fonctionnement et des coûts très élevés, tels que :
  - o la décharge contrôlée du Grand Tunis à Borj Chékir,
  - o la station pilote de compostage de Béjà,
  - o les collectes sélectives des plastiques en apport rémunéré.

Les difficultés rencontrées par ces systèmes de traitement sont largement décrites et analysées dans le Chapitre.1 de la 1<sup>ère</sup> partie de ce document.

### **1.2. Absence de démarche scientifique opérationnelle dans la mise en place des projets :**

L'analyse de la situation des déchets dans les PED en général, et en Tunisie en particulier (cf. 1<sup>ère</sup> Partie), fait apparaître dans les projets « Déchets », l'inadaptation des technologies et l'absence d'analyses spécifiques aux conditions locales. Ces défaillances étant elles-mêmes explicables par :

- l'insuffisance des analyses nécessaires pour connaître de manière détaillée la nature des déchets et les spécificités locales,
- l'absence des tests paramétriques préalables pour caractériser les process lors des procédures de Schémas-Directeurs ou d'études de gestion des déchets,
- l'absence de programmes de Recherche-Développement et finalisée dans le domaine des déchets, qui est liée à l'absence de budgets de recherche en ce domaine.

Dans le cas particulier de la Tunisie, les projets réalisés dans le cadre du PRONAGDES (Tab.36) ont été implantés selon des modèles européens :

- sans aucun développement technologique, visant la connaissance et la maîtrise des bases de fonctionnement des divers systèmes de traitement,
- ni aucune connaissance précise des caractéristiques physiques et chimiques des déchets tunisiens.

**Tableau 36. Bilan des principaux projets de gestion des déchets municipaux réalisés dans le cadre du PRONAGDES**

Systèmes de traitement	Localisation	Bailleur de Fonds	Investissements	Année réalisation	Capacité	Etat actuel
Les Décharges Contrôlées	<u>Décharge du Grand Tunis</u> - réalisation - extension	BM	- 10 MDT - 11 MDT	1999 2006	700.000 t/an	Problèmes de fonctionnement : - 250.000 m <sup>3</sup> de lixiviats stockés sans traitement - durée d'exploitation raccourcie de 5 ans - dégazage difficile - difficultés d'exploitation : compactage inopérant, pannes fréquentes du matériel, etc.
	<u>3 Décharges</u> dans les gouvernorats de : - Sousse - Bizerte - Kairouan	KfW	13,1 M€	2005	170.000 t/an - 82.000 t/an 47.000 t/an	Non encore opérationnelles
	<u>6 Décharges</u> dans les gouvernorats de : - Monastir - Sfax - Nabeul - Gabès - Djerba - Medenine	BEI	47,2 M€	2005	138.000 t/an - 134.000 t/an 109.000 t/an - 48.000 t/an 45.000 t/an - 35.000 t/an	Non encore opérationnelles
Les Systèmes de Collectes Sélectives	Système de tri sélectif au niveau des ménages : - à Tunis (Cité El Khadra) - dans le Grand Sousse	Lux-Development INC	1 MDT 4 MDT	1994 1998	20.000 habitants 200.000 habitants	Echec et Abandon Abandonné avant sa mise en route
	Centres de tri : - à Tunis - à Sousse	Lux-Development INC	1,1 MDT 2MDT	1994 1997	4t/j 40t/j	Fonctionnent en-deçà de leurs capacités
	Centre de transfert à Sousse	INC	1,8MDT	1999	140 t/j	Arrêté
	Systèmes de collecte des emballages en apports volontaires – 470 points de collectes	INC	INC	1999	-	Echec et Abandon
	Systèmes de collecte des plastiques en apports rémunérés	INC	INC	2001	-	Non rentables
	Le Compostage	<u>à Béja :</u> Unité pilote de compostage sur la base d'un procédé « dit adapté »	KfW	1 MDT	1996	1000 t/an

MDT (Million de Dinar Tunisien) - M€ (Million d'euros) – 1DT= 0,61881.€

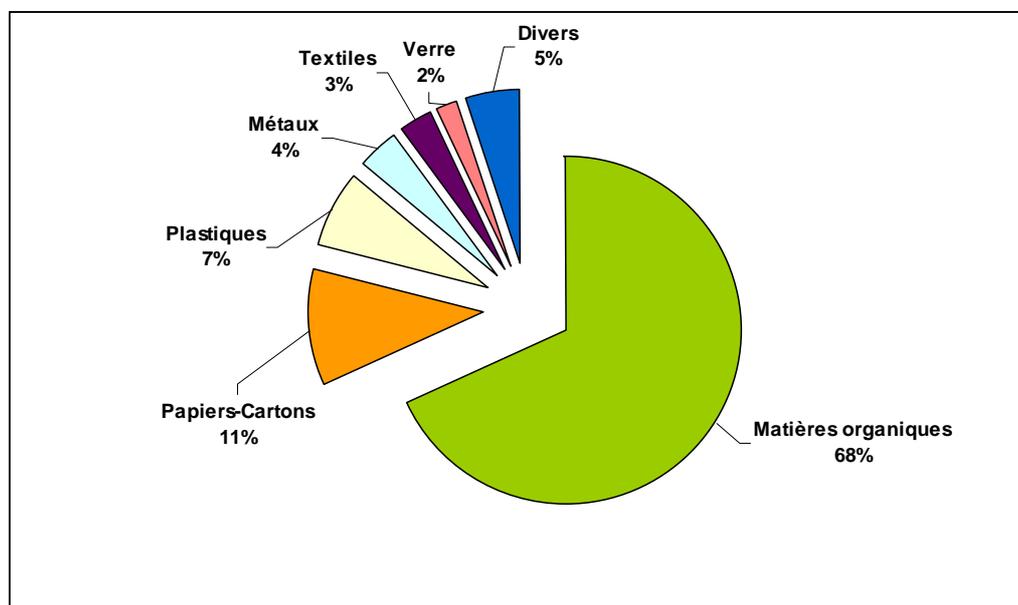
INC : Information Non Communiquée

Ce transfert de technologies sophistiquées sans prise en compte des compositions des déchets très différentes, ainsi que des contraintes climatiques et économiques locales, est sans aucun doute la source des échecs et des grandes difficultés constatés.

## 2. La composition des déchets ménagers et assimilés en Tunisie :

Dans le cadre du PRONAGDES, la mise en place des projets concernant les déchets ménagers et assimilés repose sur une composition adoptée dès l'année 1992, de manière unique pour toute la Tunisie. Cette composition [45] est présentée dans la figure 8.

**Figure 8. Composition officielle des ordures ménagères en Tunisie [45]**



### 2.1. Analyse des fondements de la composition officielle :

La composition officielle des déchets ménagers et assimilés en Tunisie est en réalité le résultat de la moyenne de 22 analyses réalisées sur la période 1972-1992 par divers organismes tunisiens et étrangers [61] :

- 16 analyses à Tunis selon des études réalisées entre 1972 et 1991 ;
- 3 analyses à Djerba selon une étude réalisée en 1992 et 2 autres études non datées ;
- 2 analyses à Jendouba selon des études réalisées en 1992 ;
- 1 analyse à Béja selon une étude réalisée en 1984.

Ces résultats ont été obtenus à l'aide soit de formules mathématiques, soit d'un quelconque échantillonnage qui ne repose pas sur un fondement statistique précis et justifié. Ainsi, la principale procédure d'échantillonnage adoptée, qui est recommandée par la coopération allemande –GTZ- [61] :

- consiste à une prise d'échantillon correspondant au contenu d'un seau de 12 litres,
- repose sur un matériel de tri constitué d'une simple bâche en plastique.

Par ailleurs :

- les éléments fins ne sont ni triés ni analysés : on suppose qu'ils sont composés de 50% de matières organiques (qu'elle que soit la saison et le lieu d'échantillonnage),
- les paramètres physico-chimiques (humidité, carbone, métaux lourds, etc.) ne sont pas analysés.

## **2.2. Besoin d'une représentation réelle des déchets ménagers :**

L'analyse des fondements de la composition des déchets ménagers et assimilés en Tunisie, prise pour référence officielle, montre que cette composition ne peut donner une représentation réelle des déchets, étant donné :

- le manque de rigueur des méthodes utilisées (au niveau de l'échantillonnage, du matériel utilisé et des méthode de tri),
- la non prise en compte des paramètres de variation au sein d'une même ville (entre secteurs) et selon les saisons.

Par ailleurs, une composition unique pour toute la Tunisie ne peut être prise en référence, car la composition des déchets peut présenter de grandes variations d'une ville à une autre, selon les divers contextes climatiques (le nord humide et froid, le sud sec et chaud) et socio-économiques (niveaux de vie et modes de consommations différents).

Cette mauvaise prise en compte de la nature des déchets et de leurs variations spatio-temporelles, apparaît à la source des nombreux échecs et difficultés résumés dans le tableau.36, en particulier au niveau :

- du dimensionnement et du choix des équipements de collecte (en mélange ou sélective),
- du dimensionnement et de la gestion des systèmes de traitement (décharges, compostage),
- de l'appréciation du réel intérêt des collectes sélectives et du recyclage.

La nécessité de caractériser précisément les déchets est essentielle. Elle doit être basée sur des mesures et analyses réelles d'échantillons représentatifs, selon des protocoles précis et de plus adaptés à la nature des déchets. C'est en référence à cette situation et selon ces critères, que la mise au point d'une méthode de caractérisation des déchets adaptée s'imposait. Cette méthode qui est décrite dans la 2<sup>ème</sup> partie de ce document, a été validée dans le cas du Grand Tunis. Elle repose sur :

- des campagnes de caractérisation saisonnières, afin de connaître les caractéristiques des déchets selon les différentes périodes de l'année,

- une sectorisation en zones présentant des caractéristiques spatiales et socio-économiques, homogènes afin de réduire l'extrême variabilité dans la composition des déchets,
- des protocoles d'échantillonnage et de tri rigoureux et basés sur les caractéristiques propres des déchets,
- des analyses physico-chimiques réalisées sur les déchets triés afin d'obtenir les indications nécessaires aux choix des traitements.

## II. IDENTIFICATION DES CARACTERISTIQUES DU GRAND TUNIS

Dans le but de connaître et d'étudier les productions des déchets selon tous leurs paramètres de variations, les caractéristiques du Grand Tunis ont du être identifiées, pour l'année de référence 2002, à partir :

- des données urbaines, démographiques et socio-économiques, elles-mêmes obtenues à partir de l'identification : des communes et des arrondissements, de la population sédentaire, des niveaux économiques des ménages et de l'activité économique ;
- de l'évaluation des productions des déchets qui a été obtenue à partir des recensements annuels et mensuels et des calculs des ratios journaliers par habitant.

### 1. Caractéristiques urbaines, démographiques et socio-économiques :

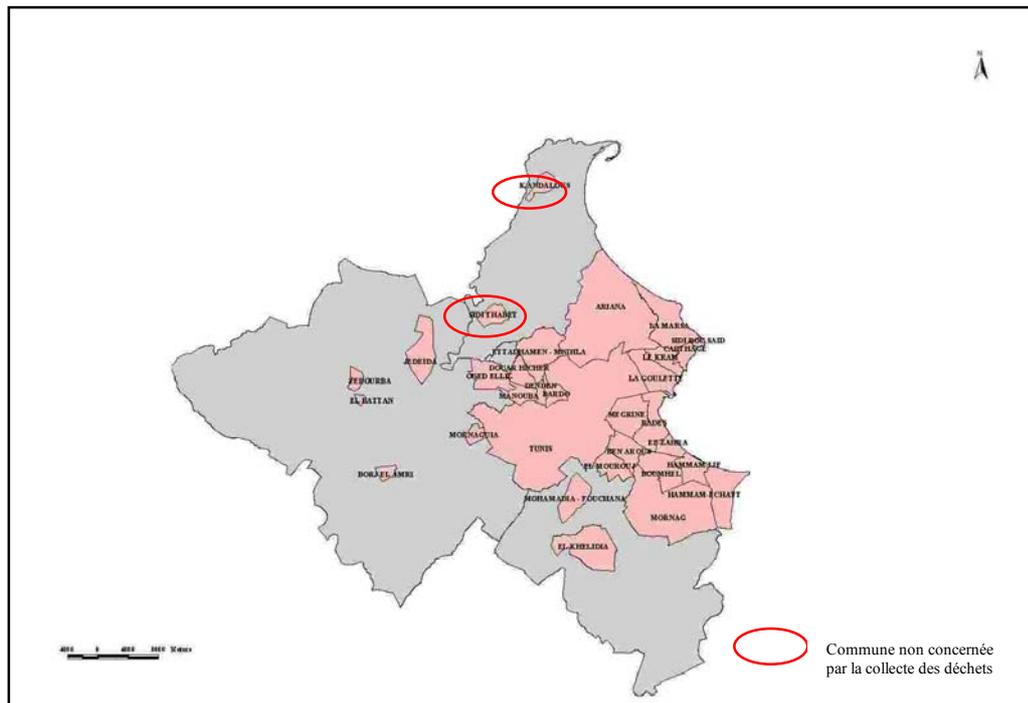
#### 1.1. Identification des communes et des arrondissements et évaluation de leurs populations sédentaires :

Le Grand Tunis d'une superficie communale de 781,51 km<sup>2</sup>, est composé des 4 gouvernorats suivants : le gouvernorat de Tunis, le gouvernorat d'Ariana, le gouvernorat de Manouba et le gouvernorat de Ben Arous, composés eux-mêmes de 31 communes présentées sur la carte de la figure 9. La population communale est estimée en 2002 à 1 968 116 habitants dont près de la moitié réside dans le gouvernorat de Tunis (cf.Tab.37).

**Tableau 37. Caractéristiques démographiques des 4 gouvernorats du Grand Tunis**

	Gvt Tunis	Gvt Ariana	Gvt Manouba	Gvt Ben Arous	Grand Tunis
<b>Population estimée en 2002 (habitants)</b>	940 796	354 068	239 854	423 398	1 968 116
<b>Superficies communales (km<sup>2</sup>)</b>	288,48	159,86	72,61	260,56	781,51

La population concernée par la collecte des déchets est estimée à 1 954 116 habitants (soit 99% de la population totale), correspondant à 29 communes. Les 2 communes non concernées par la collecte des déchets sont indiquées (par un cercle rouge) dans la figure 9.

**Figure 9. Les Communes du Grand Tunis**

Le regroupement de ces 29 communes selon leur taille (cf.Tab.38), a permis d'identifier les 4 catégories de communes suivantes:

- les petites communes, dont la population est comprise entre 5 000 et 20 000 habitants,
- les moyennes communes, dont la population est comprise entre 20 000 et 50 000 habitants,
- les grandes communes, dont la population est comprise entre 50 000 à 100 000 habitants,
- les très grandes communes, dont la population dépasse les 100 000 habitants. Il s'agit des 3 communes de Tunis, Ariana et Ettadhamen-Mnihla.

**Tableau 38. Caractéristiques démographiques des 29 communes concernées par la collecte des déchets**

Taille des communes (habitants)	5 000 à 20 000	20 000 à 50 000	50 000 à 100 000	> 100 000	Total
Nombre de communes	6	13	7	3	29
Nombre d'habitants	52 774	379 993	490 031	1 031 318	1 954 116
Population représentée	3%	19%	25%	53%	100%

Etant donné l'importance de ces 3 dernières communes, leurs arrondissements (au nombre de 25) ont été également identifiés et classés dans le tableau 39 selon leur taille.

**Tableau 39. Caractéristiques démographiques des 25 arrondissements des 3 communes de Tunis, Ariana et Ettadhamen-Mnihla**

Taille des arrondissements (habitants)	5 000 à 20 000	20 000 à 50 000	50 000 à 100 000	Total
Nombre d'arrondissements	1	19	5	25
Nombre d'habitants	15 841	643 240	372 237	1 031 318
Population représentée	1%	33%	19%	53%

Cette classification a permis de distinguer, pour tout le Grand Tunis, 51 communes et arrondissements qui sont décrits dans le tableau 40.

**Tableau 40. Caractéristiques démographiques des 51 communes et arrondissements concernés par la collecte des déchets dans le Grand Tunis**

Taille des Communes et Arrondissements (habitants)	5 000 à 20 000	20 000 à 50 000	50 000 à 100 000	Total
Nombre de communes et d'arrondissements	7	32	12	51
Nombre d'habitants	68 615	1 023 233	862 268	1 954 116
population représentée	4%	52%	44%	100%

### 1.2. Identification des caractéristiques socio-économiques :

Les données socio-économiques évaluées à partir des estimations de l'AUGT et des enquêtes menées sur le terrain (cf. Chap1- 2<sup>ème</sup> Partie) montrent que :

- près des 3/4 des communes et des arrondissements sont à caractère urbain résidentiel, leur population est estimée à 80% de la population totale ;
- moins de 10% des communes et des arrondissements sont à caractère urbain commercial, leur population est estimée à 9% de la population totale ;
- près de 18% des communes sont à caractère rural, leur population représente 11% de la population totale.

Les caractéristiques socio-économiques des communes et des principaux arrondissements du Grand Tunis sont présentées dans les tableaux 41 et 42.

**Tableau 41. Caractéristiques socio-économiques des communes et des principaux arrondissements (1)**

Caractère socio-économique	Nombre	Population représentée
Urbain résidentiel	37	80%
Urbain commercial	5	9%
Rural	9	11%
	51	100%

**Tableau 42. Caractéristiques socio-économiques des communes et des principaux arrondissements (2)**

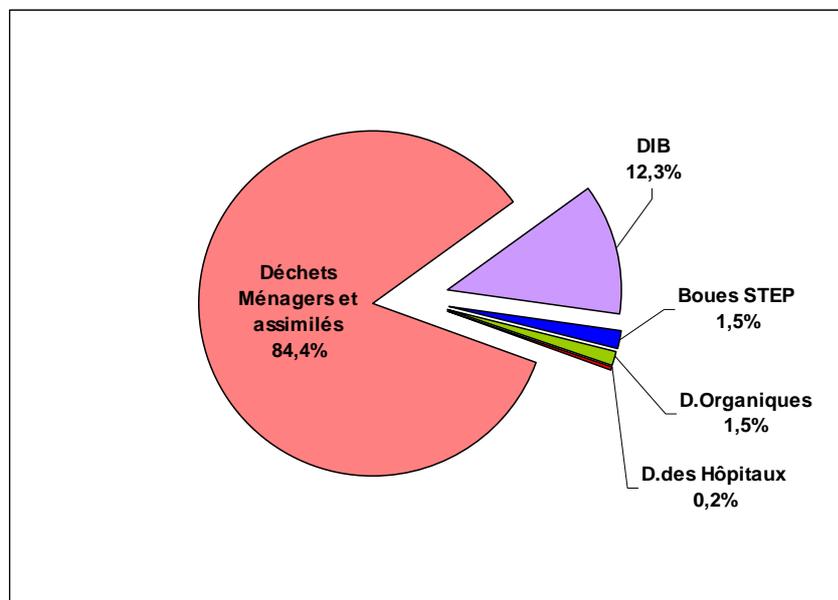
Communes et Arrondissements	Population (habitants)	Caractéristiques socio-économiques	Niveau de vie
Medina	27190	commercial	faible
Bab Bhar	45630	commercial	moyen
Sidi El Béchir	30350	commercial	faible
Bab Souika	31250	commercial	faible
Omrane	37050	résidentiel	moyen
Omrane Supérieur	60780	résidentiel	moyen
Menzah	43130	résidentiel	élevé
El Khadra	35690	résidentiel	moyen
Ettahrir	23030	résidentiel	moyen
Hraïria	90090	résidentiel	faible
Kabaria	77880	résidentiel	faible
Ouardia	30400	résidentiel	faible
Sidi Hassine	56130	résidentiel	faible
Ezzouhour	42350	résidentiel	faible
Séjoui	35070	résidentiel	faible
Dj Jelloud	25230	résidentiel	faible
Bardo	74808	résidentiel	moyen
Goulette	27765	résidentiel	moyen
Kram	54482	résidentiel	moyen
la Marsa	69260	résidentiel	élevé
Carthage	17801	résidentiel	élevé
Sidi Bou Saïd	5430	résidentiel	élevé
Ariana ville	38480	commercial	faible
la Soukra	34950	résidentiel	élevé
Raoued	29890	résidentiel	faible
el Manazah	26188	résidentiel	élevé
Ariana Supérieur	23487	résidentiel	moyen
Ghazala	15841	résidentiel	moyen
Borlj Louzir	48520	résidentiel	faible
Ettadhamen	87357	résidentiel	faible
Mnihla	35355	résidentiel	faible
Manouba	23012	résidentiel	moyen
Den Den	24179	résidentiel	faible
Douar Hicher	76663	résidentiel	faible
Oued Ellil	44434	rural	faible
Mornaguia	12726	rural	faible
Borj el Amri	5410	rural	faible
Jdeïda	24240	rural	faible
Tebourba	23720	rural	faible
El Battan	5470	rural	faible
Ben Arous	76012	résidentiel	moyen
Rades	40737	résidentiel	moyen
Megrine	28538	résidentiel	moyen
Hammam-Lif	42540	résidentiel	moyen
Hammam-Chatt	20958	résidentiel	moyen
Ezzahra	32498	résidentiel	moyen
Boumhel-Bassatine	23226	résidentiel	faible
Mornag	24146	rural	faible
Khélidia	5937	rural	faible
Mourouj	76371	résidentiel	moyen
M'hamedia-Fouchana	62435	rural	faible
<b>51</b>	<b>1954116</b>		

## 2. Evaluation de la production de déchets ménagers et assimilés :

La décharge contrôlée des déchets « ménagers et assimilés » de Borj Chékir reçoit tous les déchets générés par le Grand Tunis, quelque soit leur provenance : les déchets ménagers et assimilés, les déchets des marchés, les déchets verts, les boues d'assainissement, et même les déchets d'activités de soins et les déchets industriels. Selon les relevés d'admission des déchets à la décharge, les quantités déversées durant l'année 2002, s'élèvent à 604 295 tonnes qui se répartissent ainsi (cf.Fig.10) :

- près de 85% de déchets dits « ménagers et assimilés » ;
- 12% de Déchets Industriels Banals (DIB) générés par les industries (ateliers d'usinage, garages de réparation, usines de fabrication, etc.) ;
- 1,5% de déchets organiques : il s'agit des déchets des abattoirs, des déchets verts (provenant des espaces verts) et des déchets du marché de gros ;
- 1,5% de boues d'assainissement : il s'agit en fait d'une partie (environ 1/6) des boues produites par les 3 stations d'épuration du Grand Tunis ;
- 0,2% des déchets d'hôpitaux : il s'agit des déchets générés par les 4 grands hôpitaux de la ville de Tunis.

**Figure 10.** Les divers flux de déchets déversés dans la décharge contrôlée du Grand Tunis (selon les relevés d'admission à la Décharge)



En réalité, les déchets dits « ménagers et assimilés » ne sont pas seulement constitués par ces flux. Il s'agit en fait de plusieurs catégories de flux collectés en mélange :

- les déchets ménagers : provenant des ménages,
- les déchets assimilés : provenant des activités économiques (commerces, administrations, artisans, ...),

- les déchets des marchés municipaux,
- les déchets d'activités de soins : provenant des hôpitaux (autres que les 4 grands hôpitaux de la ville de Tunis), des cliniques, des laboratoires d'analyses et des pharmacies.
- les déchets industriels banals.

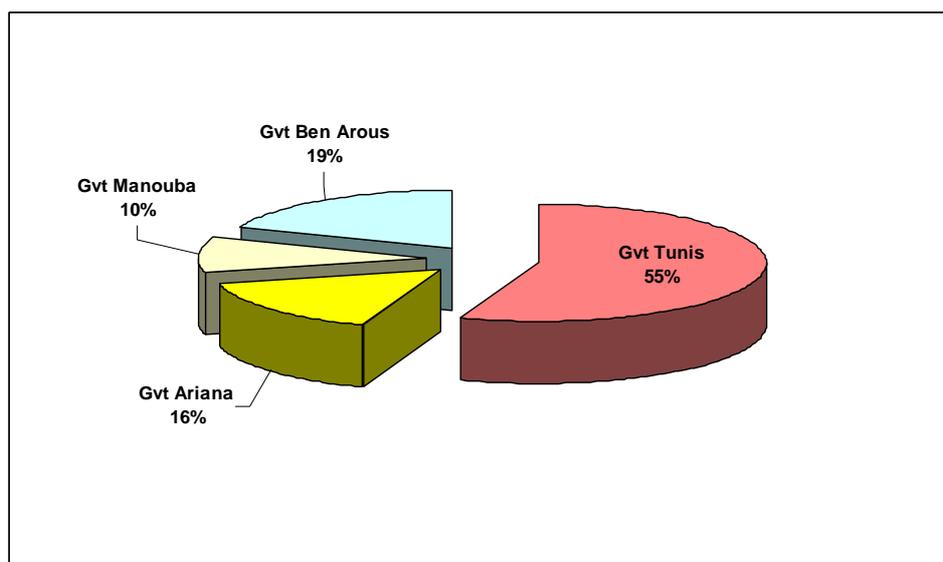
### 2.1. Recensement des productions annuelles et mensuelles :

Selon les relevés d'admission des déchets à la décharge, les quantités de déchets dits « ménagers et assimilés » générés par le Grand Tunis en 2002, s'élèvent ainsi à 510 286 tonnes, dont plus de la moitié proviendrait du gouvernorat de Tunis. Les tonnages annuels générés par les 4 gouvernorats sont présentés dans le tableau.43 et la figure.11.

**Tableau 43. Déchets dits « ménagers et assimilés » (en tonnes) générés en 2002 dans les 4 Gouvernorats du Grand Tunis**

	Gvt Tunis	Gvt Ariana	Gvt Manouba	Gvt Ben Arous	Grand Tunis
<b>Population (habitants)</b>	940 796	340 068	239 854	423 398	1 954 116
<b>Production de déchets (t/an)</b>	283 402	79 967	50 492	96 426	510 286
<b>Ratio (kg/hab.j)</b>	0,825	0,644	0,577	0,624	0,710

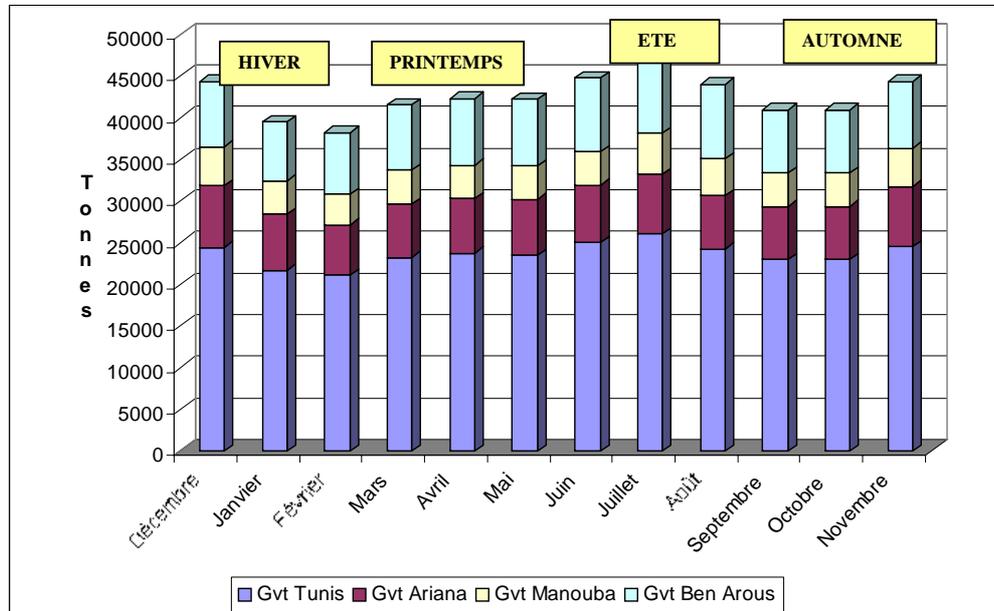
**Figure 11. Production annuelle des déchets dits « ménagers et assimilés » dans les 4 Gouvernorats du Grand Tunis**



L'étude de la variation mensuelle des déchets dits « ménagers et assimilés » dans les 4 gouvernorats du Grand Tunis montre une production mensuelle moyenne de 42 524 tonnes avec:

- un maximum de 47 424 tonnes enregistré au mois de juillet,
- un minimum de 38 224 tonnes enregistré au mois de février.

**Figure 12. Les productions mensuelles des déchets dits « ménagers et assimilés » dans les 4 gouvernorats du Grand Tunis**



Par ailleurs, les pics enregistrés en novembre-décembre (44 290 et 44 347 tonnes) correspondent aux productions du mois de Ramadan et de la fête de l'Aïd.

## 2.2. Evaluation des ratios journaliers par habitant :

Les productions de déchets journalières et par habitant n'ont pas pu être évaluées dans tous les arrondissements du Grand Tunis pour différentes raisons (présentées dans la 2<sup>ème</sup> partie, Chapitre 1) :

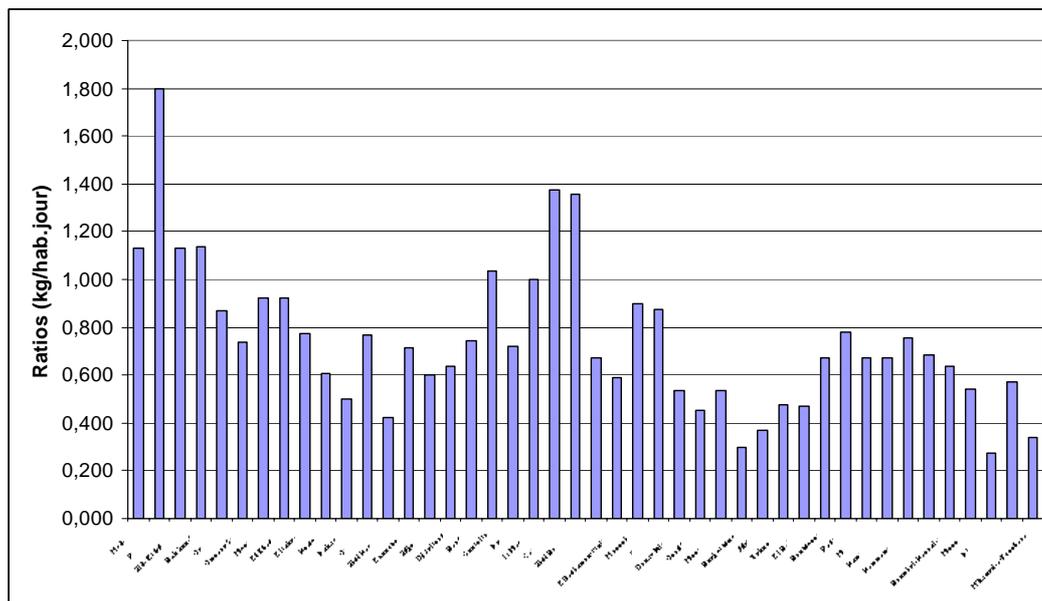
- d'une part, les relevés d'admissions des déchets à la décharge ne permettent pas d'identifier la provenance des déchets par arrondissement,
- d'autre part, seule la ville de Tunis dispose de registres spécifiques aux tonnages produits par ses arrondissements.

Par conséquent, les ratios de production des déchets n'ont pu être calculés que dans 28 communes et 16 arrondissements (ceux de la commune de Tunis), soit au total 44 communes et arrondissements.

L'étude de ces ratios, que visualise la figure.13, montre un ratio moyen de 0,743 kg par habitant et par jour, mais avec de très grandes disparités entre les communes et les arrondissements allant:

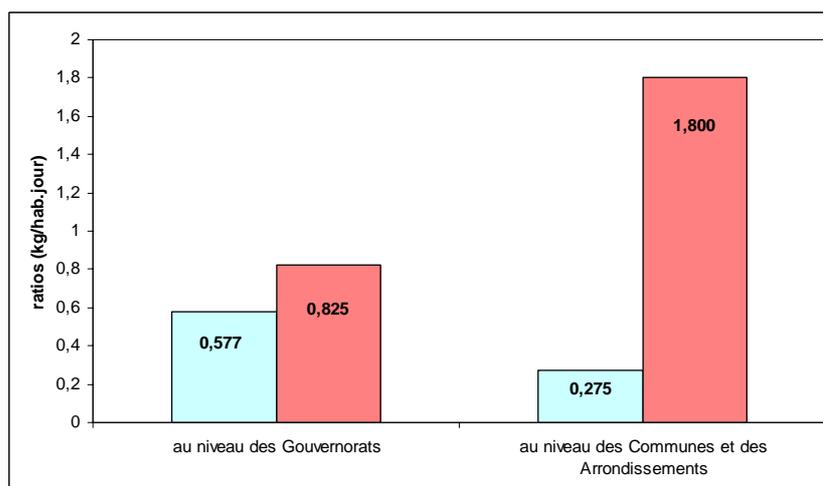
- de 0,275 kg/hab.jour, ratio minimum enregistré dans la commune de Khélidia,
- à 1,800 kg/hab.jour, ratio maximum enregistré dans l'arrondissement de Bab Bhar.

**Figure 13.** Les ratios de production des déchets dits « ménagers et assimilés » (en Kg/hab.jour) dans 44 communes et arrondissements du Grand Tunis



Ces ratios de 0,275 à 1,800 reflètent l'importante hétérogénéité des niveaux de revenus des populations et des municipalités, à l'inverse des ratios moyens calculés dans les Gouvernorats (cf.Tab.43) qui ne varient que de 0,577 à 0,825, couvrant ainsi ces grandes disparités. Ces disparités entre communes et gouvernorats sont présentées dans la figure 14.

**Figure 14.** Disparités dans la variation des ratios de production des déchets (en Kg/hab.jour) entre les Communes et les Gouvernorats



### 2.3. Détermination du caractère saisonnier des communes :

Certaines communes situées en bord de mer connaissent durant l'année une activité saisonnière moyenne à forte. Cette activité se traduit par une modification importante de la quantité et de la

nature des déchets qui peut être appréciée par le biais d'un indice de saisonnalité, calculé à l'aide des chiffres de production mensuelle des déchets [1].

**Tableau 44. Identification des communes à caractère saisonnier**

Commune	Mois à activité forte non ponctuelle	Production de déchets (Kg/hab.jour)	
		Durant les mois à activité forte	Le reste de l'année
La Goulette	Juillet - Août	1,320	0,999
Sidi Bou Saïd	Juillet	1,729	1,341
Hammam Chatt	Juillet - Août	1,000	0,717

Le calcul de cet indice de saisonnalité dans les 44 communes et arrondissements du Grand Tunis, a permis d'identifier les 3 communes de la Goulette, de Sidi Bou Saïd et de Hammam-Chatt en tant que communes à caractère saisonnier. L'indice de saisonnalité élevé ( $> 1,5$ ) obtenu dans ces 3 communes, traduit une augmentation de 30 à 40% de la quantité des déchets durant les mois de Juillet-Août (cf.Tab.44).

### III. LA SECTORISATION DU GRAND TUNIS

La sectorisation du Grand Tunis a été réalisée sur la base des résultats des enquêtes préalables : urbaines, démographiques, socio-économiques et de production des déchets.

#### 1. Les Critères de Sectorisation :

La sectorisation du Grand Tunis vise son découpage en secteurs homogènes dont la composition des déchets est susceptible d'être similaire. Pour cela, le découpage doit reposer sur des critères permettant de rassembler les producteurs de déchets de même typologie. L'identification des caractéristiques socio-économiques du Grand Tunis (cf.Tab.42) ainsi que les caractères saisonniers de ses communes (cf.Tab.44) permettent d'identifier les 4 critères de sectorisation suivants présentés dans le tableau 45 :

- la nature du milieu : urbain ou rural ;
- le caractère socio-économique et saisonnier du milieu urbain : résidentiel, commercial ou saisonnier ;
- le niveau de vie : faible, moyen ou élevé.

#### 2. Les résultats de la Sectorisation :

Le regroupement des communes et des arrondissements sur la base des critères identifiés qui sont présentés dans les tableaux 46 et 47 permet de distinguer :

**Tableau 45. Les critères de sectorisation**

Nature du milieu	Caractère socio-économique	Niveau de vie
Urbain	Résidentiel	Faible
		Moyen
		Elevé
	Commercial	Faible
		Moyen
		Elevé
	Saisonnier	Faible
		Moyen
		Elevé
Rural		Faible
		Moyen
		Elevé

- 37 communes et arrondissements urbains à caractère résidentiel : ils représentent 81% de la population totale et produisent 79% des déchets ;
- 9 communes rurales : elles représentent 11% de la population totale et produisent 6% des déchets ;
- 5 arrondissements à caractère commercial : ils représentent 9% de la population totale et produisent 15% des déchets.

Par ailleurs, les communes et arrondissements urbains à caractère résidentiel comportent 3 communes à caractère saisonnier représentant 2,7% de la population totale. Ces communes produisent durant les mois de juillet-août 0,8% de la production totale des déchets contre 2,9% le reste de l'année.

**Tableau 46. Regroupement des communes et des arrondissements selon les critères de sectorisation**

	Milieu Rural	Milieu urbain à caractère Résidentiel	Milieu urbain à caractère Commercial
Niveau de vie Elevé	-	6 (dont 1 à caractère saisonnier)	-
Niveau de vie Moyen	-	17 (dont 2 à caractère saisonnier)	1
Niveau de vie Faible	9	14	4
Total	9	37 (dont 3 à caractère saisonnier)	5

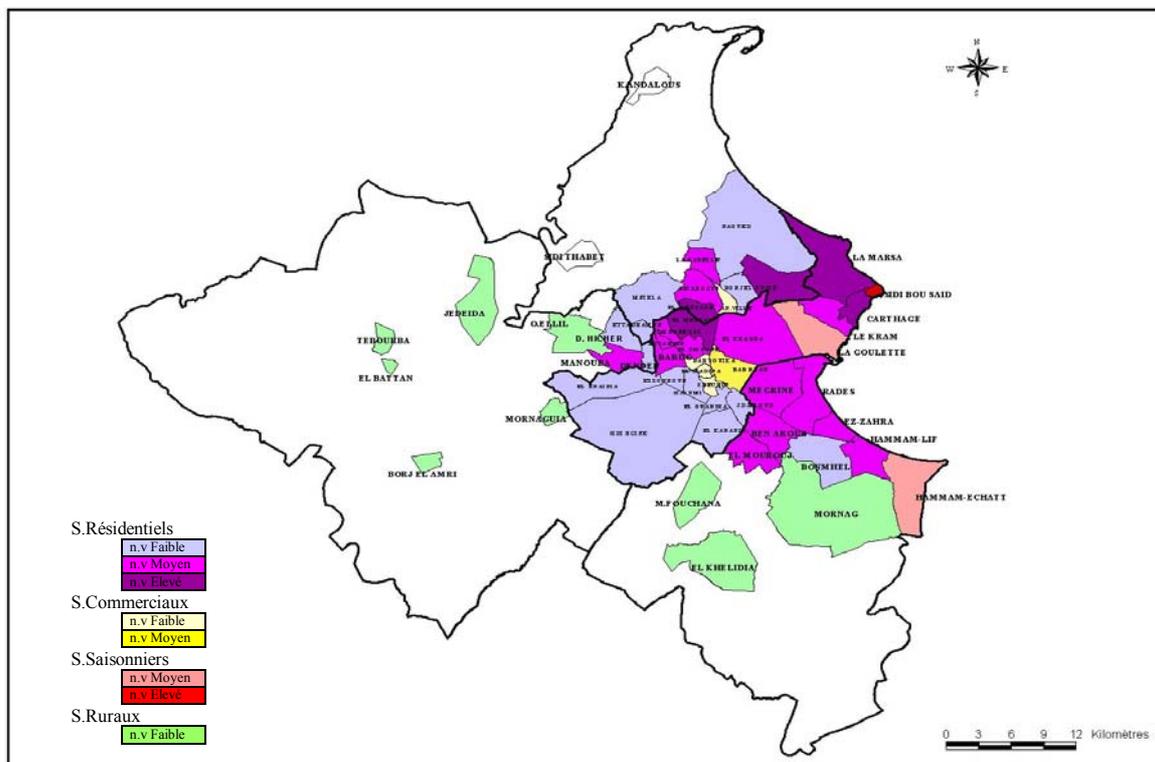
Le Grand Tunis a pu être ainsi découpé en 8 secteurs homogènes : 3 secteurs résidentiels (à revenus faibles, moyens et élevés), 2 secteurs à caractère commercial (à revenus faibles et moyens), 2 secteurs à caractère saisonnier (à revenus moyens et élevés) et 1 secteur à caractère rural. Ce

découpage est visualisé dans la figure 15 et les caractéristiques des 8 secteurs sont présentées dans les tableaux 48 et 49.

**Tableau 47. Caractéristiques des secteurs identifiés**

Milieu	Nbre de communes/ arrondissements	Population représentée (%)	Déchets produits (%)
Urbain à caractère Résidentiel (dont à car.saisonnier)	37 (3)	80,5 (2,7)	78,6 (0,8)
Urbain à caractère Commercial	5	8,8	15,4
Rural	9	10,7	6,1
Totaux	51	100	100

**Figure 15. Le découpage du Grand Tunis en 8 secteurs homogènes**



Les ratios de production des déchets dans les secteurs identifiés varient dans des proportions très importantes avec une graduation, allant de 0,275 kg/hab.j à 1,800 kg/hab.j selon le niveau de vie des populations et les activités socio-économiques de la commune. Ainsi :

- le ratio le plus faible (0,275 kg/hab.j) est constaté dans les secteurs à caractère rural ;
- dans les secteurs résidentiels, les productions de déchets varient en moyenne de 0,400 kg/hab.j à 1,400 kg/hab.j, reflétant ainsi des modes et niveaux de vie extrêmement variables (en moyenne 0,600 kg pour les revenus faibles, 0,750 kg pour les revenus moyens et 1,100 kg pour les revenus élevés) ;

- les activités économiques et saisonnières se traduisent par une augmentation de la production des déchets, pouvant atteindre : 1,800kg/hab.j dans les secteurs à caractère commercial et 1,730kg/hab.j dans les secteurs à caractère saisonnier (durant la saison estivale).

Ces grandes disparités dans les ratios moyens, qui sont présentées dans la figure 16, indiquent de manière flagrante que l'on ne peut pas se contenter d'une moyenne générale de production des déchets de 0,700 kg/hab.j (cf.Tab.43), qui ne renseignera pas sur la réalité de tels écarts dans une agglomération.

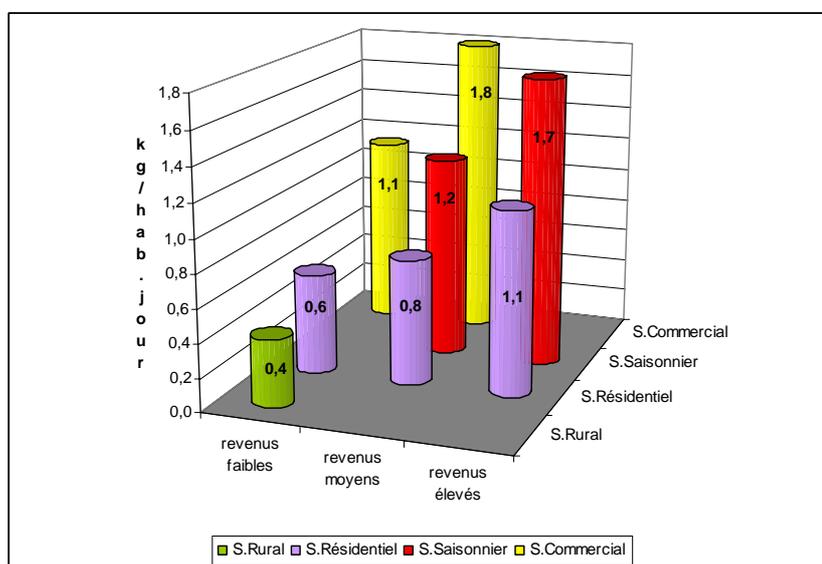
**Tableau 48. Caractéristiques des 6 secteurs homogènes (hors saison estivale)**

Type de secteur		Nbre communes & arrondissements	Population représentée (%)	Déchets produits (%)	Ratios (Kg/hab.j)
Résidentiel	n.v Faible	14	35	28	0,420 – 0,760
	n.v Moyen	17	36	35	0,570 – 1,000
	n.v Elevé	6	10	15	0,920 – 1,380
Commercial	n.v Faible	4	7	10	1,000 – 1,140
	n.v Moyen	1	2	6	1,800
Rural	n.v Faible	9	11	6	0,275-0,540

**Tableau 49. Caractéristiques des 2 secteurs à caractère saisonnier (pendant la saison estivale)**

Type de secteur		Nbre communes & arrondissements	Population représentée (%)	Déchets produits (%)	Ratios (Kg/hab.j)
Résidentiel Saisonnier	n.v Moyen	2	2,4	0,7	1,000 – 1,300
	n.v Elevé	1	0,3	0,1	1,730

**Figure 16. Productions moyennes par habitant et par jour résultant de la sectorisation du Grand Tunis**



#### IV. LE CHOIX DES ZONES D'ÉCHANTILLONNAGE

Lors de la réalisation des campagnes de caractérisation, les échantillons devront être prélevés à partir du contenu de bennes choisies au hasard dans des communes et des arrondissements identifiés en tant que zones d'échantillonnage. Ces zones d'échantillonnage doivent être choisies par tirage au sort dans chaque secteur identifié à partir du découpage du Grand Tunis précédemment décrit. Cependant, dans la pratique, certaines contraintes liées au mode d'acheminement des déchets vers la décharge et à la disponibilité de données sur les tonnages et la nature des déchets transportés, vont limiter ce choix.

##### 1. Choix des zones d'échantillonnage selon le mode d'acheminement des déchets vers la décharge :

Les déchets générés par le Grand Tunis sont acheminés vers la Décharge contrôlée de Borj Chékir soit directement, soit après leur transit par les 2 centres de transfert de Jdeïda et de Ben Arous. L'identification des communes et des arrondissements selon le mode d'acheminement de leurs déchets vers la décharge, présentée dans le tableau 50, montre que :

- 11 communes et 25 arrondissements acheminent directement leurs déchets à la décharge,
- 10 communes transitent par le centre de transfert de Ben Arous,
- 4 communes et 1 arrondissement transitent par le centre de transfert de Jdeïda.

**Tableau 50. Identifications des communes (C) et des arrondissements (A) selon le mode d'acheminement de leurs déchets vers la décharge**

Type de secteur		Directement en décharge	Après transit au CT de Ben Arous	Après transit au CT Jdeïda
Résidentiel	n.v Faible	12 (1C et 11A)	1C	1A
	n.v Moyen	10 (4C et 6A, dont 1C à car.saisonnier)	7 C (dont 1C à car.saisonnier)	0
	n.v Elevé	6 (3C et 3A, dont 1C à car.saisonnier)	0	0
Commercial	n.v Faible	4A	0	0
	n.v Moyen	1A	0	0
Rural	n.v Faible	3C	2C	4C
<b>Totaux</b>		<b>36 (11C et 25A)</b>	<b>10C</b>	<b>5 (4C et 1A)</b>

Suite à leur transit par les 2 centres de transfert de Jdeïda et de Ben Arous, les déchets générés par les 15 communes et arrondissements ainsi identifiés, arrivent donc à la décharge de Borj Chékir tous mélangés, sans aucune distinction possible. Par conséquent, ils ne pouvaient être retenus en tant que zones d'échantillonnage pour les campagnes de caractérisation des déchets.

Les zones potentielles d'échantillonnage se limitent donc aux 36 communes et arrondissements, dont les déchets sont acheminés distinctement à la décharge de Borj Chékir. Ces zones potentielles sont représentées par 11 communes et les 25 arrondissement de la commune de Tunis (16 arrondissement), de la commune de l'Ariana (7 arrondissements) et de la commune d'Ettadhamen-Mnihla (2 arrondissements).

## **2. Choix des zones d'échantillonnage selon la disponibilité des données :**

L'analyse des données relatives à la production des déchets au niveau des communes et des arrondissements du Grand Tunis, décrite dans le Chapitre 1 de la 2<sup>ème</sup> partie de ce document, a révélé :

- d'une part, une grande complexité des schémas de collecte,
- et d'autre part l'absence d'information précise sur les quantités et la nature des déchets transportés.

Le choix des zones potentielles d'échantillonnage, va donc dépendre de la disponibilité des informations sur les déchets, au niveau des arrondissements et des communes.

### **2.1. Au niveau des arrondissements :**

Le mode d'enregistrement des déchets, adopté à la décharge de Borj Chékir, consiste à identifier l'origine des déchets par commune et non par arrondissement. Cette procédure va limiter le choix des zones potentielles d'échantillonnage aux seules communes disposant de relevés propres à leurs arrondissements. Ainsi, parmi les 25 arrondissements des 3 communes de Tunis, de l'Ariana et d'Ettadhamen-Mnihla, seuls les 16 arrondissements de la ville de Tunis, peuvent être concernés par la caractérisation.

Cette contrainte va limiter le choix des zones d'échantillonnage à seulement 11 communes et 16 arrondissements (ceux de la commune de Tunis). L'identification de ces zones, présentée dans le tableau 51 montre que :

- le secteur résidentiel à revenu faible : ne pourra être représenté que par 7 arrondissements de la ville de Tunis et par 1 seule commune,
- le secteur résidentiel à revenu moyen : ne pourra être représenté que par 4 arrondissements de la ville de Tunis et par 4 communes dont 1 à caractère saisonnier,
- le secteur résidentiel à revenu élevé : ne pourra être représenté que par 1 arrondissement de la ville de Tunis et par 3 communes dont 1 à caractère saisonnier,
- le secteur commercial à revenu faible : ne pourra être représenté que par 3 arrondissements de la ville de Tunis,
- le secteur commercial à revenu moyen : ne pourra être représenté que par 1 arrondissement de la ville de Tunis,
- le secteur rural : ne pourra être représenté que par 3 communes.

**Tableau 51** Identification des zones potentielles d'échantillonnage  
selon les critères de sectorisation

Type de secteur		Arrondissements	Communes
Résidentiel	revenu Faible	7A	1C
	revenu Moyen	4A	4C (dont 1C à car.saisonnier)
	revenu Elevé	1A	3C (dont 1C à car.saisonnier)
Commercial	revenu Faible	3A	0
	revenu Moyen	1A	0
Rural	revenu Faible	0	3C
<b>Totaux</b>		<b>16 Arrondissements</b>	<b>11 Communes</b>

## 2.2. Au niveau des communes :

Pour l'organisation des campagnes de caractérisation, les bennes et leurs circuits doivent être identifiés. Cependant, ces informations ne sont disponibles, de façon précise, qu'au niveau des 16 arrondissements de la commune de Tunis.

Sur la base de toutes les contraintes qui viennent d'être présentées, les 16 arrondissements de la ville de Tunis ont été choisis en tant que zones d'échantillonnage pour la caractérisation des déchets ménagers dans le Grand Tunis. Selon le découpage du Grand Tunis en secteurs homogènes, ces zones d'échantillonnage couvrent les 5 secteurs urbains suivants (représentés dans le tableau 52) : 3 secteurs résidentiels et 2 secteurs à caractère commercial.

**Tableau 52.** Caractéristiques des 5 secteurs homogènes du Grand Tunis (hors saison estivale)  
représentés par les zones d'échantillonnage choisies

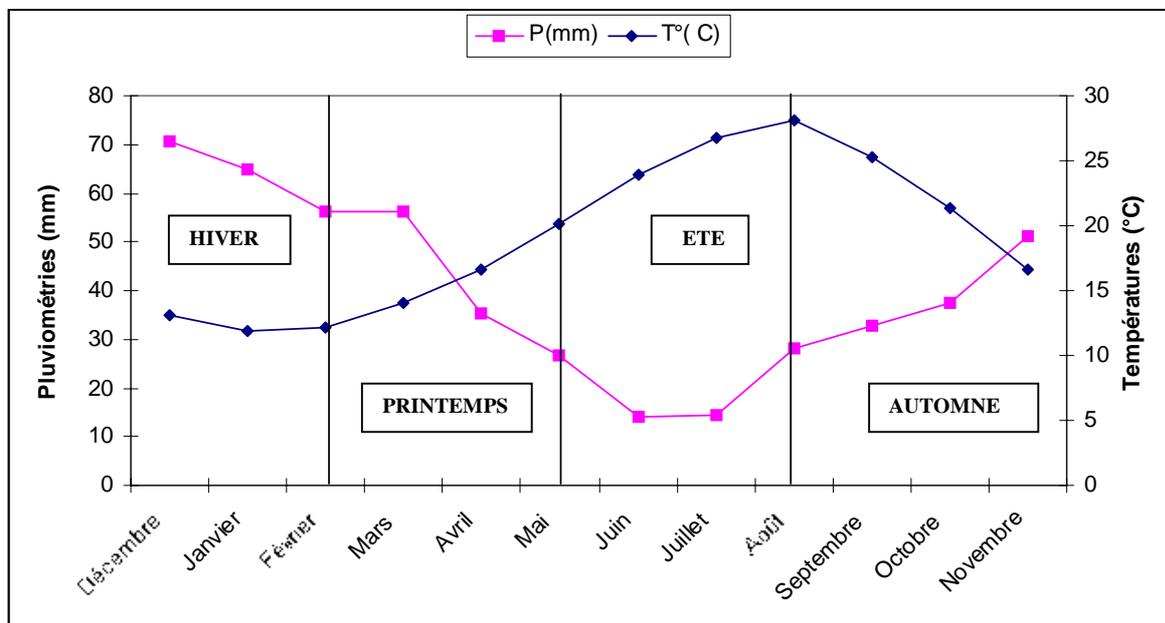
Type de secteur		Population représentée (%)	Déchets produits (%)
Résidentiel	revenu Faible	35	28
	Revenu Moyen	36	35
	Revenu Elevé	10	15
Commercial	Revenu Faible	7	10
	revenu Moyen	2	6
<b>Total</b>		<b>90</b>	<b>94</b>

Ces secteurs représentent, en dehors de la saison estivale, 90% de la population totale et 94% des déchets produits dans le Grand Tunis

## V. LE CHOIX DES PERIODES D'ECHANTILLONNAGE

La Tunisie se caractérise par un climat sec et chaud en été et frais et humide en hiver. L'étude des moyennes de pluviométrie et de température des 15 dernières années, dans le Grand Tunis [43] fait apparaître quatre saisons distinctes : l'Hiver, le Printemps, l'Eté et l'Automne (Fig.17).

**Figure 17. Moyennes mensuelles de la Pluviométrie et de la Température dans le Grand Tunis de 1987 à 2002**



Sur la base de ces données météorologiques, quatre campagnes annuelles d'échantillonnage ont pu être confirmées, afin d'avoir une connaissance plus approfondie des déchets ainsi que de leurs fluctuations durant toute l'année :

- la Campagne d'Hiver : où la période d'échantillonnage pourrait s'étaler de Décembre à Février ;
- la Campagne de Printemps : où la période d'échantillonnage pourrait s'étaler de Mars à Mai.
- la Campagne d'été : où la période d'échantillonnage pourrait s'étaler de Juin à Août ;
- la Campagne d'Automne : où la période d'échantillonnage pourrait s'étaler de Septembre à Novembre.

**3EME PARTIE**

**VALIDATION DE LA METHODE DE CARACTERISATION**

**CHAPITRE 2**

**ORGANISATION ET DEROULEMENT  
DES CAMPAGNES DE CARACTERISATION  
DANS LA VILLE DE TUNIS**

## I. EVALUATION DES DECHETS MENAGERS ET ASSIMILES GENERES PAR LA VILLE DE TUNIS ET DESCRIPTION DE LEURS MODES DE COLLECTE

La commune de Tunis est constituée de 16 arrondissements. Sa population est estimée en 2002 à 691250 habitants (soit 35% de la population du Grand Tunis). Selon les relevés d'admission des déchets à la décharge, la commune produirait 206 389 tonnes/an de déchets « dits ménagers et assimilés ». En réalité ce tonnage englobe en plus des déchets ménagers et assimilés, les déchets des marchés, les déchets d'activités de soins, les déchets industriels et parfois les déchets verts. Il apparaît ainsi nécessaire, en préalable aux campagnes de caractérisation, de procéder à une évaluation assez précise des flux et des circuits de collecte pour faire la part de ces différents flux.

### 1. Description des divers flux de déchets solides et de leurs modes de collecte :

Les déchets solides générés par la ville, se composent des 3 grandes catégories suivantes :

- les déchets municipaux, eux-mêmes composés :
  - des déchets ménagers : produits par les ménages ;
  - des déchets assimilés : produits par les activités économiques (administrations, commerces, artisans, etc.) ;
  - des déchets verts : produits par les jardins résidentiels et les espaces verts (parcs et jardins municipaux) ;
  - des déchets des marchés : produits par les marchés municipaux ;
  - des boues d'assainissement : produits par les stations d'épurations des eaux usées ;
- les déchets d'activités de soins : produits par les établissements de soins (hôpitaux, cliniques, pharmacies, etc.).
- les déchets industriels banals (DIB) produits par les usines : de textiles et d'habillements, de métallurgie, de papier et de carton, de caoutchouc et de plastiques, de bois, etc., à l'exclusion des déchets toxiques.

Ces divers flux sont collectés selon différents modes de collecte et par des services différents qui sont schématisés dans le tableau 53 et la figure 18. Ainsi :

- **les Déchets Industriels Banals (DIB)** sont soit collectés par la « Direction de la Propreté » de la ville (ils sont alors déversés dans la décharge de Borj Chékir) soit collectés par les industriels eux-mêmes (ils sont alors déversés à la décharge ou dans le milieu naturel avoisinant). Les DIB collectés par la ville sont estimés à 2 640 tonnes/an ;
- **les déchets d'activités de soins** sont collectés par la « Direction de la Propreté » de la ville et sont déversés dans la décharge de Borj Chékir comme suit :

- les déchets provenant des 4 grands hôpitaux de la ville sont collectés en mélange avec les déchets des grands hôtels du centre ville. Ils sont estimés à 1 200 tonnes/an ;
- les déchets des petits hôpitaux, des cliniques, des cabinets des médecins, des pharmacies et des laboratoires d'analyse sont collectés en mélange avec les déchets ménagers.

**Tableau 53. Description des divers flux de déchets solides générés par la ville de Tunis**

Flux	Producteurs	Collecteur	Mode de collecte et lieu d'élimination	Quantités produites (t/an)
Déchets Industriels Banals (DIB)	Grands industriels	Dir Propreté	C.séparée/Décharge contrôlée	2 640
	Petits industriels	Industriels	Décharges sauvages	non évaluées
Déchets d'Activité de Soins	Grands hôpitaux (4)	Dir Propreté	C.en mélange avec les D. grands hôtels /Décharge contrôlée	1 200
	Petits hôpitaux, cliniques, pharmacies, etc.	Dir Propreté	C.en mélange avec D.ménagers /Décharge contrôlée	non évaluées
Boues d'assainissement	Stations d'épuration	ONAS	env.40%/Décharge contrôlée	8 490
			le reste/Décharges sauvages	12 735
Déchets Verts	Résidences	Dir Propreté	C.en mélange avec D.ménagers /Décharge contrôlée	non évaluées
			C.séparée/Pépinière	non évaluées
	Parcs et espaces verts	Dir. Espaces verts	C.séparée/Pépinière	non évaluées
Déchets des Marchés	Marchés municipaux	Dir Propreté	C.en mélange /Décharge contrôlée	non évaluées
Déchets ménagers	Ménages	Dir Propreté	C.en mélange /Décharge contrôlée	non évaluées
Déchets assimilés	Commerces, administrations, artisans, etc.	Dir Propreté	C.en mélange /Décharge contrôlée	non évaluées

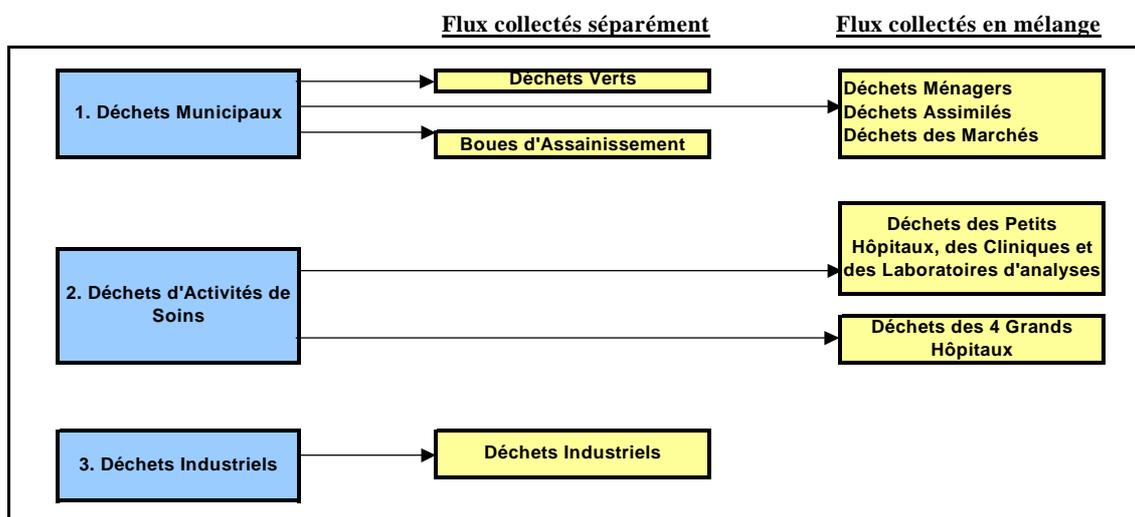
➤ **les boues d'assainissement** sont gérées par l'Office National d'Assainissement (ONAS).

Selon les relevés d'admission à la décharge :

- une partie est déversée dans la décharge de Borj Chékir (env. 40% de la production de la ville, soit 8 490 tonnes/an)
- le reste (environ 12 735 tonnes/an) est déversé dans des décharges sauvages.

- **les déchets verts** sont collectés de 3 manières différentes par les services de la ville :
  - les déchets verts provenant des résidences sont collectés par la « Direction de la Propreté » :
    - soit en mélange avec les ordures ménagères, ils sont alors déversés dans la décharge contrôlée de Borj Chékir (selon les estimations de la ville de Tunis, ces quantités de déchets verts sont négligeables) ;
    - soit seuls séparément, ils sont alors broyés et utilisés dans la pépinière de la ville.
  - les déchets verts provenant des parcs et des jardins municipaux sont collectés par la « Direction des parcs et des espaces verts », ils sont broyés et utilisés dans la pépinière de la ville.
- **les déchets des marchés** sont collectés par la « Direction de la Propreté » de la ville, en mélange avec les déchets ménagers ;
- **les déchets ménagers** sont collectés en mélange avec les déchets assimilés, les déchets des marchés et une partie des déchets des activités de soins ;
- **les déchets provenant des administrations, des commerces et des artisans** (dits assimilés) sont collectés en mélange avec les déchets ménagers, les déchets des marchés et une partie des déchets des activités de soins.

**Figure 18.** Schémas de collecte des divers flux de déchets solides générés par la ville de Tunis



## 2. Evaluation des divers flux de déchets solides générés par la ville de Tunis :

La complexité des schémas de collecte et la multiplicité des collecteurs et des modes de collectes pour un même flux rendent très difficile l'évaluation des divers flux de déchets solides générés par la ville de Tunis et en particulier le flux des déchets ménagers et assimilés.

### 2.1. Evaluation des déchets ménagers et assimilés :

Les déchets « dits ménagers et assimilés » composés des déchets ménagers et assimilés, des déchets des marchés, des déchets d'activités de soins et des déchets industriels, sont estimés selon les relevés d'admission à la décharge à 206 389 tonnes/an. L'évaluation des « déchets ménagers et assimilés » proprement dits, nécessite donc en préalable l'évaluation des quantités de déchets produits par les marchés municipaux et les établissements de soins. Sachant que les déchets industriels collectés par la ville sont estimés à 2 640 tonnes/an et les déchets générés par les 4 grands hôpitaux sont estimés à 1 200 tonnes/an.

#### ➤ Evaluation des déchets des marchés :

Pour tenter d'évaluer les quantités de déchets produites par les marchés municipaux de la ville de Tunis, nous avons dû mener une enquête auprès de la Direction de la Propreté. Cette enquête a permis d'identifier dans chaque arrondissement de la ville le nombre des marchés et l'estimation du tonnage des déchets produits. Les quantités de déchets des marchés générées par toute la ville sont ainsi estimées à 16 089 tonnes/an. Les résultats de cette enquête sont présentés dans le tableau 54.

**Tableau 54. Evaluation des déchets des marchés générés dans les arrondissements de la ville de Tunis**

Arrondissements	nombre de marchés	tonnage annuel
Médina	2	657
Bab Bhar	3	2920
Sidi Bechir	1	548
Bab Souika	2	913
Omrane	3	1460
Omrane Sup	3	1460
El Manzah	2	1004
El Khadra	1	913
Ettahrir	1	456
Hraïria	2	1369
Kabaria	2	767
Sidi Hassine	2	850
Ouardia	2	292
Ezzouhour	1	730
Sijoumi	3	840
Dj Jelloud	1	913
total	31	16089

#### ➤ Evaluation des déchets d'activités de soins :

Les principaux établissements de soins de la ville de Tunis (en dehors des 4 grands hôpitaux) sont au nombre de 88 : 58 établissements publics (12 hôpitaux et 46 dispensaires) et 30 établissements privés (cliniques). Ces établissements disposent respectivement d'un nombre moyen de lits hospitaliers égal à 43 (dans le public) et à 27 (dans le privé).

Selon des études réalisées par le Ministère de la Santé Publique, la production des déchets dans les hôpitaux est estimée à 2,37kg/lit.jour. Si on applique ce ratio aux principaux établissements de soins de la ville, les quantités de déchets d'activités de soins générées seraient de l'ordre de 2 858 tonnes/an (cf.Tab. 55).

**Tableau 55. Evaluation des déchets générés par les principaux établissements de soins de la ville de Tunis**

Etablissements de soins	Nombre total de lits	Production de déchets (en tonnes)	
		journalière	Annuelle
Publics	2 494	5,911	2 157
Privés	810	1,920	701
Total	3 304	7,830	2 858

➤ **Evaluation des « déchets ménagers et assimilés » proprement dit :**

Sur la base des évaluations précédentes synthétisées dans le tableau 56, les déchets ménagers et assimilés ont pu finalement être estimés à 183 602 tonnes/an.

**Tableau 56. Evaluation des divers flux générés par la ville de Tunis**

Flux	Producteurs	Quantités produites (t/an)
Déchets d'Activité de Soins	4 grands hôpitaux	1 200
	12 hôpitaux, 30 cliniques, 46 dispensaires	2 858
Déchets Industriels Banals (collectés par la ville)	Industriels	2 640
Déchets des Marchés	31 marchés municipaux	16 089
Déchets ménagers et assimilés	691 250 habitants	183 602
<b>Total</b>		<b>206 389</b>

**2.2. Evaluation des déchets municipaux :**

Les déchets municipaux sont composés des divers flux suivants : les déchets ménagers et assimilés, les déchets des marchés, les déchets verts et les boues d'assainissement. L'évaluation des déchets municipaux nécessite en préalable, l'évaluation des quantités de déchets verts produits par la ville.

➤ **Evaluation des déchets verts :**

Pour pouvoir évaluer ce flux, nous avons dû réaliser des enquêtes auprès des deux services de la ville effectuant leur collecte :

- la Direction de la Propreté : en ce qui concerne les déchets verts provenant des résidences,
- la Direction des espaces verts : en ce qui concerne les déchets verts provenant des parcs municipaux et des espaces verts.

Ces enquêtes ont permis d'évaluer ce flux à environ 108 800 m<sup>3</sup>/an (soit près de 16 320 t/an), qui se répartissent ainsi : 60 000 m<sup>3</sup> (soit 9 000 tonnes) provenant des parcs municipaux et des espaces verts et 48 800 m<sup>3</sup> (soit 7 320 tonnes) provenant des jardins résidentiels. L'enquête concernant ce dernier flux a permis d'avoir des estimations dans chaque arrondissement de la ville. Ces estimations sont présentées dans le tableau 57 (la densité des déchets verts étant de l'ordre de 0,15).

**Tableau 57. Evaluation des déchets verts générés dans les arrondissements de la ville de Tunis**

Arrondissements	Volume (m3)	tonnage annuel
Médina	0	0
Bab Bhar	0	0
Sidi Bechir	1800	270
Bab Souika	0	0
Omrane	4500	675
Omrane Sup	1200	180
El Manzah	27000	4050
El Khadra	11100	1665
Ettahrir	0	0
Hraïria	0	0
Kabaria	0	0
Sidi Hassine	0	0
Ouardia	1800	270
Ezzouhour	1400	210
Sijoumi	0	0
Dj Jelloud	0	0
total	48800	7320

➤ **Evaluation des déchets municipaux :**

Sur la base des évaluations précédentes synthétisées dans le tableau 58, les déchets municipaux ont pu finalement être estimés à 237 235 tonnes/an.

**Tableau 58. Evaluation des déchets municipaux générés par la ville de Tunis**

Flux	Producteurs	Quantités produites (t/an)
Déchets ménagers et assimilés	691 250 habitants	183 602
Déchets des Marchés	31 marchés municipaux	16 089
Déchets Verts	Jardins résidentiels et parcs municipaux	16 320
Boues d'assainissements	691 250 habitants	21 224
<b>Total</b>		<b>237 235</b>

### 2.3. Evaluation des déchets solides :

Les déchets solides générés par la ville de Tunis se composent des divers flux suivants : les déchets municipaux, les déchets d'activités de soins et les déchets industriels banals. L'évaluation de l'ensemble de ces flux nécessite en préalable, l'évaluation des quantités de déchets industriels produits par la ville.

#### ➤ Evaluation des déchets industriels banals :

La majeure partie des déchets industriels banals (DIB) générés par la ville de Tunis, est déversée dans des décharges sauvages. Nous avons tenté d'évaluer ce flux à partir des estimations suivantes [22] :

- les quantités de DIB dans le Grand Tunis seraient de 275 tonnes/jour
- 10% de ces déchets seraient produits par la ville de Tunis.

Les quantités de déchets industriels banals produits par la ville de Tunis, peuvent être ainsi estimées à environ 10 000 tonnes/an dont 2 640 tonnes sont collectées par la Direction de la propreté. Ces quantités (de l'ordre de 14,5 kg/hab.an) semblent très faibles en comparaison à celles produites par un P.I tel que la France qui en produit environ 34 kg/hab.an.

#### ➤ Evaluation des déchets solides :

Sur la base des évaluations précédentes, synthétisées dans le tableau 59, les quantités de déchets solides ont pu être ainsi estimées à 251 293 tonnes/an.

**Tableau 59. Evaluation des flux de déchets solides générés par la ville de Tunis**

Flux	Producteurs	Quantités produites (t/an)
Déchets municipaux	691 250 habitants	237 235
Déchets d'Activité de Soins	Etablissements de soins publics et privés	4 058
Déchets Industriels Banal	Industriels	10 000
<b>Total</b>		<b>251 293</b>

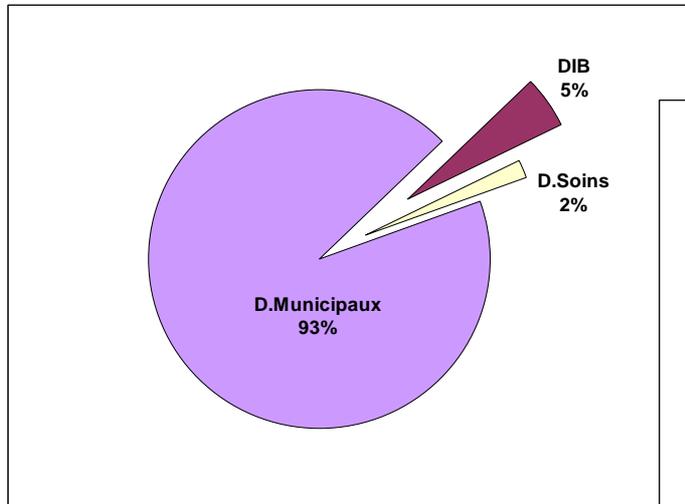
### 3. Bilan des divers flux et calcul des ratios de production propres aux déchets ménagers et assimilés :

#### 3.1. Bilan des divers flux et de leurs modes de collecte :

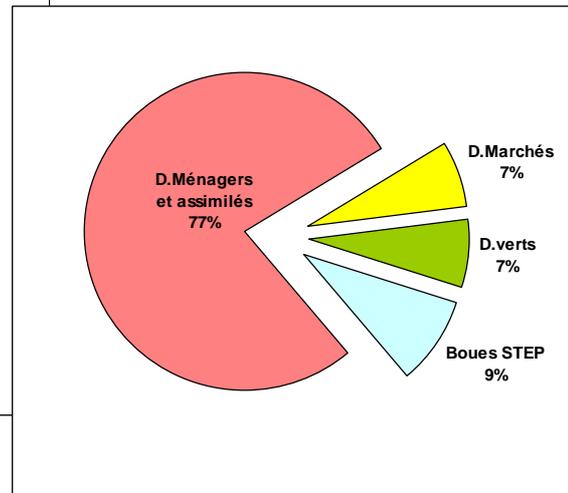
Les déchets solides générés par la ville de Tunis sont évalués à 251 293 tonnes/an dont 237 235 tonnes (93% ) sont des déchets municipaux (cf.Fig.19). Ces derniers seraient constitués de près de 183 602 tonnes (77%) de déchets ménagers et assimilés, de 16 089 tonnes de déchets de

marchés (7%), de 16 320 tonnes de déchets verts (7%) et de 21 224 tonnes (9%) de boues d'assainissements (cf.Fig.20).

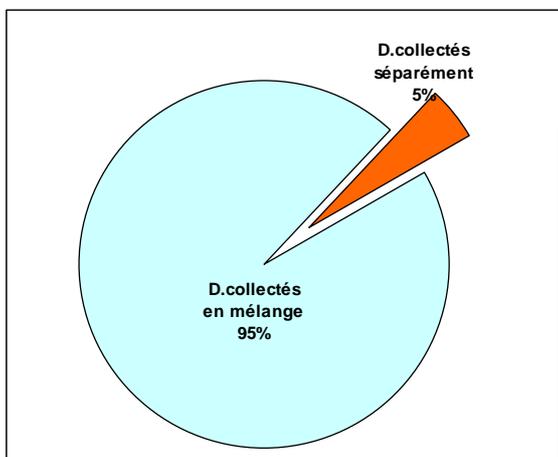
**Figure 19. Composition des déchets solides générés par la ville de Tunis**



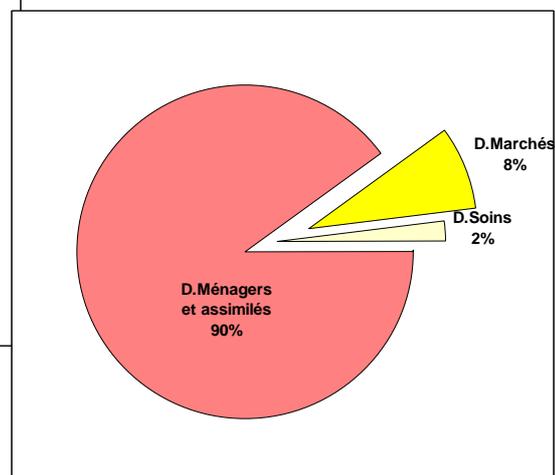
**Figure 20. Composition des déchets municipaux générés par la ville de Tunis**



**Figure 21. Identification des déchets solides collectés par la Direction de Propreté de la ville de Tunis**



**Figure 22. Composition des déchets solides collectés en mélange**



Les déchets collectés par la Direction de la propreté de la ville s'élèvent à 213 709 tonnes/an, dont 9960 tonnes sont collectés séparément (5%) et 203 749 tonnes sont collectés en mélange (95%) (cf.Fig.21). Ce tonnage collecté en mélange est constitué de 183 602 tonnes de déchets ménagers et assimilés (90%), de 16 089 tonnes de déchets de marchés (8%) et de 4 058 tonnes de déchets d'activités de soins (2%) (cf.Fig.22).

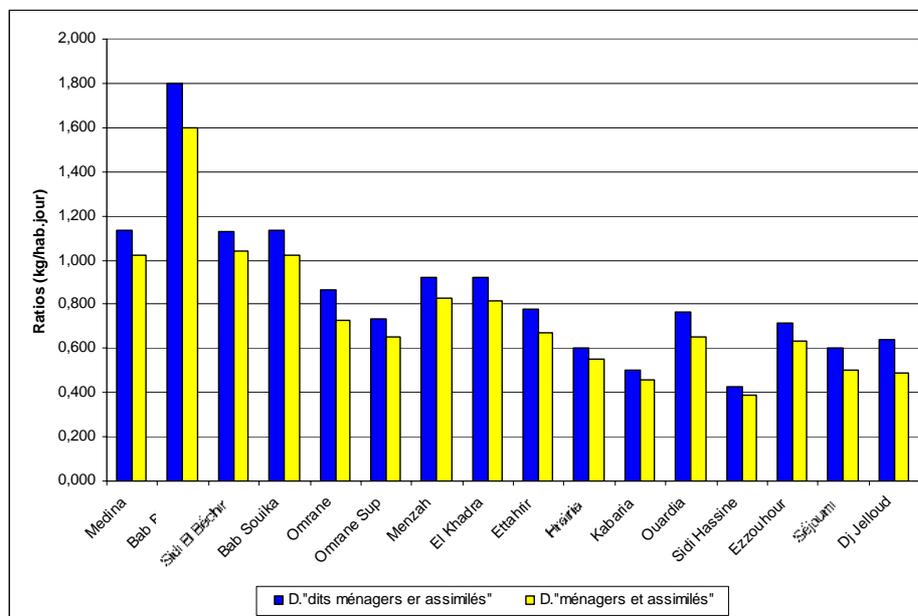
### 3.2. Evaluation des ratios de production des déchets ménagers et assimilés :

Les productions journalières par habitant calculées à partir des estimations des déchets ménagers et assimilés proprement dits, sont présentés dans le tableau 60 et la figure 23, en comparaison avec ceux calculés précédemment, sur la base des tonnages des déchets « dits ménagers et assimilés » (cf. Chapitre 1 - § II –2.2).

**Tableau 60.** Tonnages annuels et ratios de production des déchets ménagers et assimilés

Arrondissement	Déchets "dits ménagers et assimilés"		Déchets "ménagers et assimilés"	
	Tonnages	Ratios	Tonnages	Ratios
Medina	11251	1,134	10156	1,023
Bab Bhar	29976	1,800	26619	1,598
Sidi El Béchir	12527	1,131	11542	1,042
Bab Souika	12974	1,137	11624	1,019
Omrane	11733	0,868	9835	0,727
Omrane Sup	16338	0,736	14440	0,651
Menzah	14512	0,922	13071	0,830
El Khadra	12000	0,921	10650	0,818
Ettahrir	6516	0,775	5622	0,669
Hraïria	19894	0,605	18088	0,550
Kabaria	14262	0,502	13058	0,459
Ouardia	8499	0,766	7212	0,650
Sidi Hassine	8685	0,424	7955	0,388
Ezzouhour	11000	0,712	9833	0,636
Séjourni	7704	0,602	6427	0,502
Dj Jelloud	5877	0,638	4527	0,492
<b>Totaux et Moyennes</b>	<b>203749</b>	<b>0,808</b>	<b>180660</b>	<b>0,716</b>

**Figure 23.** Comparaison des ratios de production des déchets ménagers et assimilés



Ces 2 types de calculs des ratios, montrent que la prise en compte d'autres flux en plus des déchets ménagers et assimilés, a pour conséquence une surestimation des réels ratios des déchets ménagers et assimilés proprement dits, pouvant varier de 8 à 23%. Cette distinction des autres

flux n'est donc pas négligeable et s'avère indispensable dans la démarche de caractérisation des déchets d'une agglomération.

#### **4. Description de la collecte des déchets par la Direction de la Propreté de la ville de Tunis :**

##### **4.1. La pré-collecte :**

La pré-collecte est l'ensemble des opérations effectuées par la population afin de rassembler et de présenter les déchets pour la collecte proprement dite. Dans la ville de Tunis, le stockage des déchets se fait des diverses manières suivantes [58] :

- dans des conteneurs de 750 l placés par la commune sur la voie publique,
- dans des conteneurs de 240 l et 330 l placés par la commune dans les hôpitaux, les hôtels, les commerces et les habitations verticales,
- dans des poubelles de 30 à 100 l placés par la population devant les résidences pavillonnaires,
- dans des sacs en plastique ou en vrac déversés directement sur la voie publique.

##### **4.2. La collecte :**

Le ramassage des déchets et leur transport vers la décharge nécessite des équipements lourds et s'effectue selon divers circuits [58].

###### **4.2.1. La fréquence et les horaires :**

La collecte des déchets est soit mécanisée, soit en porte à porte. Elle est assurée quotidiennement (365 jours/an) soit :

- le jour (à partir de 7h du matin) dans les quartiers périphériques ainsi que ceux non viabilisés ;
- le soir (à partir de 21h) dans les quartiers à circulation diurne dense et où l'activité commerciale est intense (tel que le Centre Ville).

Pendant la saison estivale (juillet-août) et le mois de Ramadan, la collecte des déchets doit se faire selon des horaires spéciaux (surtout pour le centre ville).

###### **4.2.2. Les équipements :**

Près de la moitié des déchets est collectée dans les bennes tasseuses, la collecte du reste se fait par les tricycles, les tracteurs agricoles et les brouettes. Le matériel suivant est alors mobilisé :

- 76 bennes tasseuses de 7, 9, 12 et 16 m<sup>3</sup> ;
- 29 caissons de 15 et 30 m<sup>3</sup> et 6 camions lève-caissons ;
- 10 semi-remorques de 30 m<sup>3</sup> ;

- 2 semi-remorques avec auto-compactrice de 30 m<sup>3</sup> et 6 remorques de 10 m<sup>3</sup> ;
- 5 tracteurs routiers assurant le transport des semi-remorques de 30 m<sup>3</sup> et des compacteurs géants à la décharge ;
- 10 camions (type entrepreneur) : pour l'enlèvement des déchets de jardin, des déchets industriels, des stations services et des déchets de démolition ;
- 100 tracteurs agricoles : pour l'enlèvement des déchets de jardin, des déchets de démolition du centre ville et des déchets ménagers dans les zones non viabilisées ;
- 55 tricycles de 2 m<sup>3</sup> et 200 brouettes à bras de 1 m<sup>3</sup>.

#### 4.2.3. Les circuits :

La collecte des déchets se fait selon 3 circuits différents :

- Les circuits mécanisés :  
Ces circuits concernent les grandes artères de la ville. Les déchets sont déversés dans des conteneurs qui sont collectés par des bennes tasseuses.
- Les circuits porte-à-porte jour et nuit :  
Ces circuits concernent les grandes artères et les zones piétonnes des secteurs commerçants. Les déchets sont déversés dans des sacs ou des poubelles qui sont collectés, soit par des bennes tasseuses soit par des camions, des tricycles ou des mini-tracteurs.
- Les circuits intermédiaires :  
Ces circuits concernent la collecte des déchets dans les zones non accessibles et non viabilisées, ainsi que la collecte des déchets verts. Les déchets sont collectés par des tracteurs agricoles et des brouettes, puis acheminés vers des postes de transit.

#### 4.3. Le transport à la décharge :

Le transport des déchets collectés vers la décharge se fait de diverses manières :

- les déchets collectés par les bennes et les camions (soit 61% des ordures collectées quotidiennement) sont transportés directement en décharge sans rupture de charge,
- les déchets collectés par les tricycles, les tracteurs agricoles et les brouettes (soit 39% des ordures collectées quotidiennement) sont transportés à la décharge suite à leur transfert dans des postes de transit comme suit :
  - les déchets sont vidés dans 19 stations de transfert réparties entre les 16 arrondissements,
  - les semi-remorques de 10 et 30 m<sup>3</sup>, les caissons de 30 m<sup>3</sup> et les compacteurs géants assurent le transport des ordures jusqu'à la décharge.



- un secteur résidentiel à niveau de vie moyen : constitué par les 4 arrondissements de Omrane, Omrane Supérieur, El Khadra et Ettahrir ;
- un secteur résidentiel à niveau faible : constitué par les 7 arrondissements de Hraïria, Kabaria, Ouardia, Sidi Hassine, Ezzouhour, Séjoumi et Dj Jelloud ;
- un secteur commercial à niveau de vie moyen : constitué par l'arrondissement de Bab Bhar ;
- un secteur commercial à niveau de vie faible : constitué par les 3 arrondissements de la Medina, Sidi El Béchir et Bab Souika.

Les caractéristiques socio-économiques et de production des déchets de ces 5 secteurs sont présentés dans le tableau 61.

**Tableau 61. Caractéristiques socio-économiques et de production des déchets dans les 5 secteurs**

n°Secteurs	Type	Arrondissements	Population (%)	Production de Déchets (%)	Ratio moyen (Kg/hab.j)
1	Résidentiel à niv.vie élevé	El Menzah	6	7	0,830
2	Résidentiel à niv.vie moyen	Omrane	22	22	0,710
		Omrane Sup			
		El Khadra			
		Ettahrir			
3	Résidentiel à niv.vie faible	Hraïria	52	37	0,515
		Kabaria			
		Ouardia			
		Sidi Hassine			
		Ezzouhour			
		Séjoumi			
		Dj Jelloud			
4	Commercial à niv.vie moyen	Bab Bhar	7	15	1,598
5	Commercial à niv.vie faible	Medina	13	19	1,028
		Sidi El Béchir			
		Bab Souika			
<b>Totaux</b>		<b>16</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	

## 2. Choix des bennes à échantillonner :

Les bennes à échantillonner doivent être choisies au hasard parmi toutes celles desservant les secteurs identifiés. Cependant, le mode de collecte en mélange décrit précédemment impose en préalable, une pré-sélection des camions transportant uniquement (ou majoritairement) les déchets ménagers et assimilés. Cette pré-sélection nécessite une identification précise des circuits des bennes et de la nature des déchets transportés. A cet effet, une enquête a du être menée auprès de la Direction de Propreté de la ville afin d'avoir les renseignements suivants : les itinéraires de collecte, les codes des bennes et l'heure de réception à la décharge.

### 2.1. Identification des bennes à échantillonner :

Les 16 arrondissements de la ville de Tunis sont desservis par 39 bennes présentées dans le tableau 62 : 24 bennes le jour et 15 bennes le soir. Parmi ces 39 bennes, les 8 bennes suivantes ne pouvaient être retenues pour l'échantillonnage, car ne collectant pas les déchets ménagers :

- les 3 bennes desservant les 2 arrondissements de Hraïria et de Sidi Hassine : car collectant les déchets des 2 abattoirs de la ville,
- les 2 bennes (jour) desservant l'arrondissement de Bab Bhar : car collectant les déchets des 3 grands marchés du centre ville,
- les 2 bennes (soir) collectant les balayures de Bab Bhar (le centre ville),
- une des 2 bennes desservant l'arrondissement de Bab Souika : car collectant les déchets des 4 grands hôpitaux.

De même, la benne « jour » desservant simultanément les 2 arrondissements d'Ezzouhour et de Sijoumi ne pouvait être retenue pour l'échantillonnage.

**Tableau 62. Identification des bennes desservant les 16 arrondissements de la ville de Tunis**

Arrondissements	Le jour	Le soir	Bennes totales	Bennes sélectionnées
El Menzah	3	0	3	3
Omrane	1	1	2	2
Omrane Sup.	2	0	2	2
El Khadra	2	1	3	3
Ettahrir	1	0	1	1
Hraïria	2 2 (Abattoirs)	0	4	2
Kabaria	3	0	3	3
Ouardia	1	0	1	1
Sidi Hassine	1 1 (Abattoir)	0	2	1
Séjoumi	1 (collecte simultanée de 2 arrondissements)	0	2	0
Ezzouhour		1		1
Dj Jelloud	1	0	1	1
Bab Bhar	2 (3 Grands Marchés)	5 2 (Balayures)	9	5
Médina	0	2	2	2
Sidi El Béchir	1	1	2	2
Bab Souika	0	1 1(4 Grands Hôpitaux)	2	1
<b>Total</b>	<b>24</b>	<b>15</b>	<b>39</b>	<b>30</b>

## 2.2. Identification des circuits à échantillonner :

Les bennes à échantillonner doivent être choisies au hasard parmi celles transportant uniquement les déchets ménagers et assimilés. Ce choix nécessite en préalable l'identification des circuits transportant les déchets des marchés et les déchets des principaux établissements de soins.

**Tableau 63. Identification des circuits des 30 bennes retenues pour l'échantillonnage**

Arrondissements	Nombre de Bennes	Zones collectées	Nombre de Circuits	Heure d'arrivée à la décharge
<b>El Menzah</b>	3	Mutuelle-ville	1	12:23
		El Manar	2	12:26
		El Menzah9	1	14:52
				12:47
<b>Omrane</b>	2	Omrane1	2	11:39
		Omrane2	2	15:25
				00:53
				04:28
<b>Omrane Sup.</b>	2	Omrane Sup1	2	09:36
		Omrane Sup2	1	12:14
				12:14
<b>El Khadra</b>	3	Khadra1	2	10:19
		Khadra2	1	12:58
		Khadra	1	12:20
				00:55
<b>Ettahrir</b>	1	Ettahrir	1	12:12
<b>Hraïria</b>	2	Hraïria1	2	09:00
		Hraïria2	2	11:42
				09:22
				11:51
<b>Kabaria</b>	3	Kabaria	2	09:57
		Kabaria1	1	13:29
		Kabaria2	1	12:12
				13:33
<b>Ouardia</b>	1	Ouardia	3	09:55
				13:26
				14:49
<b>Sidi Hassine</b>	1	S.Hassine	1	11:44
<b>Ezzouhour</b>	1	Ezzouhour	1	02:24
<b>Dj Jelloud</b>	1	Dj.Jelloud	1	12:50
<b>Bab Bhar</b>	5	Rue de Carthage	1	01:18
		Rue Ch.de Gaulle	1	00:49
		Rue Lafayette	1	01:27
		Rue S.Sofiane	2	00:28
		Rue J.d'Arc	1	02 :41
				01:17
<b>Médina</b>	2	La Medina	2	02 52
		Rue K.Louzir	1	04:26
				04:03
<b>Sidi El Béchir</b>	2	S.Béchir1	2	10:37
		S.Bechar2		01:28
<b>Bab Souika</b>	1	B.Souika	1	00:51
<b>Total</b>	<b>30</b>		<b>42</b>	

### 2.2.1. Identification des circuits transportant majoritairement les déchets des marchés et les déchets de soins :

Les 42 circuits des 30 bennes retenues pour l'échantillonnage sont décrits pour chaque arrondissement dans le tableau 63 : nombre et heure d'arrivée à la décharge. L'enquête menée auprès de la Direction de Propreté de la ville a permis d'identifier 13 circuits transportant majoritairement des déchets des marchés et 5 circuits transportant majoritairement les déchets des principaux établissements de soins publics et privés. Ces circuits, indiqués dans le tableau 63 par des encadrés rouges (déchets de soins) et verts (déchets des marchés), n'ont donc pas été retenus pour le tirage au sort.

### 2.2.2. Tirage au sort des circuits à échantillonner :

Un tirage au sort effectué sur les 29 circuits identifiés, a permis de sélectionner 5 bennes dans les 5 secteurs d'échantillonnage. Ces bennes sont présentées dans le tableau 64. Elles sont nommées B1, B2, B3, B4 et B5 et identifiées dans le tableau 65.

**Tableau 64. Tirage au sort des circuits à échantillonner**

Secteurs	Nombre de circuits	circuits retenus par tirage au sort
Secteur 1	2	<b>12 :23</b> 12 :47
Secteur 2	6	00:53 04:28 <b>09:36</b> 12:14 12:20 00:55
Secteur 3	8	09:00 11:42 <b>09:22</b> 09 :57 13:29 12 :12 13:26 02:24
Secteur 4	6	01:18 <b>00:49</b> 01:27 00:28 02 :41 01:17
Secteur 5	2	<b>04 :03</b> 10 :37
<b>Total</b>	<b>24</b>	<b>5</b>

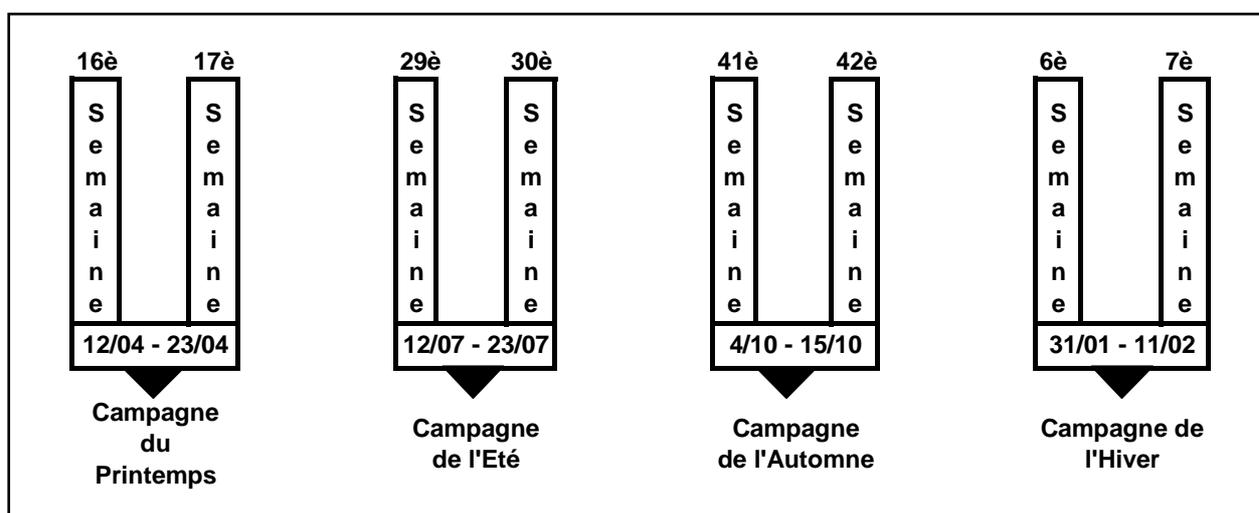
**Tableau 65. Identification des circuits à échantillonner**

Secteur		Arrondissement	Circuit	n°Benne
n°	type			
1	Résidentiel .niv. vie élevé	El Menzah	12:23	B1
2	Résidentiel . niv. vie moyen	Omrane Supérieur	09 :36	B2
3	Résidentiel . niv. vie faible	Hraïria	09 :22	B3
4	Commercial niv.vie moyen	Bab Bhar	00 :49	B4
5	Commercial niv.vie faible	Medina	04 :03	B5

### 3. Planification des opérations d'échantillonnage et de tri :

Afin de saisir la variabilité des déchets ménagers dans le temps, 4 campagnes de caractérisation ont été réparties uniformément sur l'année, tout en évitant les « atypiques » ou les « exceptionnelles » (Ramadan, Fêtes, etc.). Ces 4 campagnes ont été programmées selon le planning suivant, schématisé dans la figure 25 :

- la Campagne du Printemps : du lundi 12/04 au vendredi 23/04/2004,
- la Campagne d'été : du lundi 12/07 au vendredi 23/07/2004,
- la Campagne d'Automne : du lundi 4/10 au vendredi 15/10/2004,
- la Campagne d'Hiver : du lundi 31/01 au vendredi 11/02/2005.

**Figure 25. Planning d'échantillonnage**

Les opérations d'échantillonnage et de tri ont été planifiées sur la base (cf. 2<sup>ème</sup> partie) :

- des contraintes de travail sur la décharge, qui ne permettent pas de trier plus de 3 échantillons par jour,
- des résultats du calcul statistique qui a abouti à l'analyse d'un minimum de 3 bennes par secteur.

Au total, 15 analyses étalées sur environ deux semaines ont été programmées suivant le calendrier présenté dans le tableau 66 :

- les 5 bennes issues des 5 secteurs sont analysées 3 fois par semaine : lundi, mercredi et vendredi,
- les bennes B1, B2 et B5 sont analysées la 1<sup>ère</sup> semaine,
- les bennes B3 et B4 sont analysées la 2<sup>ème</sup> semaine.

Ce même calendrier a été appliqué pour les 4 campagnes.

**Tableau 66. Calendrier d'échantillonnage**

	Lundi	M	Mercredi	J	Vendredi	S	D
<b>1<sup>ère</sup></b>	<b>B4-1</b>		<b>B4-2</b>		<b>B4-3</b>		
<b>Semaine</b>	<b>B2-1</b>		<b>B2-2</b>		<b>B2-3</b>		
	<b>B1-1</b>		<b>B1-2</b>		<b>B1-3</b>		
<b>2<sup>ème</sup></b>	<b>B5-1</b>		<b>B5-2</b>		<b>B5-3</b>		
<b>Semaine</b>	<b>B3-1</b>		<b>B3-2</b>		<b>B3-3</b>		

### III. DEROULEMENT DES CAMPAGNES DE CARACTERISATION

Les campagnes de caractérisation se sont déroulées suivant les 3 phases suivantes (que permettent de visualiser les planches photographiques en annexe.3) :

- une phase d'échantillonnages et de tris réalisée sur le site de la décharge de Borj Chékir : cette phase a comporté les opérations d'échantillonnage des bennes sélectionnées et de tris préalables des déchets échantillonnés ;
- une phase de séchages et de tris réalisée au « Hall Déchets » à la Technopôle de Borj Cedria : cette phase a comporté les opérations de séchages et de tris complémentaires ;
- une phase d'analyses réalisée au laboratoire (à Borj Cedria) : cette phase a comporté les opérations de préparation des échantillons et d'analyses physico-chimiques.

Les opérations d'échantillonnages et de tris (à la décharge) et celles de séchages et d'analyses (au laboratoire) ont dus être effectuées dans 2 sites (Borj Chékir et Borj Cedria) éloignés de 45 km l'un de l'autre. Ce fait a rendu encore plus lourdes les opérations de caractérisation et a nécessité une maîtrise très complexe de la logistique de travail.

### **1. Déroulement des opérations d'échantillonnages et de tris préalables :**

Les opérations d'échantillonnage et de tri se sont déroulées à la décharge de Borj Chékir, sur les aires d'échantillonnage et de tri aménagées à cet effet (cf. Chap.1, 2<sup>ème</sup> partie). Le poids de chaque benne sélectionnée pour l'échantillonnage a été déterminé par pesage au pont bascule de la décharge comme suit :

- sélection de la benne dès son arrivée,
- pesage de la benne à plein,
- pesage de la benne à vide, après le déversement de son contenu sur l'aire d'échantillonnage.

Toutes les bennes ont été échantillonnées suite à leur arrivée à la décharge, à l'exception des bennes B4 et B5 (cf. Tab.65) dont l'échantillonnage n'a pu se faire que le lendemain de leur réception (de nuit) par le personnel de la décharge.

#### **1.1. L'Echantillonnage du contenu des bennes :**

Le plan d'échantillonnage déterminé par le calcul statistique (cf. Chap 2, 2<sup>ème</sup> partie), consiste à prélever à partir de chaque benne 10 fois la masse de 20 kg. Conformément à ce plan, l'échantillonnage des bennes a comporté les opérations suivantes, schématisées dans la figure 26 :

- le déversement du contenu de la benne (lot initial) sur l'aire d'échantillonnage,
- le quartage du lot initial à l'aide d'une chargeuse jusqu'à obtention d'un lot quarté d'environ 200 kg,
- la constitution de 10 échantillons de 20 kg à partir du dernier lot quarté.

Les 10 échantillons de 20 kg ont été ensuite recueillis dans 10 poubelles de 70 litres pour être triés.

#### **1.2. Le Tri préalable des déchets bruts :**

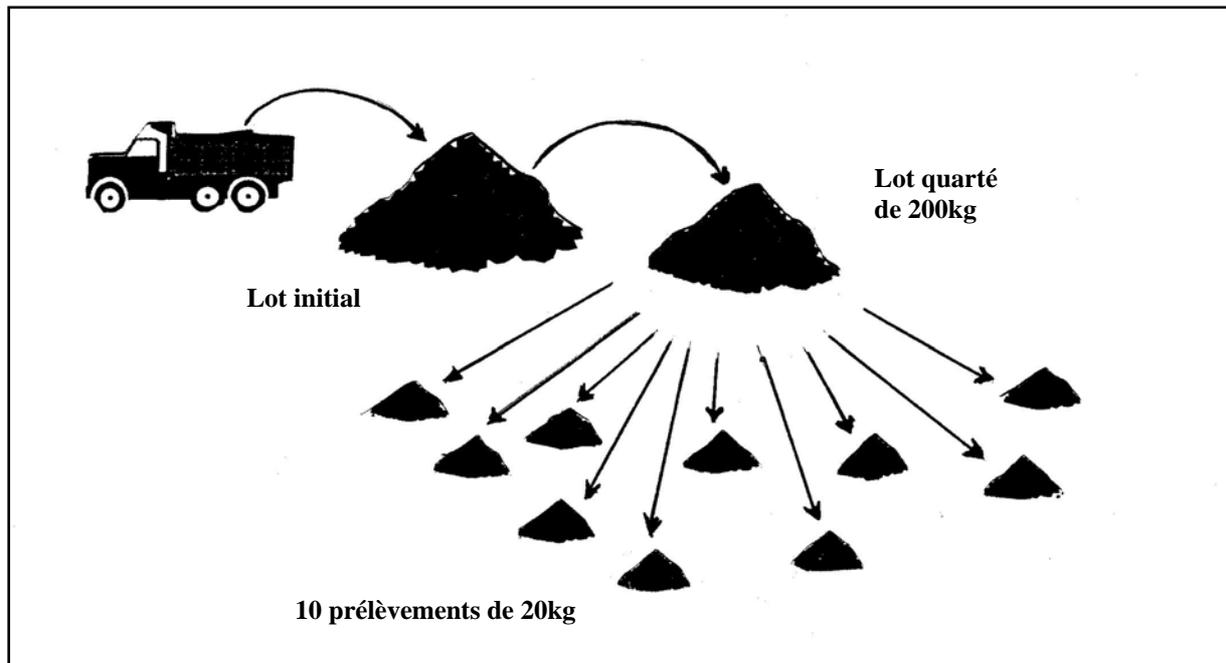
Le tri des déchets échantillonnés est réalisé conformément au mode de tri « adapté » décrit dans la 2<sup>ème</sup> partie (cf. Chapitre 2). La phase de tri préalable constitue la 1<sup>ère</sup> étape de cette méthode de tri. Elle consiste au tri des déchets bruts en tranches granulométriques et en grandes catégories groupées selon le degré de putrescibilité des déchets. Ainsi, chaque prise a été criblée à l'aide de la table de tri et triée manuellement suivant les opérations successives suivantes :

- Le tri des « Gros » ou Criblage primaire à l'aide du bac à mailles rondes 100 mm,
- Le tri des « Moyens » ou Criblage secondaire à l'aide du bac à mailles rondes 20 mm,

- La récupération des fines de granulométrie < 20 mm.

Toutes les catégories triées ont été pesées puis échantillonnées selon les capacités offertes par les étuves de séchage.

**Figure 26.** Protocole d'échantillonnage du contenu des bennes



## 2. Déroulement des opérations de séchage et de tris complémentaires :

Les opérations de séchage et de tris complémentaires se sont déroulées dans le « Hall Déchets » à la Technopôle de Borj Cedria.

### 2.1. La constitution des échantillons pour le séchage :

La constitution des échantillons pour le séchage a nécessité les deux opérations suivantes :

- la préparation et l'identification des sacs nécessaires au conditionnement de chaque catégorie triée,
- le prélèvement des masses à sécher de chaque matériau trié dans la fraction des éléments gros obtenue lors du tri primaire et dans celle des éléments moyens obtenue lors du tri secondaire,
- le transport des sacs vers le lieu de séchage : le « Hall Déchets ».

## 2.2. Le séchage des échantillons :

Le séchage a été réalisé par passage à l'étuve à 80°C jusqu'à masse constante. Il a concerné toutes les catégories triées et a consisté aux opérations suivantes :

- préparation des bacs de séchage en les identifiant selon les références des échantillons,
- pesage de la quantité humide prélevée de chaque catégorie considérée,
- pesage de la quantité sèche de chaque catégorie considérée.

## 2.3. Le tri complémentaire des déchets séchés :

La phase de tri complémentaire constitue la 2<sup>ème</sup> étape du mode de tri « adapté ». Elle consiste au tri complet des déchets secs selon toutes les catégories et sous-catégories pré-définies dans le tableau 15 (cf. Chap.2, 2<sup>ème</sup> partie). Le criblage des déchets est réalisé à l'aide de la table de tri aux mailles 100 et 20 mm pour les fractions des « Gros » et des « Moyens ». Un troisième criblage est réalisé à l'aide d'un tamis normalisé à mailles 6,3 mm pour la récupération de la fraction fine inférieure à 6,3 mm.

## 3. Déroulement des analyses au laboratoire :

La caractérisation physico-chimique des déchets permet de préciser les contraintes des modalités du système choisi pour leur traitement. Les principales déterminations que nous avons réalisées concernent essentiellement le traitement par compostage. Il s'agit :

- des taux de matière organique dans la fraction fermentescible (putrescibles, papiers et cartons) et dans la fraction fine ;
- des teneurs en carbone et en azote dans les putrescibles, les papiers et les cartons;
- des teneurs en métaux lourds dans la fraction fermentescible (putrescibles, papiers et cartons) et dans la fraction fine.

La détermination de ces paramètres physico-chimiques dans les déchets triés a nécessité en préalable une préparation des échantillons secs qui a consisté en leur broyage à l'aide d'un broyeur de déchets non contaminant (centrifuge à billes) et en leur tamisage à l'aide de tamis normalisés (AFNOR).

### 3.1. La détermination du taux de Matière Organique :

La détermination de la matière organique consiste à la calcination de la matière sèche (après passage à l'étuve) pendant environ 48 heures jusqu'à masse constante. La calcination se fait dans un four à moufle à 550°C selon le protocole expérimental décrit dans la norme française NF U44-160 [9]. La détermination de la Matière Organique Totale (MOT) a concerné la fraction fermentescible, composée des putrescibles, des papiers et des cartons ainsi que la fraction fine inférieure à 6,3 mm.

### **3.2. Le dosage du Carbone :**

Le carbone est déterminé par la méthode dite « d'Anne ». Cette méthode repose sur l'oxydation du carbone par un mélange de solution de bichromate de potassium et d'acide sulfurique. Les ions bichromate de couleur rouge sont réduits en ions chromates de couleurs vertes suite à un dosage volumétrique à l'aide d'une solution de sel de Mohr.

Le Carbone a été dosé dans les catégories fermentescibles suivantes : les putrescibles, les papiers et les cartons.

### **3.3. Le dosage de l'Azote :**

L'azote est dosé par la méthode dite « de Kjeldahl » qui détermine la somme de l'azote ammoniacal et de l'azote organique. Le protocole expérimental décrit dans la norme ISO 11261 [10] consiste à une minéralisation de l'azote organique en azote ammoniacal par de l'acide sulfurique en présence d'un activateur de minéralisation, suivie d'une distillation et d'un dosage du distillat par une solution d'acide sulfurique.

La détermination de l'Azote Kjeldahl a concerné la fraction fermentescible, composée des putrescibles, des papiers et des cartons.

### **3.4. La détermination des Métaux Lourds :**

Le dosage des principaux métaux lourds (Cadmium, Chrome, Cuivre, Zinc, Nickel et Plomb) a été réalisé selon la norme française NF X31-151 [12]. Le protocole expérimental de cette méthode repose sur une minéralisation suivie d'un dosage par spectrométrie d'absorption atomique de flamme. La minéralisation consiste à une mise en solution dans l'eau régale, qui est un mélange d'acide chlorhydrique (2/3) et nitrique concentré (1/3) par ébullition sous réfrigérant à reflux.

La détermination des principaux métaux lourds a concerné la fraction fermentescible, composée des putrescibles, des papiers et des cartons ainsi que la fraction fine <6,3 mm.

**4EME PARTIE**

**LA CARACTERISATION DES DECHETS MENAGERS ET ASSIMILES  
DANS LE GRAND TUNIS  
RESULTATS ET INTERPRETATIONS**

**CHAPITRE 1**

**ANALYSE DES RESULTATS  
ET  
PRECISION DES MESURES**

## I. BILAN DES CAMPAGNES D'ÉCHANTILLONNAGE

### 1. Rappel de la stratégie d'échantillonnage :

Pour garantir une représentativité de la réalité, la stratégie d'échantillonnage que nous avons adopté pour la caractérisation des déchets ménagers dans le Grand Tunis, tient compte :

- d'une part, de la variabilité spatio-temporelle de la composition des déchets en s'appuyant sur des enquêtes démographiques et socio-économiques,
- d'autre part, de la variabilité intrinsèque de la composition des déchets en faisant appel aux principes statistiques de l'échantillonnage des déchets.

Pour cela :

- Quatre campagnes de caractérisation ont dû être menées, afin de connaître la variabilité de la composition des déchets durant l'année ;
- Le Grand Tunis a été découpé en 8 secteurs présentant des caractéristiques spatiales et socio-économiques homogènes, afin de réduire la variabilité dans la composition des déchets ;
- Les paramètres d'échantillonnage suivants ont dû être déterminés à partir d'analyses statistiques :
  - o la masse minimale des prélèvements élémentaires, estimée à 20kg,
  - o le nombre minimum des prélèvements élémentaires, estimé à 10,
  - o le nombre minimal d'échantillons à constituer, estimé à 3.

Le plan d'échantillonnage ainsi défini, a été validé dans les 5 secteurs représentatifs du Grand Tunis suivants : 3 secteurs à caractère résidentiel (à niveaux de vie : élevé, moyen et faible) et 2 secteurs à caractère commercial (à niveaux de vie : moyen et faible). Ces 5 secteurs représentent à eux seuls, 94% de la totalité des déchets produits dans le Grand Tunis.

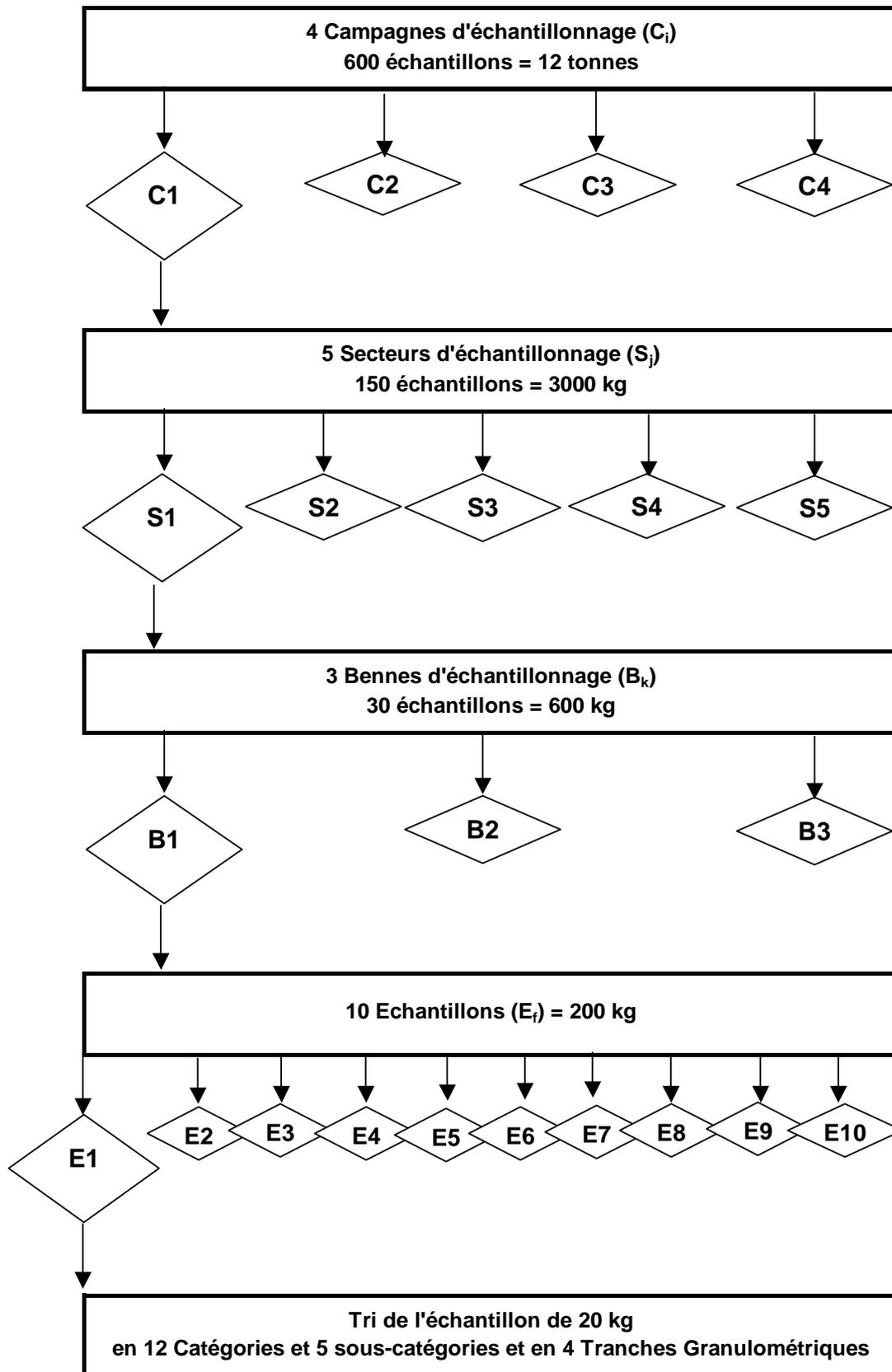
### 2. Bilan des opérations d'échantillonnage et de tri :

Conformément au plan d'échantillonnage, les 4 campagnes de caractérisation des déchets menées dans les 5 secteurs du Grand ont permis la constitution de 600 échantillons de masse élémentaire 20 kg, soit une masse totale de 12 tonnes, dont le prélèvement a été effectué de la manière suivante :

- 3 000 kg de déchets ont été prélevés par campagne d'échantillonnage, correspondant à 150 échantillons ;
- 600 kg ont été prélevés par secteur d'échantillonnage, correspondant à 30 échantillons,
- 200 kg ont été prélevés par benne, correspondant à 10 échantillons de masse unitaire 20kg.

Ce schéma d'échantillonnage est illustré dans la figure 27.

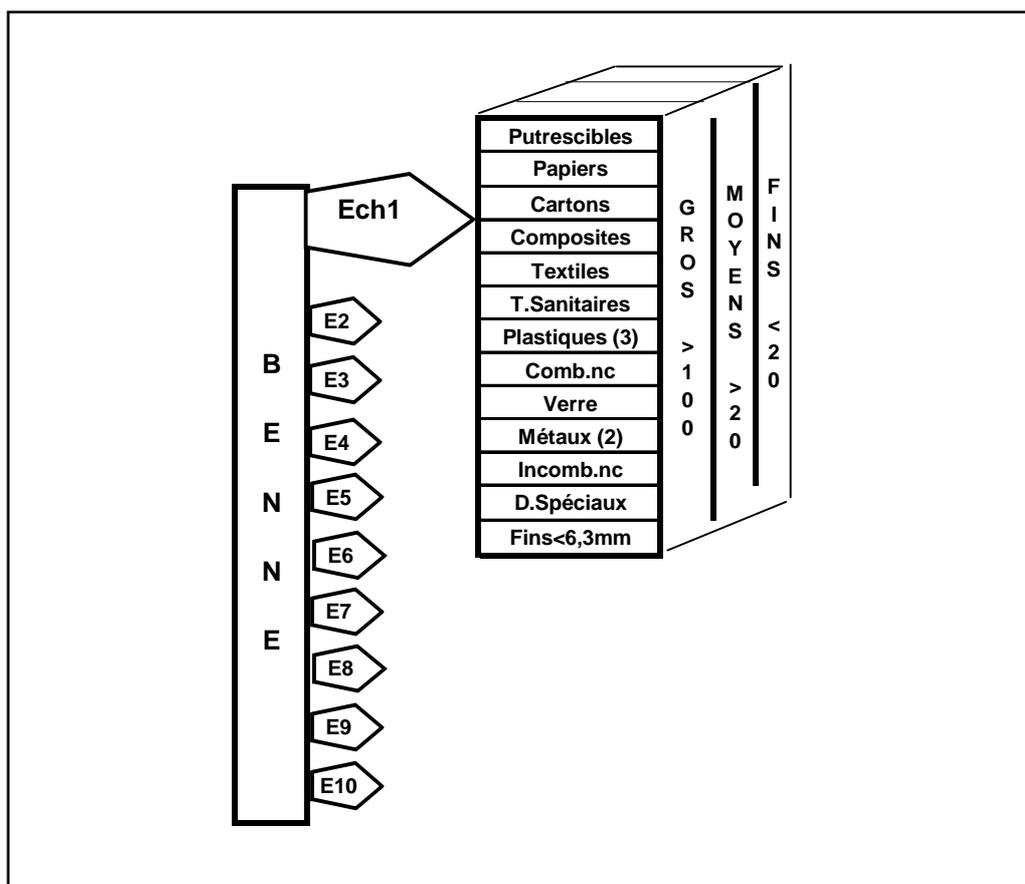
**Figure 27. Schéma d'échantillonnage**



Chaque échantillon élémentaire de 20 kg a été criblé en tranches granulométriques et trié en catégories et sous-catégories conformément à la nomenclature de tri définie dans le chapitre 1 de la 2<sup>ème</sup> partie de ce document (cf. tableau 15). Le tri et le criblage de chaque échantillon élémentaire conduit ainsi à la composition suivante, schématisée dans la figure 28 :

- 12 catégories et 5 sous-catégories réparties en 3 tranches granulométriques : les Gros (>100mm), les Moyens (20-100mm) et les Fins (<20mm).
- une 13<sup>ème</sup> catégorie composée par la fraction très fine <6,3 mm.

**Figure 28. Nomenclature de tri et de criblage des échantillons prélevés**



Les résultats de tris et de criblages sont ainsi obtenus (en 12 catégories, en 5 sous-catégories et en 3 tranches granulométriques, auxquelles s’ajoute la 4<sup>ème</sup> tranche des fines <6,3mm) pour chacun des 600 échantillons prélevés dans les 5 secteurs du Grand Tunis et durant les 4 campagne d’échantillonnage. Au total, 600 résultats sont obtenus comme suit (cf.Fig. 29) :

- 10 résultats par benne échantillonnée,
- 30 résultats par secteur d’échantillonnage,
- 150 résultats par campagne d’échantillonnage.



Les données de compositions moyennes des déchets triés ont permis d'évaluer les gisements de composants valorisables par compostage et par recyclage sur la base de la production annuelle des ménages dans les divers secteurs étudiés. Les caractérisations granulométriques et physico-chimiques ont permis d'apprécier le choix de ces systèmes de traitement.

Tous ces résultats ainsi que leurs interprétations sont présentés dans les chapitres 2, 3, 4 et 5 de cette 4<sup>ème</sup> partie.

### **1. Calcul de la composition des échantillons triés et présentation des résultats :**

Les résultats obtenus à partir du tri et du criblage des 600 échantillons prélevés dans les 5 secteurs du Grand Tunis et durant les 4 campagnes d'échantillonnage, ont été traités de la manière suivante afin d'aboutir à une composition moyenne par secteur et par saison (cf. Fig.29) :

- pour chaque benne, une composition moyenne a été calculée à partir des données provenant des 10 prélèvements élémentaires,
- pour chaque secteur, une composition moyenne a été calculée à partir des compositions moyennes des bennes.

Par ailleurs, afin d'approcher au mieux la composition réelle des déchets échantillonnés, les résultats issus des tris ont été traités de la manière suivante :

- les pertes durant les tris ont été attribuées à des pertes en eau : par évaporation et par vidage des bouteilles pendant le tri,
- les contenus des éléments fins (< 6,3mm) ont été répartis parmi les catégories « Déchets putrescibles » et « Incombustibles non classés » selon les résultats des pertes au feu (cf. Chap 4).

Les résultats ainsi obtenus sont exprimés en pourcentages et en taux de production par habitant.

L'estimation des taux de production par habitant repose sur la composition en pourcentages et sur les taux de production des déchets par habitant dans les secteurs considérés. Par opposition aux pourcentages de composition, les taux de production des déchets par habitant permettent de comparer les résultats par secteur et par saison relativement à chaque composant. Cette approche qui met en évidence l'évolution des taux de production de chaque composant permet d'identifier les taux de production similaires et facilite ainsi la compréhension des similitudes et des différences entre les résultats, qu'ils soient relatifs aux divers secteurs ou aux diverses saisons.

Cette 2<sup>ème</sup> approche permet donc un meilleur jugement de la comparaison des gisements, car si l'on compare les pourcentages de composition, tout changement affectant un composant a pour effet de modifier l'ensemble des pourcentages. La comparaison des taux de production de déchets permet ainsi d'obtenir des résultats plus facilement interprétables vis-à-vis du traitement (décharges, compostage

ou recyclage) et plus facilement utilisables aux fins de planification (par ex. déterminer si la production des déchets est suffisante pour justifier l'instauration d'un programme réaliste et économiquement viable).

La présentation des résultats devra ainsi être liée à leur interprétation en terme de bilans quantitatifs et qualitatifs de production mettant en évidence (ou en fonction) les multiples facteurs de variation. Elle devra être liée aussi et surtout aux conclusions qui doivent être tirées en termes de planification et de choix de traitement. Cette dernière considération doit en effet permettre de justifier ou mieux définir les objectifs et les modalités pratiques des opérations de caractérisation des déchets, dont nous avons montré l'importance et les lacunes dans les PED, au niveau de la première partie de ce document.

## **2. Précision des mesures :**

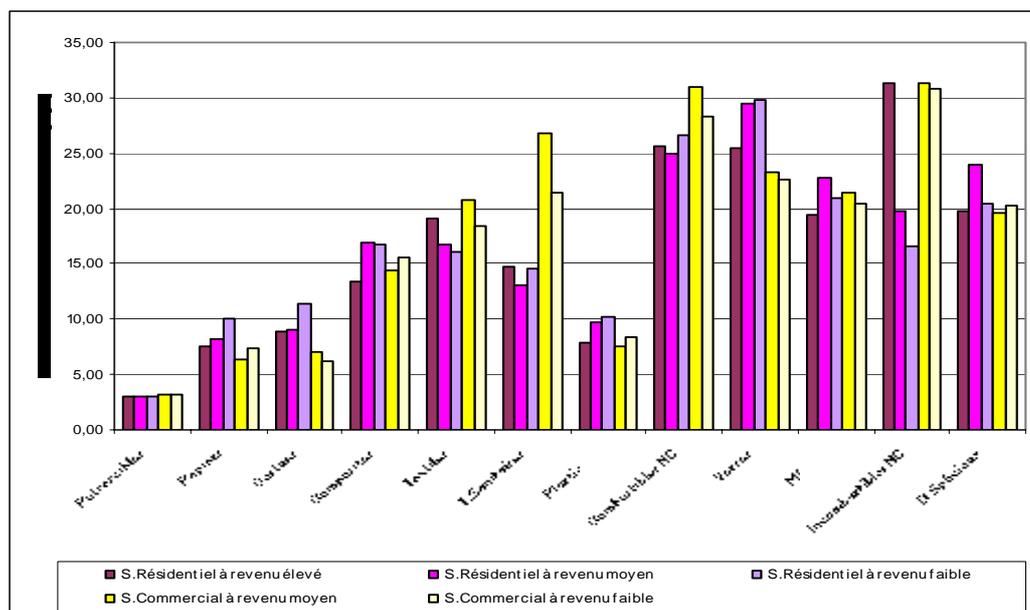
Dans le cas de l'échantillonnage des déchets ménagers, une erreur est inévitablement commise quelque soit le soin apporté à sa réalisation en raison de l'importante hétérogénéité de la matière. Cette erreur dite « fondamentale » a été évaluée pour chaque catégorie des déchets à partir des résultats de « l'analyse test » (cf. Chap.2, 2<sup>ème</sup> partie).

Pour pouvoir apprécier la précision des mesures issues des opérations d'échantillonnage, l'erreur d'analyse minimale engendrée par l'hétérogénéité des fragments dans les échantillons prélevés dans le Grand Tunis, a été calculée pour chaque catégorie des déchets. L'analyse de la variance de cette erreur fondamentale d'échantillonnage présentée dans la figure 30 fait apparaître :

- une très faible hétérogénéité des déchets, avec des erreurs d'échantillonnage de l'ordre de 3%, en ce qui concerne la catégorie des déchets putrescibles,
- une assez faible hétérogénéité des déchets, avec des erreurs d'échantillonnage ne dépassant pas les 11%, en ce qui concerne les papiers, les cartons et les plastiques,
- une forte hétérogénéité des déchets, avec des erreurs d'échantillonnage pouvant atteindre les 31% en ce qui concerne les autres catégories dont principalement : les combustibles non classés, le verre, les métaux, les incombustibles non classés et les déchets spéciaux.

Nous constatons, que les composants de cette dernière catégorie sont présents en faibles –ou même très faibles- quantités dans les déchets, cependant leur importance ne doit pas être sous-estimée dans les choix et les problématiques de traitement.

**Figure 30. Erreurs Fondamentales d’Echantillonnage (en %) dans les secteurs d’échantillonnage**



L’estimation de la précision (en % du poids humide) et de l’erreur fondamentale d’échantillonnage (en %) sont présentées dans les tableaux 67, 68, 69, 70 et 71 en rapport avec la composition moyenne des déchets (en % du poids humide) calculée dans chacun des 5 secteurs échantillonnés.

**Tableau 67. Précision des mesures dans le secteur résidentiel à revenu élevé**

Catégories	Composition moyenne (% humide)	Précision (% humide)	Erreur Fond.(%)
Putrescibles	49,01	1,43	2,95
Papiers	10,28	0,76	7,52
Cartons	8,20	0,70	8,80
Composites	3,61	0,47	13,39
Textiles	3,10	0,57	19,01
T.Sanitaires	5,03	0,70	14,78
Plastiques	6,97	0,53	7,79
Combustibles NC	2,37	0,59	25,54
Verres	2,47	0,62	25,42
Métaux	3,23	0,62	19,46
Incombustibles NC	4,34	1,05	31,38
D.Spéciaux	1,39	0,27	19,81

**Tableau 68. Précision des mesures dans le secteur résidentiel à revenu moyen**

Catégories	Composition moyenne (% humide)	Précision (% humide)	Erreur Fond.(%)
Putrescibles	52,61	1,53	3,06
Papiers	9,02	0,72	8,14
Cartons	7,62	0,69	9,03
Composites	2,36	0,38	16,88
Textiles	3,36	0,63	16,81
T.Sanitaires	5,66	0,77	13,02
Plastiques	3,91	0,42	9,78
Combustibles NC	2,61	0,60	24,96
Verres	1,84	0,53	29,55
Métaux	2,29	0,53	22,75
Incombustibles NC	7,55	1,47	19,72
D.Spéciaux	1,18	0,23	24,01

**Tableau 69. Précision des mesures dans le secteur résidentiel à revenu faible**

Catégories	Composition moyenne (% humide)	Précision (% humide)	Erreur Fond.(%)
Putrescibles	54,48	1,58	2,97
Papiers	6,34	0,60	10,07
Cartons	4,93	0,55	11,44
Composites	2,24	0,37	16,78
Textiles	4,37	0,67	16,13
T.Sanitaires	5,05	0,71	14,62
Plastiques	4,14	0,41	10,15
Combustibles NC	2,19	0,57	26,64
Verres	1,78	0,53	29,78
Métaux	2,80	0,58	20,87
Incombustibles NC	10,20	1,63	16,56
D.Spéciaux	1,48	0,28	20,44

**Tableau 70. Précision des mesures dans le secteur commercial à revenu moyen**

Catégories	Composition moyenne (% humide)	Précision (% humide)	Erreur Fond.(%)
Putrescibles	45,11	1,37	3,10
Papiers	13,70	0,86	6,40
Cartons	13,04	0,85	7,05
Composites	3,06	0,43	14,36
Textiles	3,97	0,58	20,69
T.Sanitaires	1,56	0,40	26,82
Plastiques	7,28	0,54	7,47
Combustibles NC	1,57	0,48	30,94
Verres	2,99	0,67	23,23
Métaux	2,72	0,56	21,49
Incombustibles NC	3,60	1,01	31,32
D.Spéciaux	1,42	0,28	19,60

**Tableau 71. Précision des mesures dans le secteur commercial à revenu faible**

Catégories	Composition moyenne (% humide)	Précision (% humide)	Erreur Fond.(%)
Putrescibles	44,71	1,38	3,15
Papiers	10,78	0,78	7,30
Cartons	16,99	0,95	6,15
Composites	2,59	0,40	15,62
Textiles	4,08	0,63	18,40
T.Sanitaires	2,42	0,50	21,42
Plastiques	5,74	0,48	8,45
Combustibles NC	2,02	0,54	28,31
Verres	3,03	0,68	22,60
Métaux	2,86	0,58	20,48
Incombustibles NC	3,46	1,00	30,84
D.Spéciaux	1,32	0,27	20,34

Les fourchettes des compositions des catégorie des déchets étudiés, calculées à partir de l'estimation des précisions dans les 5 secteurs d'échantillonnage, sont présentées dans le tableau 72.

**Tableau 72. Fourchettes des compositions des déchets (en % du poids humide) dans les secteurs échantillonnés**

Catégories	S. Résid. Niv. élevé	S. Résid. Niv. moyen	S. Résid. Niv. faible	S.Com. Niv. moyen	S.Com. Niv. faible
Putrescibles	44,60 - 47,41	48,12 - 51,10	49,94 - 53,03	40,78 - 43,45	40,36 - 43,06
Papiers	9,52 - 11,04	8,29 - 9,74	5,74 - 6,94	12,83 - 14,56	10,00 - 11,55
Cartons	7,51 - 8,90	6,93 - 8,31	4,38 - 5,48	12,19 - 13,88	16,05 - 17,94
Composites	3,14 - 4,07	1,99 - 2,74	1,86 - 2,61	2,63 - 3,49	2,19 - 2,99
Textiles	2,53 - 3,67	2,73 - 3,99	3,70 - 5,03	3,39 - 4,56	3,46 - 4,71
T.Sanitaires	4,32 - 5,73	4,89 - 6,44	4,34 - 5,76	1,16 - 1,96	1,92 - 2,92
Plastiques	9,34 - 10,61	6,36 - 7,46	6,59 - 7,68	9,64 - 10,93	8,15 - 9,34
Combustibles NC	1,78 - 2,96	2,00 - 3,21	1,63 - 2,76	1,08 - 2,05	1,48 - 2,56
Verres	1,85 - 3,08	1,30 - 2,37	1,25 - 2,31	2,31 - 3,66	2,34 - 3,71
Métaux	2,61 - 3,84	1,76 - 2,82	2,22 - 3,37	2,15 - 3,28	2,28 - 3,45
Incombustibles NC	3,29 - 5,39	6,08 - 9,02	8,57 - 11,83	2,59 - 4,60	2,46 - 4,46
D.Spéciaux	1,12 - 1,67	0,95 - 1,41	1,20 - 1,76	1,14 - 1,69	1,05 - 1,58

Ces compositions montrent que selon les secteurs, les proportions massiques sont comprises, avec un coefficient de sécurité de 95%, entre :

- 40,36 % et 53,03 % pour les putrescibles,
- 5,74 % et 14,56 % pour les papiers,
- 4,38 % et 17,94 % pour les cartons,

- 1,86% et 4,07 % pour les composites,
- 2,53 % et 5,03 % pour les textiles,
- 1,16 % et 6,44 % pour les textiles sanitaires,
- 6,36 % et 10,93 % pour les plastiques,
- 1,08 % et 3,21 % pour les combustibles non classés
- 1,25 % et 3,71 % pour le verre,
- 1,76 % et 3,84 % pour les métaux,
- 2,46 % et 11,83 % pour mes incombustibles non classés,
- 0,95 % et 1,76 % pour les déchets spéciaux.

**4EME PARTIE**

**LA CARACTERISATION DES DECHETS MENAGERS ET ASSIMILES  
DANS LE GRAND TUNIS  
RESULTATS ET INTERPRETATIONS**

**CHAPITRE 2**

**LA COMPOSITION DES DECHETS  
EN CATEGORIES ET SOUS-CATEGORIES ET EN TRANCHES  
GRANULOMETRIQUES**

L'analyse des résultats de la caractérisation des déchets ménagers dans le Grand Tunis selon tous les paramètres de variation (saisons, secteurs, etc.) conduit à un nombre très important d'interprétations. Dans ce chapitre, nous considérerons les conclusions principales et les plus significatives en termes quantitatifs et qualitatifs. On notera complémentirement, que l'ensemble des résultats obtenus permettent toutes les analyses détaillées selon tous les facteurs de variations.

## **I. LA COMPOSITION DES DECHETS MENAGERS ET ASSIMILES EN CATEGORIES ET SOUS-CATEGORIES PAR SECTEURS ET PAR SAISONS**

Conformément à la nomenclature de tri définie dans le chapitre.1 de la 2<sup>ème</sup> partie (cf. tableau 15), les déchets échantillonnés ont été triés en :

- 12 catégories : les déchets Putrescibles, les Papiers, les Cartons, les Composites, les Textiles, les Textiles Sanitaires, les Plastiques, les Combustibles non classés, le Verre, les Métaux, les Incombustibles non classés et les Déchets Spéciaux ;
- 5 sous-catégories : 3 sous-catégories pour les plastiques (les films, les flacons et les bouteilles, les autres) et 2 sous-catégories pour les métaux (les ferreux, les non ferreux).

### **1. La composition des déchets en catégories :**

La composition des déchets par catégorie en pourcentages de la masse humide, selon les saisons et les secteurs échantillonnés, est présentée dans le tableau. 73 et les figures 31, 32, 33 et 34. L'analyse de ces compositions montre des variabilités sectorielles et saisonnières importantes dans les distributions de certaines catégories. Ainsi :

- des variabilités sectorielles sont enregistrées dans le cas des 7 catégories suivantes : les putrescibles, les papiers, les cartons, les textiles sanitaires, les plastiques, le verre et les incombustibles non classés ;
- des variabilités saisonnières sont enregistrées dans le cas des deux catégories suivantes : les putrescibles et les incombustibles non classés.

#### **■ Distribution des déchets putrescibles :**

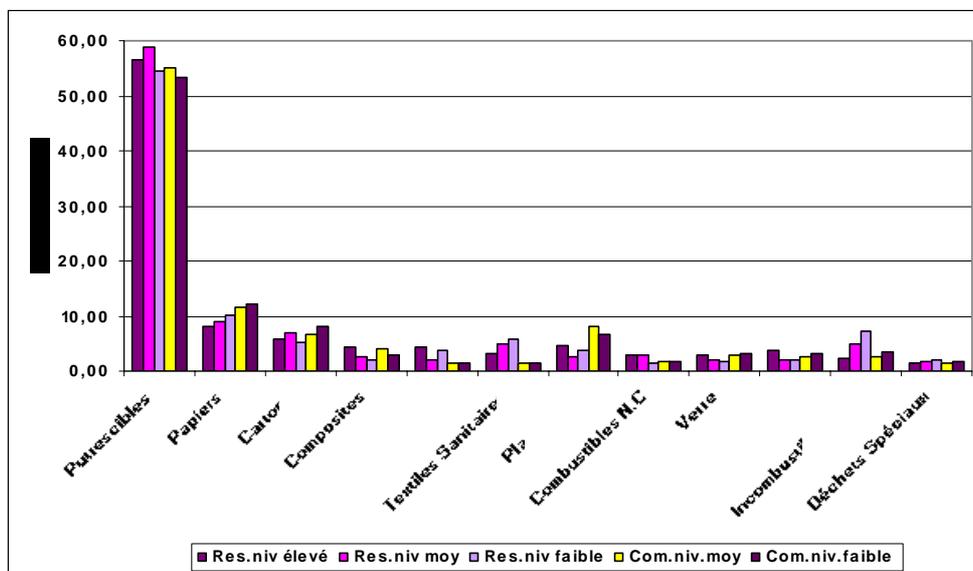
Les déchets putrescibles représentent une part majoritaire dans les déchets ménagers et assimilés du Grand Tunis, variant de 37,5% à 58,7% du poids humide.

- les pourcentages les plus élevés sont enregistrés au Printemps et dans les secteurs à caractère résidentiel,
- les pourcentages les plus faibles sont enregistrées en Automne et dans les secteurs à caractère commercial.

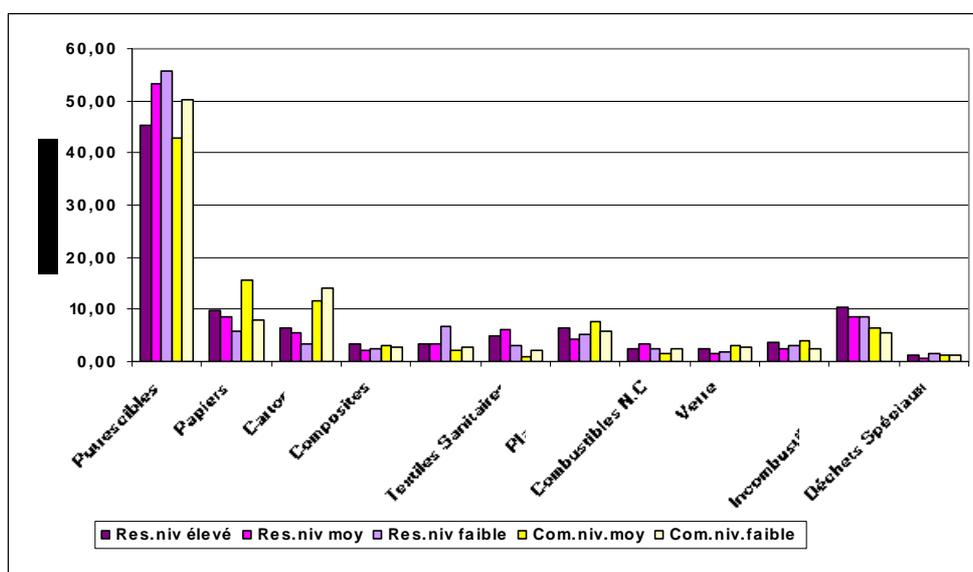
**Tableau 73. Composition des déchets ménagers et assimilés en catégories (en % de la masse humide) selon les saisons et les secteurs échantillonnés**

<b>Printemps</b>					
Catégories	Res.niv élevé	Res.niv moy	Res.niv faible	Com.niv.moy	Com.niv.faible
Putrescibles	56,50	58,71	54,45	55,17	53,41
Papiers	7,99	8,96	10,21	11,51	12,21
Cartons	5,71	6,87	5,31	6,60	8,22
Composites	4,28	2,49	1,96	3,97	3,03
Textiles	4,21	2,15	3,89	1,51	1,44
Textiles Sanitaires	3,22	4,89	5,82	1,54	1,54
Plastiques	4,71	2,65	3,80	8,23	6,71
Combustibles N.C	2,88	2,89	1,51	1,67	1,86
Verre	3,00	1,90	1,75	3,00	3,26
Métaux	3,71	2,02	2,13	2,47	3,30
Incombustibles N.C	2,26	4,81	7,22	2,75	3,43
Déchets Spéciaux	1,54	1,67	1,95	1,57	1,60
	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
<b>Été</b>					
Catégories	Res.niv élevé	Res.niv moy	Res.niv faible	Com.niv.moy	Com.niv.faible
Putrescibles	45,40	53,14	55,70	42,90	50,13
Papiers	9,78	8,71	5,93	15,76	8,04
Cartons	6,57	5,51	3,35	11,58	13,93
Composites	3,25	2,24	2,43	3,02	2,86
Textiles	3,25	3,51	6,87	2,14	2,69
Textiles Sanitaires	4,82	5,97	2,96	0,93	2,07
Plastiques	6,57	4,23	5,29	7,51	5,92
Combustibles N.C	2,52	3,32	2,50	1,40	2,38
Verre	2,57	1,67	1,69	2,97	2,83
Métaux	3,58	2,56	3,02	4,01	2,48
Incombustibles N.C	10,46	8,55	8,64	6,48	5,44
Déchets Spéciaux	1,23	0,60	1,62	1,30	1,23
	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
<b>Automne</b>					
Catégories	Res.niv élevé	Res.niv moy	Res.niv faible	Com.niv.moy	Com.niv.faible
Putrescibles	48,80	42,47	51,31	37,59	37,79
Papiers	12,94	11,23	4,57	11,64	11,58
Cartons	9,81	10,13	5,31	18,88	21,67
Composites	2,33	1,56	1,98	2,39	1,93
Textiles	2,04	3,82	3,03	10,34	7,04
Textiles Sanitaires	4,17	5,78	5,76	2,01	3,27
Plastiques	8,60	4,85	4,49	6,94	4,68
Combustibles N.C	2,59	2,54	2,89	1,51	2,72
Verre	1,86	1,72	1,71	2,02	3,04
Métaux	3,37	1,81	3,12	2,14	2,89
Incombustibles N.C	2,30	12,84	14,15	3,30	2,17
Déchets Spéciaux	1,20	1,25	1,69	1,24	1,21
	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
<b>Hiver</b>					
Catégories	Res.niv élevé	Res.niv moy	Res.niv faible	Com.niv.moy	Com.niv.faible
Putrescibles	45,33	56,12	56,48	44,79	37,51
Papiers	10,43	7,17	4,65	15,88	11,28
Cartons	10,73	7,97	5,76	15,08	24,15
Composites	4,56	3,17	2,57	2,85	2,54
Textiles	2,92	3,95	3,67	1,90	5,16
Textiles Sanitaires	7,89	6,01	5,68	1,75	2,80
Plastiques	8,02	3,90	2,98	6,45	5,67
Combustibles N.C	1,50	1,68	1,87	1,69	1,11
Verre	2,43	2,05	1,98	3,95	2,98
Métaux	2,25	2,78	2,92	2,25	2,78
Incombustibles N.C	2,34	4,00	10,79	1,86	2,80
Déchets Spéciaux	1,60	1,21	0,65	1,55	1,23
	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

**Figure 31.** Variation sectorielle de la composition des déchets (en % de la masse humide) pendant la saison du Printemps



**Figure 32.** Variation sectorielle de la composition des déchets (en % de la masse humide) pendant la saison de l'Eté



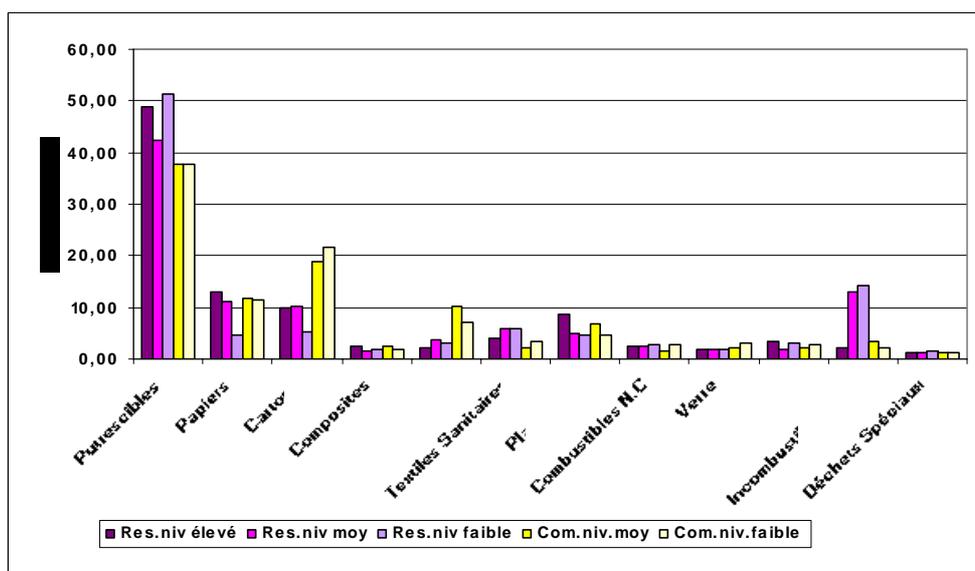
■ **Distribution des papiers :**

Les papiers varient de 4,6 à 15,9% du poids humide. Les pourcentages les plus élevées sont enregistrés dans les secteurs à caractère commercial et dans le secteur résidentiel à revenu élevé.

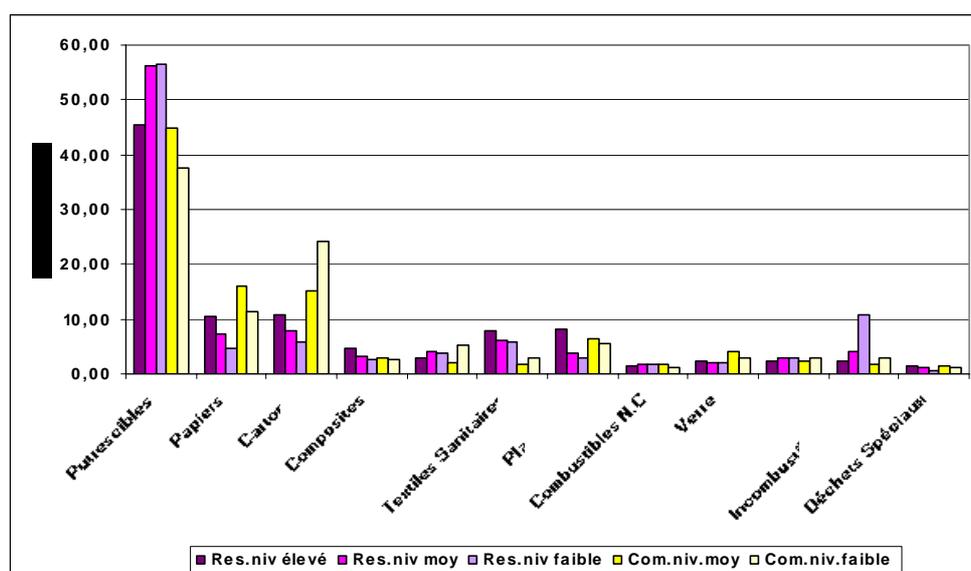
■ **Distribution des cartons :**

Les cartons varient de 3,4 à 24,2% du poids humide. Comme pour les papiers, les pourcentages les plus élevés sont enregistrés dans les secteurs à caractère commercial et dans le secteur résidentiel à revenu élevé.

**Figure 33. Variation sectorielle de la composition des déchets (en % de la masse humide) pendant la saison de l’Automne**



**Figure 34. Variation sectorielle de la composition des déchets (en % de la masse humide) pendant la saison de l’Hiver**



**■ Distribution des composites :**

Les composites varient de 1,6 à 4,6% du poids humide.

**■ Distribution des textiles:**

Les textiles varient de 1,4 à 10,4% du poids humide.

**■ Distribution des textiles sanitaires :**

Les textiles sanitaires varient de 0,9 à 7,9% du poids humide. Les pourcentages les plus élevés sont observés dans les secteurs à caractère résidentiel.

**■ Distribution des plastiques :**

Les plastiques varient de 2,7 à 8,6% du poids humide. Les pourcentages les plus élevés sont enregistrés dans les secteurs à caractère commercial et les secteurs à caractère résidentiel à revenus élevés.

**■ Distribution des combustibles non classés :**

Les combustibles non classés varient de 1,1 à 3,3% du poids humide.

**■ Distribution du verre :**

Le verre varie de 1,7 à 3,9% du poids humide. Les pourcentages les plus élevées sont enregistrés dans les secteurs à caractère commercial et les secteurs à caractère résidentiel à revenus élevés.

**■ Distribution des métaux :**

Les métaux varient de 1,8 à 4% du poids humide.

**■ Distribution des incombustibles non classés :**

Les incombustibles non classés varient de 1,9 à 14% du poids humide. Les pourcentages les plus élevés sont enregistrés principalement :

- en été : dans tous les secteurs échantillonnés ;
- en automne : essentiellement dans les secteurs résidentiels à revenus moyens et faibles ;
- en hiver : dans le secteur résidentiel à revenu faible.

**■ Distribution des déchets spéciaux :**

Les déchets spéciaux varient de 0,6 à 1,9% du poids humide.

## 2. La composition des déchets en sous-catégories :

### 2.1. La composition des Plastiques :

Les plastiques ont été triés en 3 sous-catégories :

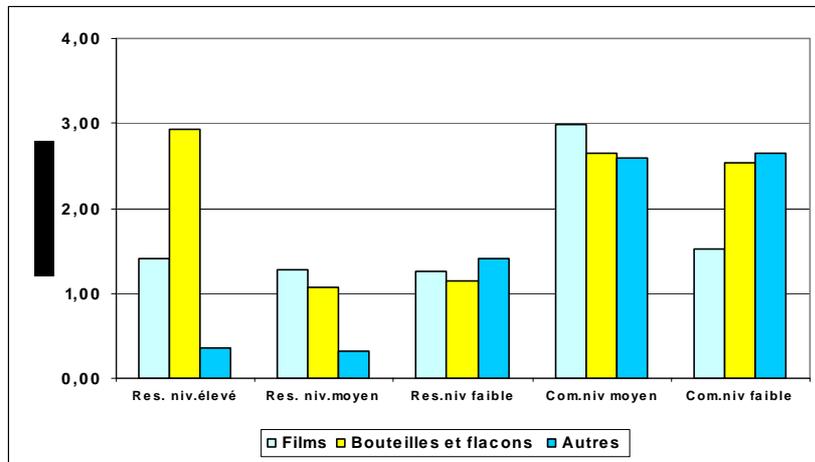
- les Films : il s'agit de films en Polypropylènes tels que les sacs poubelles et les sacs de supermarché,
- les Bouteilles et les Flacons : il s'agit des bouteilles et autres emballages en Polyéthylène Haute Densité (PEHD), en Polyéthylène Téraphtalate (PET) et en Polychlorure de Vinyle (PVC),
- les Autres : il s'agit soit d'emballages en polystyrène ou autres déchets en polystyrène, soit d'autres déchets plastiques tels que les tuyaux, les jouets, etc.

La composition des sous-catégories des plastiques en pourcentages de la masse humide, selon les saisons et les secteurs échantillonnés, est présentée dans le tableau. 74 et les figures 35, 36, 37 et 38.

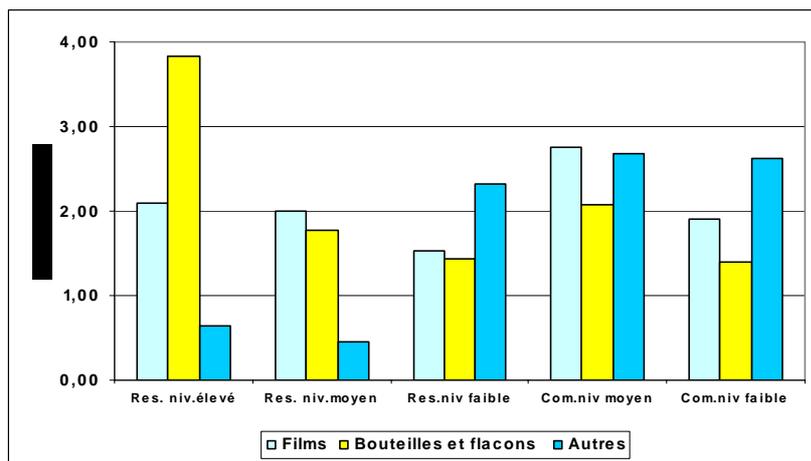
**Tableau 74. Composition des plastiques (en % de la masse humide)  
par secteur et par saison**

<b>Printemps</b>					
<b>Sous-Catégories</b>	Res. niv.élevé	Res. niv.moyen	Res.niv faible	Com.niv moyen	Com.niv faible
Films	1,41	1,27	1,26	2,98	1,52
Bouteilles et flacons	2,93	1,06	1,14	2,65	2,54
Autres	0,36	0,31	1,40	2,60	2,65
	<b>4,71</b>	<b>2,65</b>	<b>3,80</b>	<b>8,23</b>	<b>6,71</b>
<b>Eté</b>					
<b>Sous-Catégories</b>	Res. niv.élevé	Res. niv.moyen	Res.niv faible	Com.niv moyen	Com.niv faible
Films	2,10	2,00	1,53	2,75	1,90
Bouteilles et flacons	3,82	1,78	1,43	2,08	1,39
Autres	0,64	0,45	2,33	2,68	2,63
	<b>6,57</b>	<b>4,23</b>	<b>5,29</b>	<b>7,51</b>	<b>5,92</b>
<b>Automne</b>					
<b>Sous-Catégories</b>	Res. niv.élevé	Res. niv.moyen	Res.niv faible	Com.niv moyen	Com.niv faible
Films	2,34	1,65	1,09	1,22	1,42
Bouteilles et flacons	2,58	1,01	1,95	2,48	1,94
Autres	3,68	2,19	1,44	3,24	1,32
	<b>8,60</b>	<b>4,85</b>	<b>4,49</b>	<b>6,94</b>	<b>4,68</b>
<b>Hiver</b>					
<b>Sous-Catégories</b>	Res. niv.élevé	Res. niv.moyen	Res.niv faible	Com.niv moyen	Com.niv faible
Films	3,37	1,33	1,03	2,23	2,03
Bouteilles et flacons	2,29	0,86	0,70	1,89	1,34
Autres	2,37	1,71	1,24	2,33	2,30
	<b>8,02</b>	<b>3,90</b>	<b>2,98</b>	<b>6,45</b>	<b>5,67</b>

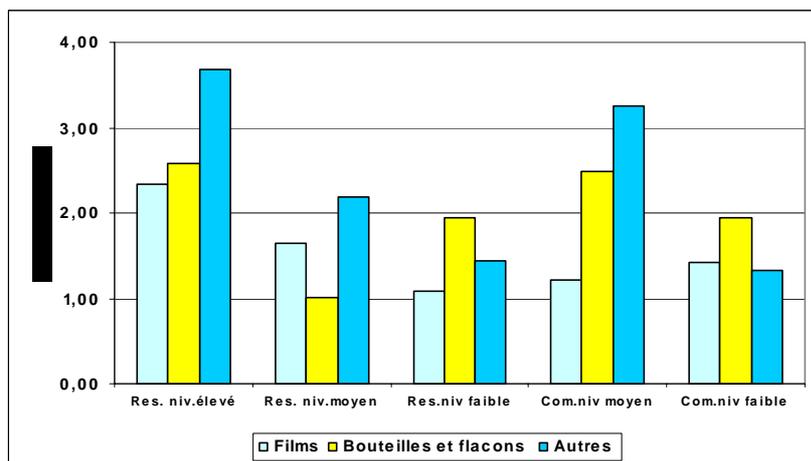
**Figure 35.** Variation sectorielle de la composition des sous-catégories des Plastiques (en % de la masse humide) au Printemps



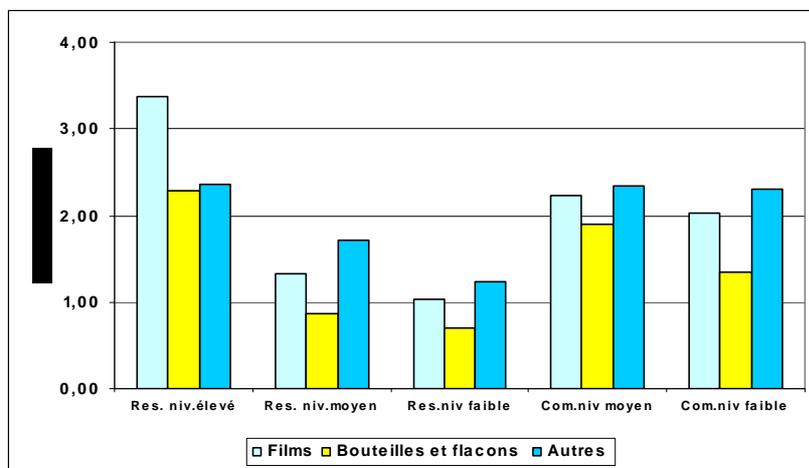
**Figure 36.** Variation sectorielle de la composition des sous-catégories des Plastiques (en % de la masse humide) en Été



**Figure 37.** Variation sectorielle de la composition des sous-catégories des Plastiques (en % de la masse humide) en Automne



**Figure 38. Variation sectorielle de la composition des sous-catégories des Plastiques (en % de la masse humide) en Hiver**



Les plastiques varient en général de 2,7 à 8,6% du poids humide ; les pourcentages les plus élevés étant enregistrés dans les secteurs à caractère commercial et les secteurs à caractère résidentiel à revenus élevés.

Dans ces secteurs, les variabilités sectorielles et saisonnières suivantes sont observées :

- le pourcentage le plus fort de films (2,98%) est enregistré au printemps dans le secteur commercial à revenu moyen,
- le pourcentage le plus fort de bouteilles et de flacons (3,82%) est enregistré en été dans le secteur résidentiel à revenu élevé,
- le pourcentage le plus fort des plastiques « autres » (3,68%) est enregistré en automne dans le secteur résidentiel à revenu élevé.

## 2.2. La composition des Métaux :

Les métaux ont été triés en 2 sous-catégories :

- les métaux non ferreux : il s'agit d'emballages métalliques en aluminium,
- les métaux ferreux : il s'agit d'emballages métalliques ferreux et de déchets métalliques divers (robinets, casseroles, tuyaux, fils de cuivre, ...)

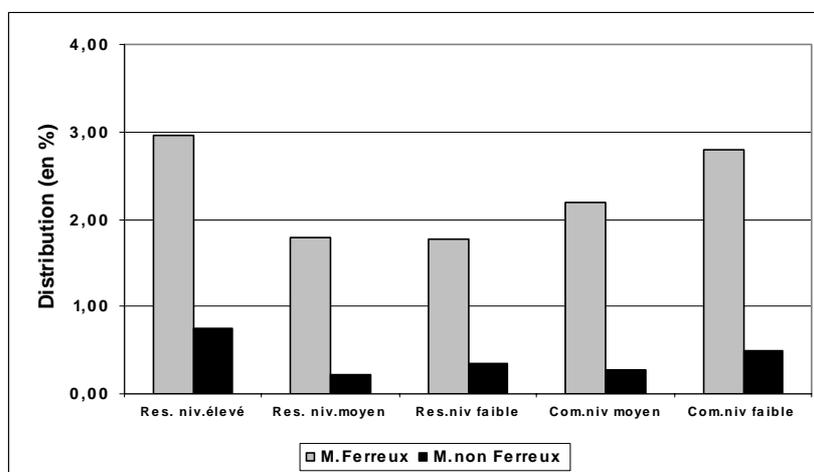
La composition des sous-catégories des métaux en pourcentages de la masse humide, selon les saisons et les secteurs échantillonnés, est présentée dans le tableau. 75 et les figures 39, 40, 41 et 42.

**Tableau 75. Composition des métaux (en % de la masse humide)  
par secteurs et par saisons**

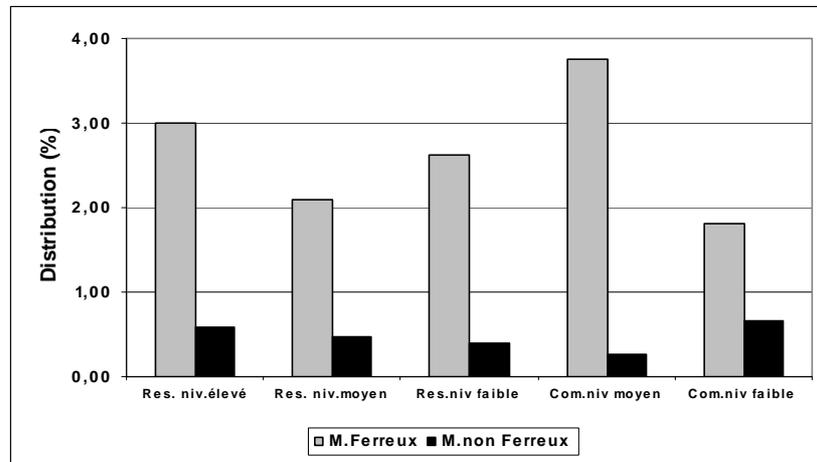
Printemps					
Sous-Catégories	Res. niv.élevé	Res. niv.moyen	Res.niv faible	Com.niv moyen	Com.niv faible
M.Ferreux	2,97	1,80	1,77	2,20	2,80
M.non Ferreux	0,74	0,22	0,36	0,28	0,50
	<b>3,71</b>	<b>2,02</b>	<b>2,13</b>	<b>2,47</b>	<b>3,30</b>
Eté					
Sous-Catégories	Res. niv.élevé	Res. niv.moyen	Res.niv faible	Com.niv moyen	Com.niv faible
M.Ferreux	3,00	2,09	2,62	3,75	1,81
M.non Ferreux	0,58	0,47	0,40	0,26	0,67
	<b>3,58</b>	<b>2,56</b>	<b>3,02</b>	<b>4,01</b>	<b>2,48</b>
Automne					
Sous-Catégories	Res. niv.élevé	Res. niv.moyen	Res.niv faible	Com.niv moyen	Com.niv faible
M.Ferreux	2,58	1,49	2,57	2,10	2,56
M.non Ferreux	0,79	0,32	0,54	0,03	0,33
	<b>3,37</b>	<b>1,81</b>	<b>3,12</b>	<b>2,13</b>	<b>2,89</b>
Hiver					
Sous-Catégories	Res. niv.élevé	Res. niv.moyen	Res.niv faible	Com.niv moyen	Com.niv faible
M.Ferreux	1,73	2,29	2,41	2,21	2,46
M.non Ferreux	0,52	0,49	0,51	0,03	0,32
	<b>2,25</b>	<b>2,78</b>	<b>2,92</b>	<b>2,25</b>	<b>2,78</b>

Les métaux varient de 1,8 à 4% du poids humide. Ils sont composés majoritairement (plus de 80%) de matériaux ferreux. Les très faibles pourcentages d'aluminium (<1%) s'expliquent par leur récupération en amont de la collecte par « les chiffonniers ».

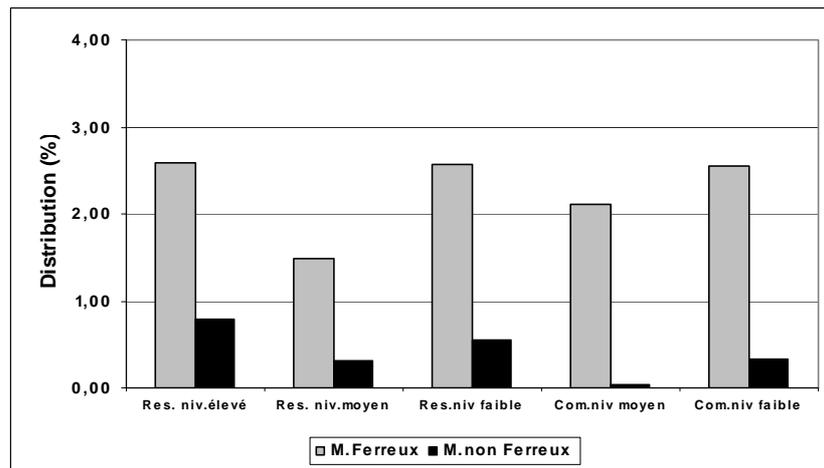
**Figure 39. Variation sectorielle de la composition des sous-catégories des métaux  
(en % de la masse humide) au Printemps**



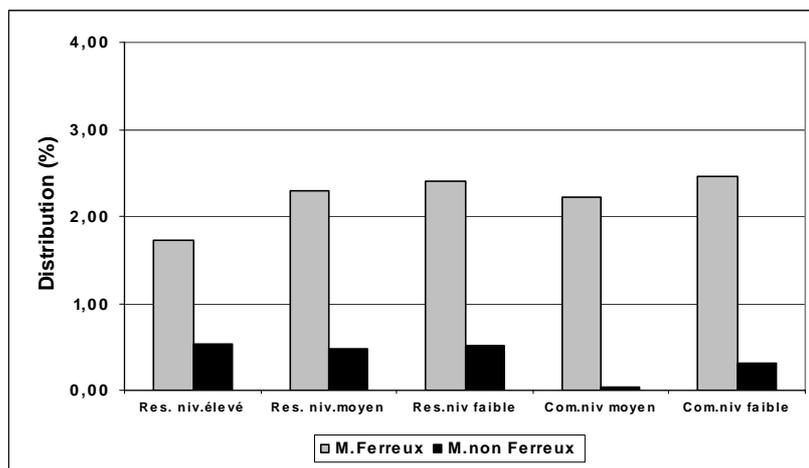
**Figure 40.** Variation sectorielle de la composition des sous-catégories des métaux (en % de la masse humide) en Été



**Figure 41.** Variation sectorielle de la composition des sous-catégories des métaux (en % de la masse humide) en Automne



**Figure 42.** Variation sectorielle de la composition des sous-catégories des métaux (en % de la masse humide) en Hiver



## II. LA COMPOSITION DES DECHETS MENAGERS ET ASSIMILES EN TRANCHES GRANULOMETRIQUES PAR SECTEURS ET PAR SAISONS

Les déchets échantillonnés ont été criblés en 4 tranches granulométriques :

- Trois correspondant à la norme NF XP X 30-408 :
  - la tranche des « Gros » dont la granulométrie est supérieure à 100mm,
  - la tranche des « Moyens » dont la granulométrie est comprise entre 20 et 100mm,
  - la tranche des « Fins » dont la granulométrie est inférieure à 20mm.
- Une tranche pour séparer les « Très Fins » dont la granulométrie est inférieure à 6,3mm.

La composition granulométrique des déchets en pourcentages de la masse humide, selon les saisons et les secteurs échantillonnés, est présentée :

- globalement pour toutes les catégories dans le tableau 76,
- spécifiquement à chaque catégorie dans les figures 42, 43 et 44.

Cette analyse met en évidence les répartitions spécifiques des composants selon leur taille.

### 1. La composition granulométrique globale :

L'analyse des tranches granulométriques des déchets selon les secteurs et les saisons (Tab.76) fait apparaître les compositions granulométriques globales suivantes, qui peuvent être classées comme suit :

**Tableau 76. Composition granulométrique globale en % de la masse humide**

Printemps					
Granulométries	Res.niv. élevé	Res.niv. moyen	Res.niv. faible	Com.niv. moyen	Com.niv. faible
Gros > 100	21,47	21,61	24,24	22,22	24,22
Moyens (20-100)	70,70	69,51	65,25	68,22	63,89
Fins (6,3-20)	8,24	3,26	4,44	4,80	5,73
Très Fins (< 6,3)	4,20	5,62	6,07	4,76	6,16
Eté					
Granulométries	Res.niv. élevé	Res.niv. moyen	Res.niv. faible	Com.niv. moyen	Com.niv. faible
Gros > 100	26,78	22,23	21,22	30,54	18,94
Moyens (20-100)	59,11	67,61	65,80	57,79	71,19
Fins (6,3-20)	10,28	6,38	7,47	5,23	4,74
Très Fins (< 6,3)	3,83	3,78	5,51	6,44	5,13
Automne					
Granulométries	Res.niv. élevé	Res.niv. moyen	Res.niv. faible	Com.niv. moyen	Com.niv. faible
Gros > 100	34,32	26,27	23,45	40,33	35,03
Moyens (20-100)	59,12	58,43	61,32	50,16	57,53
Fins (6,3-20)	4,81	10,71	8,92	4,13	4,23
Très Fins (< 6,3)	3,52	4,59	6,31	5,38	3,21
Hiver					
Granulométries	Res.niv. élevé	Res.niv. moyen	Res.niv. faible	Com.niv. moyen	Com.niv. faible
Gros > 100	34,38	23,18	17,99	28,62	33,34
Moyens (20-100)	57,74	68,74	67,16	61,08	55,44
Fins (6,3-20)	4,48	4,37	7,88	6,59	5,15
Très Fins (< 6,3)	3,67	3,71	6,97	3,71	6,07

- la fraction granulométrique la plus importante est celle comprise entre 20 et 100mm (les Moyens). Elle varie entre 50 à 71% de la masse humide des déchets étudiés ;
- elle est suivie par la fraction granulométrique supérieure à 100mm (les Gros) qui varie en moyenne de 18 à 40% de la masse humide ;
- la fraction granulométrique comprise entre 6,3 et 20mm (les Fins) varie en moyenne de 3 à 11% de la masse humide ;
- la fraction granulométrique inférieure à 6,3mm (les Très Fins) varie en moyenne de 3 à 7% de la masse humide.

## 2. La composition granulométrique par catégories :

La composition granulométrique des déchets par catégories a été calculée dans les 5 secteurs échantillonnés et pour chaque saison. Les moyennes saisonnières de chaque secteur sont présentées dans les figures 43 (pour les Gros), 44 (pour les Moyens) et 45 (pour les Fins). La composition granulométrique des éléments fins (<20mm) a été calculée à partir des données des éléments compris entre 6,3 et 20mm, auxquels ont été intégrés (dans les putrescibles et les incombustibles non classés) les résultats de la calcination des éléments très fins inférieurs à 6,3mm (cf.Chap.4).

### 2.1. La distribution des « Gros » :

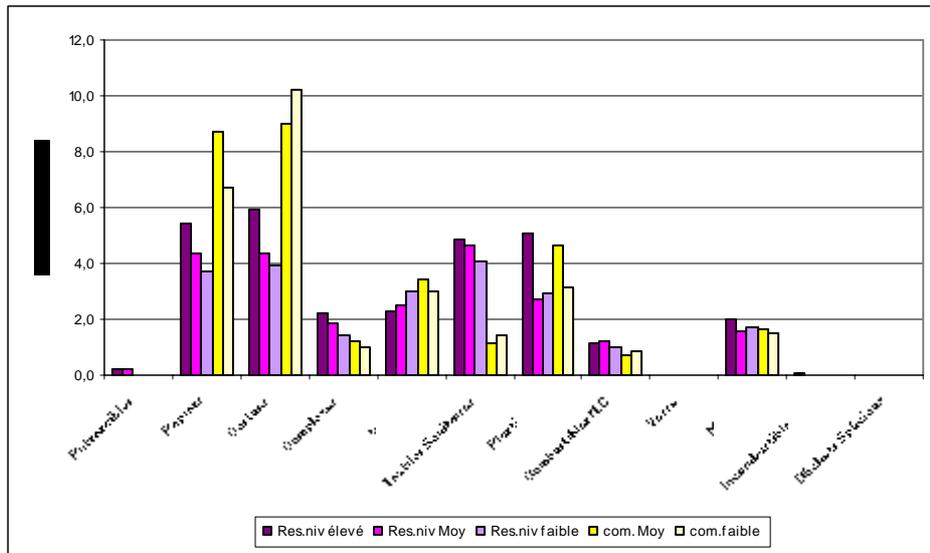
L'analyse de la distribution des tranches granulométriques supérieures à 100mm (les Gros) par catégories fait apparaître (Fig.43) :

- l'absence des 2 catégories suivantes : le verre et les déchets spéciaux,
- une très faible part (<0,5%) des putrescibles et des incombustibles non classés,
- des parts plus ou moins importantes des autres catégories : papiers, cartons, composites, textiles, textiles sanitaires, plastiques, combustibles non classés et métaux.

Certaines de ces catégories présentent de grandes variations sectorielles. Il s'agit :

- des papiers qui varient de 3,7% (dans le secteur résidentiel à revenu faible) à 8,7% (dans le secteur commercial à revenu moyen),
- les cartons qui varient de 4% (dans le secteur résidentiel à revenu faible) à 10,2% (dans le secteur commercial à revenu faible),
- les textiles sanitaires qui varient de 1,1% (dans le secteur commercial à revenu moyen) à 4,9% (dans le secteur résidentiel à revenu élevé),
- les plastiques qui varient de 2,9% (dans le secteur résidentiel à revenu faible) à 5,1% (dans le secteur résidentiel à revenu élevé).

**Figure 43. Composition de la fraction des « Gros » par secteurs (en % de la masse humide)**

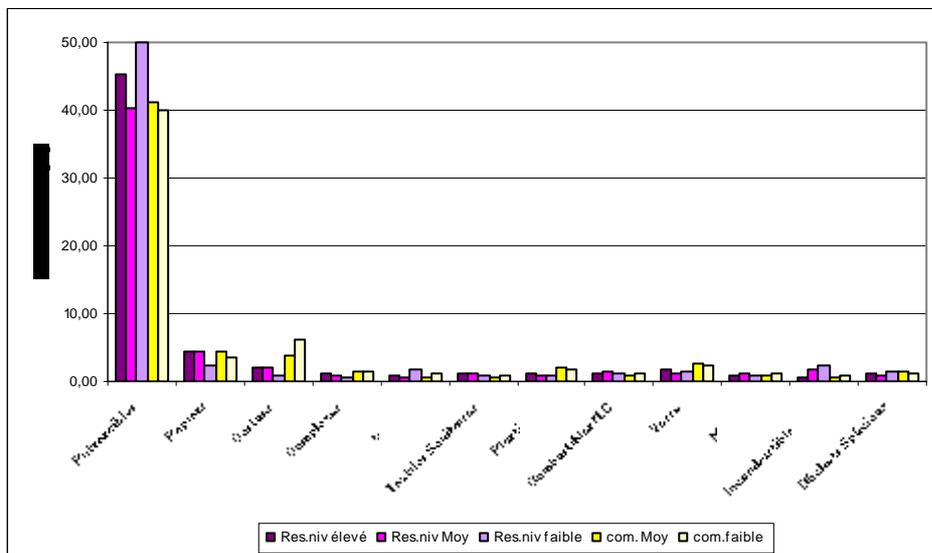


**2.2. La distribution des « Moyens » :**

L’analyse de la distribution des tranches granulométriques comprises entre 20 et 100mm (les Moyens) par catégories fait apparaître (Fig.44) :

- une très faible part (<2,6%) de la majorité des catégories : les composites, les textiles, les textiles sanitaires, les plastiques, les combustibles non classés, le verre, les métaux, les incombustibles non classés et les déchets spéciaux.

**Figure 44. Composition de la fraction des « Moyens » par secteurs (en % de la masse humide)**



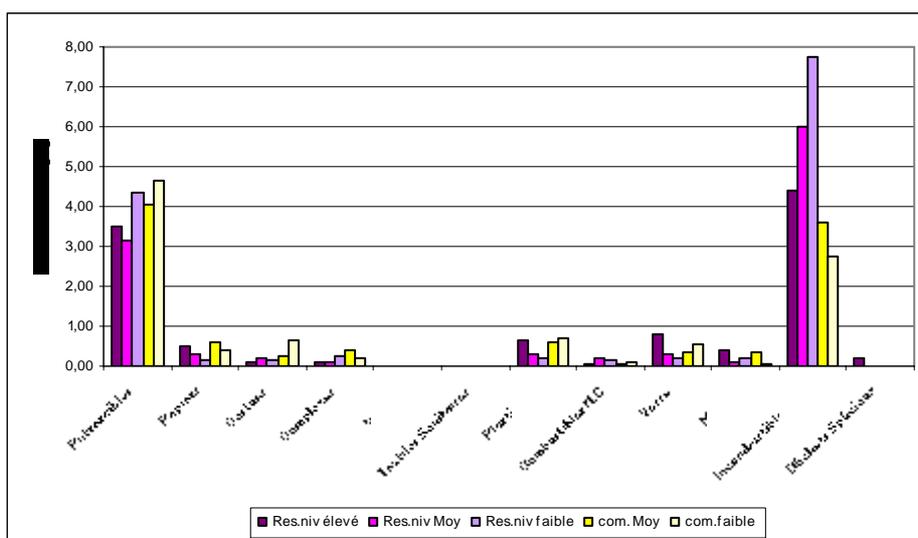
- des parts assez importantes de papiers et de cartons qui varient :
  - de 2,5% (dans le secteur résidentiel à revenu faible) à 4,5% (dans le secteur résidentiel à revenu moyen) pour les papiers,
  - de 0,8% (dans le secteur résidentiel à revenu faible) à 6,1% (dans le secteur commercial à revenu faible) pour les cartons.
- des parts très importantes de putrescibles qui varient de 39,9% (dans le secteur commercial à revenu faible) à 50,1% (dans le secteur résidentiel à revenu faible)

**2.3. La distribution des « Fins » :**

L'analyse de la distribution des tranches granulométriques inférieures à 20mm (les Fins) par catégories fait apparaître (Fig.45) :

- l'absence des 2 catégories suivantes : les textiles et les textiles sanitaires ;
- une très faible part (<1%) des papiers, des cartons, des composites, des plastiques, des combustibles non classés, du verre, des métaux et des déchets spéciaux ;
- des parts importantes de putrescibles et d'incombustibles non classés qui varient :
  - de 3,2% (dans le secteur résidentiel à revenu moyen) à 4,6% (dans le secteur commercial à revenu faible) pour les putrescibles,
  - de 2,8% (dans le secteur commercial à revenu faible) à 7,7% (dans le secteur résidentiel à revenu faible) pour les incombustibles non classés.

**Figure 45. Composition de la fraction des « Fins » par secteurs (en % de la masse humide)**



**4EME PARTIE**

**LA CARACTERISATION DES DECHETS MENAGERS ET ASSIMILES  
DANS LE GRAND TUNIS  
RESULTATS ET INTERPRETATIONS**

**CHAPITRE 3**

**ESTIMATION DES COMPOSANTS VALORISABLES  
PAR  
COMPOSTAGE ET PAR RECYCLAGE**

Parmi les nombreuses interprétations qui justifient la mise en œuvre d'une opération lourde et détaillée telle que la caractérisation menée dans le Grand Tunis, celles concernant l'aptitude des déchets au compostage et celles concernant les possibilités de leur recyclage sont les plus importantes. La manière d'apprécier la qualité des résultats obtenus et la manière de les interpréter, constituent les éléments fondamentaux de la réflexion qui devra viser la justification de la méthode de caractérisation et de ses objectifs.

## **I. ESTIMATION DES COMPOSANTS VALORISABLES PAR COMPOSTAGE**

Les composants des déchets ménagers valorisables par compostage correspondent aux catégories fermentescibles suivantes : les déchets putrescibles, les papiers et les cartons. Les composites ne sont pas pris en compte, car certains ne sont pas totalement fermentescibles. L'estimation de ce gisement est approchée en pourcentages et surtout en taux de production par habitant à partir des résultats des tris par secteurs et par saisons présentés dans le chapitre précédent.

### **1. Estimation des composants fermentescibles en pourcentages par secteurs et par saisons :**

L'estimation des composants fermentescibles en pourcentages de la masse humide par secteurs d'échantillonnage est présentée dans les figures 46 (pour la saison du printemps), 47 (pour la saison de l'été), 48 (pour la saison de l'automne) et 49 (pour la saison de l'hiver).

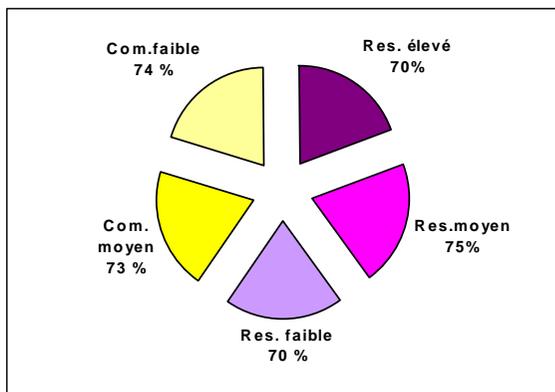
Ces estimations montrent que le gisement varie de 61 à 76% de la masse humide, selon les secteurs et selon les saisons. D'une manière générale :

- les pourcentages les plus forts sont enregistrés au printemps avec : plus de 73% dans les secteurs à caractère commercial et le secteur résidentiel à revenu moyen, et près de 70% dans les secteurs résidentiels à revenus faibles et élevés.
- les pourcentages les plus faibles sont enregistrés en automne avec : près de 71% dans le secteur commercial à revenu faible et le secteur résidentiel à revenu élevé et variant de 61% à 68% dans les secteurs résidentiels à revenus faibles et moyens et le secteur commercial à revenu moyen.

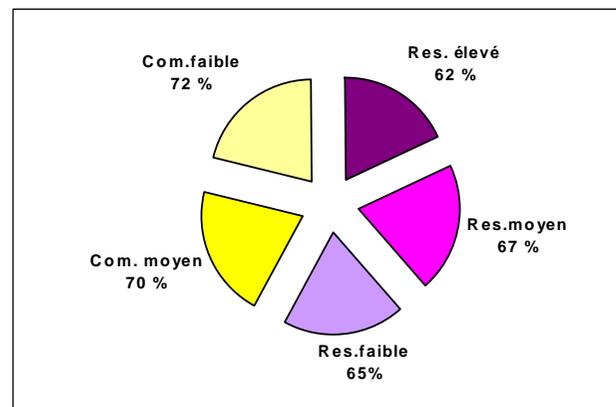
### **2. Estimation des composants fermentescibles en taux de production par habitant par secteurs et par saisons :**

L'estimation des composants fermentescibles en taux de production par habitant permet, contrairement à l'estimation en pourcentages, de comparer les résultats par secteur et par saison relativement à chaque composant. Pour ce faire, cette estimation s'est basée sur les compositions en % pondérées par les taux de production des déchets par habitant précédemment estimés dans les secteurs échantillonnés (cf. Chap.2, 3<sup>ème</sup> partie) et présentés dans le tableau 77.

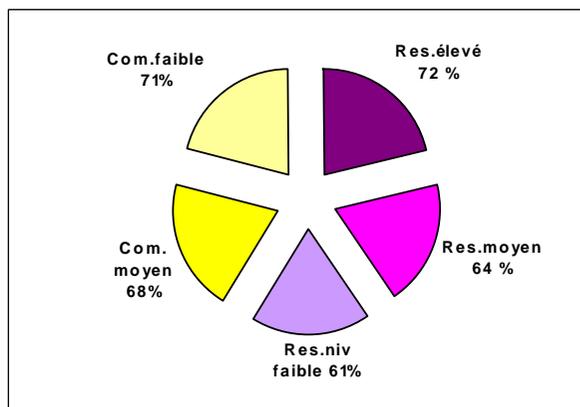
**Figure 46. Estimation des composants Fermentescibles au Printemps**



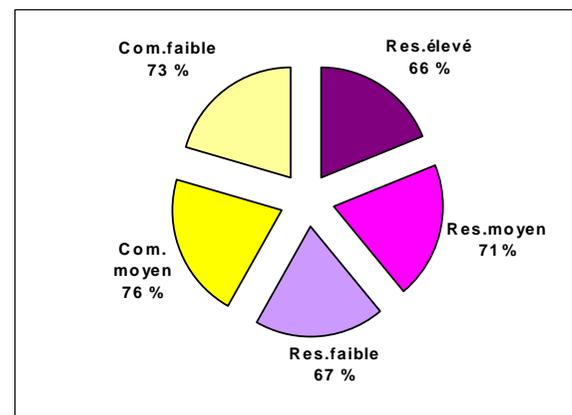
**Figure 47. Estimation des composants Fermentescibles en Été**



**Figure 48. Estimation des composants Fermentescibles en Automne**



**Figure 49. Estimation des composants Fermentescibles en Hiver**



Les productions annuelles de déchets ménagers et assimilés par habitant, calculées à partir de ces ratios, varient de 188kg dans le secteur résidentiel à niveau de vie faible, à 583 kg dans le secteur commercial à niveau de vie moyen (cf. tableau 77).

**Tableau 77. Taux de Production de déchets ménagers et assimilés journaliers et annuels dans les divers secteurs échantillonnés**

Secteurs	Ratios (Kg/hab.jour)	Déchets produits (kg/hab.an)
Résidentiels à revenus élevés	0,83	303
Résidentiels à revenus moyens	0,71	259
Résidentiels à revenus faibles	0,515	188
Commerciaux à revenus moyens	1,598	583
Commerciaux à revenus faibles	1,028	375

**2.1. Calcul des taux de production du gisement global des fermentescibles :**

Les taux de production de déchets fermentescibles, par secteur et par saison, calculés en masse humide produite par habitant et par an sont présentés dans le tableau 78.

**Tableau 78. Taux de Production de déchets ménagers et assimilés et de déchets fermentescibles (en kg/hab.an) dans les divers secteurs échantillonnés**

Secteurs	Déchets produits (kg/hab.an)	D.Fermentescibles (kg/hab.an)
Résidentiels à revenus élevés	303	202
Résidentiels à revenus moyens	259	177
Résidentiels à revenus faibles	188	122
Commerciaux à revenus moyens	583	413
Commerciaux à revenus faibles	375	268

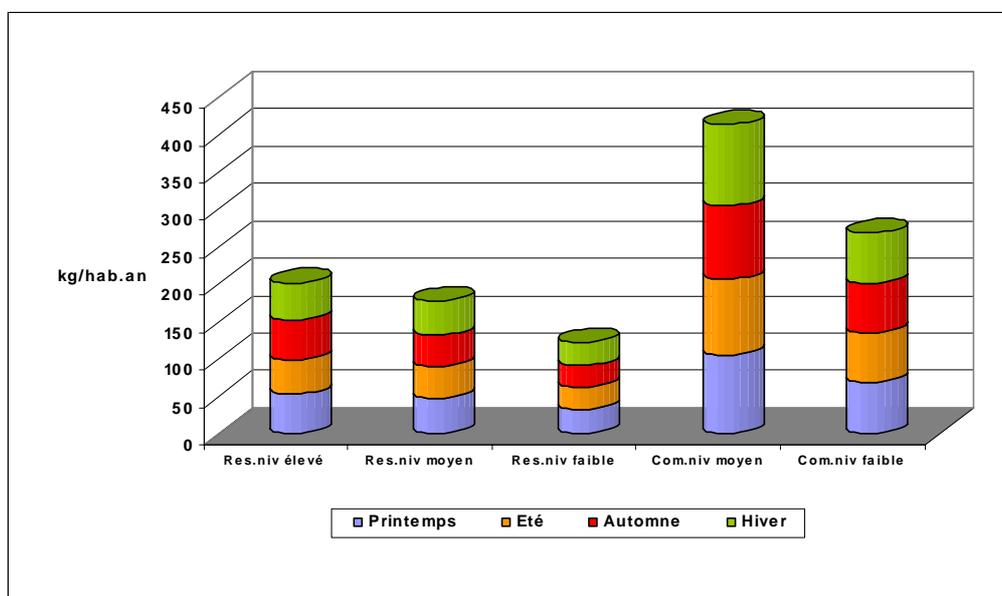
Il apparaît ainsi, que la production annuelle des fermentescibles par habitant varie de 122kg (dans le secteur résidentiel à revenu faible) à 413kg (dans le secteur commercial à revenu moyen). Ces différences sont extrêmement importantes, puisque variant d'un facteur de près de 1 à 4.

On constate par ailleurs, que la production des fermentescibles est la plus importante dans les secteurs commerciaux, ce constat se situant à l'encontre des jugements émis habituellement. De même, la production des fermentescibles dans les secteurs résidentiels à revenus élevés ou moyens est plus élevée que celle dans les quartiers pauvres. Ce constat va à l'encontre des idées reçues mettant en avant la décroissance des fermentescible dans les quartiers aisés, concomitamment avec l'augmentation des fractions recyclables.

Par ailleurs, l'analyse saisonnière des taux de production par habitant (Fig.50) montre que l'on retrouve les mêmes différences globales de production entre les secteurs. On constate ainsi, qu'en général, les taux les plus forts sont enregistrés au printemps et dans les secteurs à caractère commercial, et les taux les plus faibles, sont observés dans les secteurs résidentiels avec une graduation selon les revenus des habitants :

- la production la plus importante (109 kg par habitant) étant enregistrée en hiver dans le secteur commercial à revenu moyen,
- la production la plus faible (28 kg par habitant) étant enregistrée en automne dans le secteur résidentiel à revenu faible.

**Figure 50. Taux de production (en kg/habitant) annuels et saisonniers des déchets fermentescibles dans les secteurs échantillonnés**



## 2.2. Calcul des taux de production du gisement fermentescible par catégories :

Les taux de production correspondant à chacune des catégories des déchets fermentescibles (les putrescibles, les papiers et les cartons) calculés en masse humide par habitant et par an sont présentés dans le tableau 79 et la figure 51.

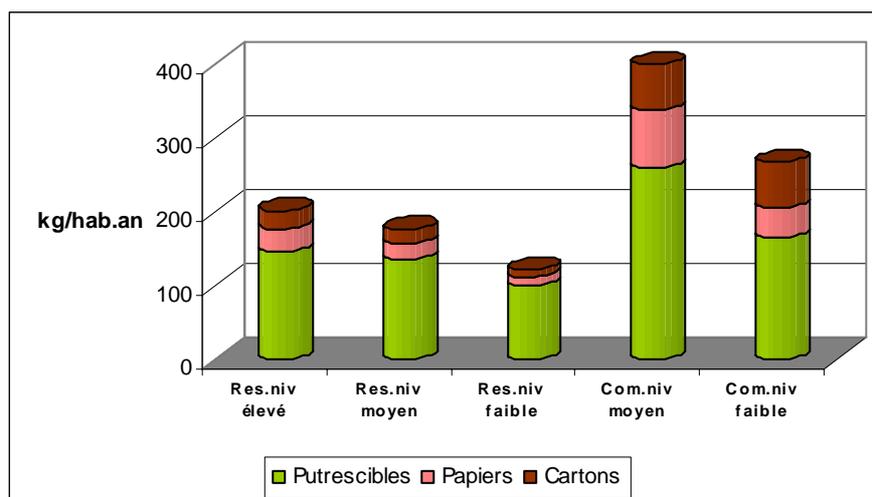
**Tableau 79. Taux de Production de déchets fermentescibles par catégories (en kg/hab.an) dans les divers secteurs échantillonnés**

Catégories	Res.niv élevé	Res.niv moyen	Res.niv faible	Com.niv moyen	Com.niv faible
Putrescibles	146	134	101	260	165
Papiers	31	23	12	79	40
Cartons	25	19	9	75	63
Total Fermentescibles	202	177	122	413	268

Ces taux montrent de très importantes variations sectorielles des catégories fermentescibles. Ils varient :

- dans le cas des déchets putrescibles :
  - o de 101 à 146 kg par habitant dans les secteurs résidentiels
  - o de 165 à 260 kg par habitant dans les secteurs à caractère commercial.
- dans le cas des papiers :
  - o de 12 à 31 kg par habitant dans les secteurs résidentiels
  - o de 40 à 79kg par habitant dans les secteurs à caractère commercial.
- dans le cas des cartons :
  - o de 9 à 25 kg par habitant dans les secteurs résidentiels
  - o de 63 à 75 kg par habitant dans les secteurs à caractère commercial.

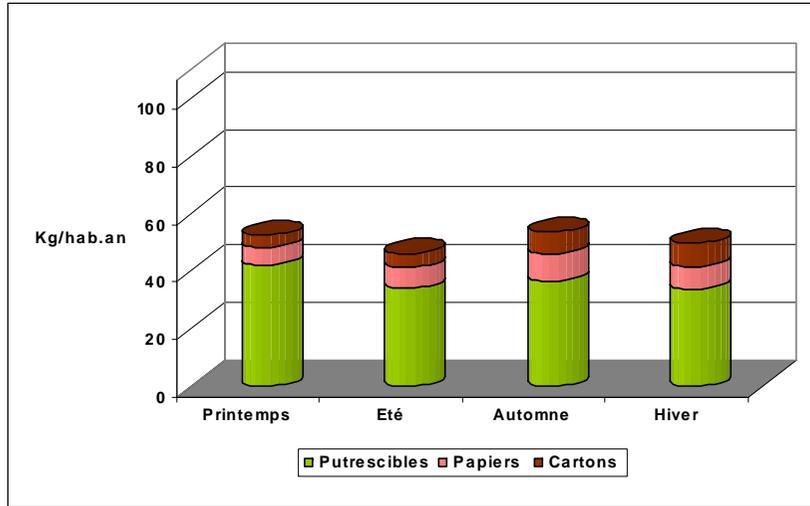
**Figure 51. Taux de production (en kg/hab.an) des catégories fermentescibles dans les secteurs échantillonnés**



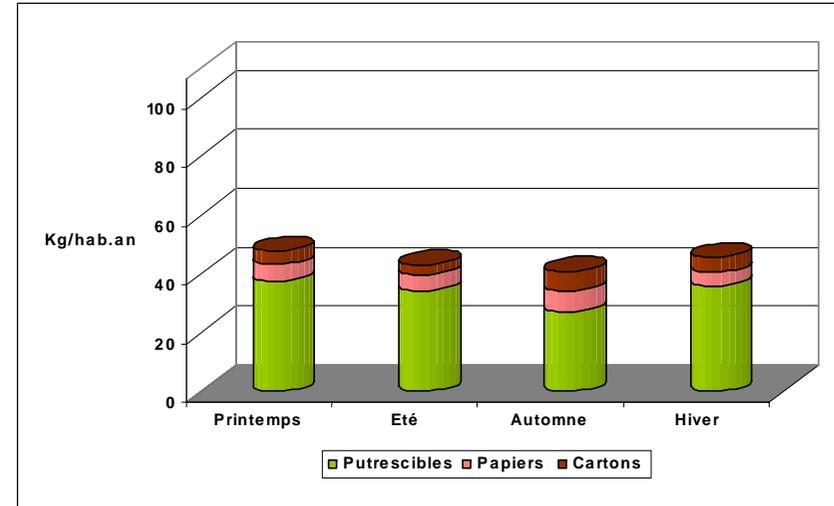
L'analyse des taux de production des catégories fermentescibles, présentés par secteurs et par saisons dans le tableau 80 et schématisés dans les figures 52, 53, 54, 55 et 56, montre que :

- en ce qui concerne les putrescibles :
  - o les plus forts taux de production sont enregistrés au printemps, variant de 25,24 à 42,21 kg par habitant dans les secteurs résidentiels et de 49,41 à 79,35 kg par habitant dans les secteurs à caractère commercial,
  - o les taux les plus faibles sont enregistrés en hiver et en automne, variant de 23,78 à 33,86 kg par habitant dans les secteurs résidentiels et de 34,70 à 54,06 kg par habitant dans les secteurs à caractère commercial,

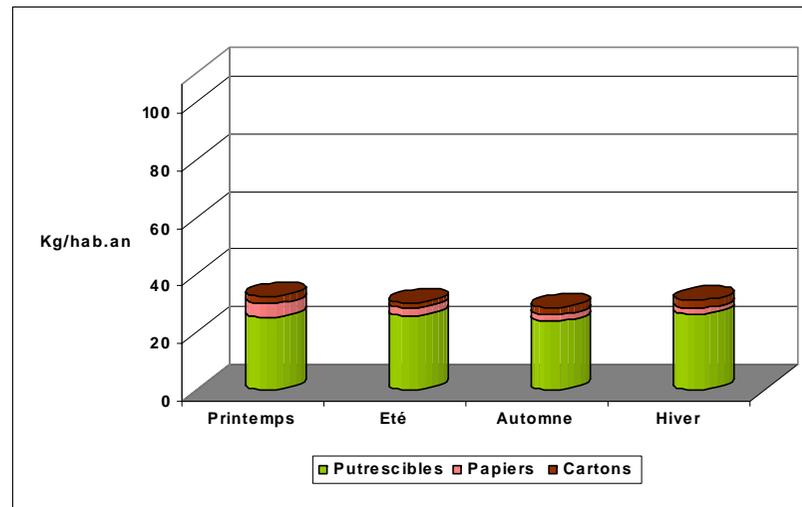
**Figure 52.** Variation saisonnière des taux de production des catégories fermentescibles dans le secteur résidentiel à revenu élevé



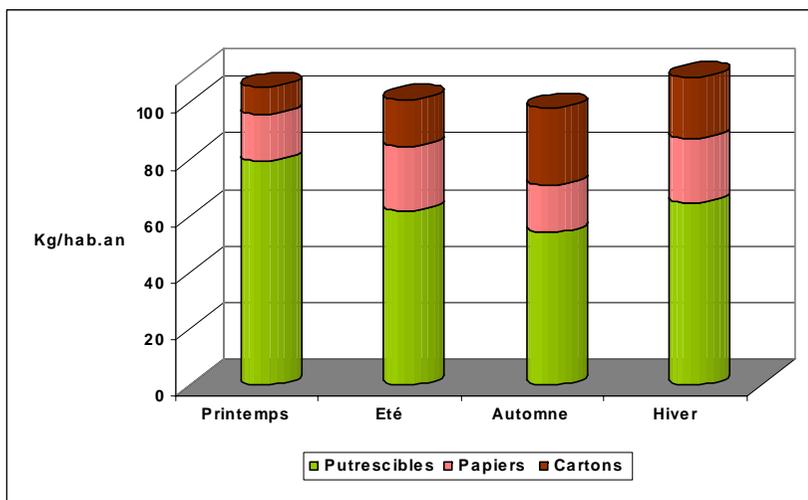
**Figure 53.** Variation saisonnière des taux de production des catégories fermentescibles dans le secteur résidentiel à revenu moyen



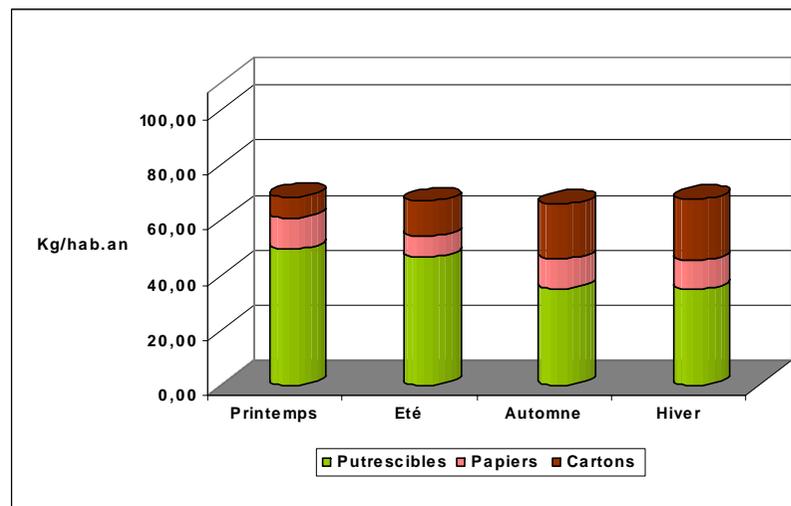
**Figure 54.** Variation saisonnière des taux de production des catégories fermentescibles dans le secteur résidentiel à revenu faible



**Figure 55. Variation saisonnière des taux de production des catégories fermentescibles dans le secteur commercial à revenu moyen**



**Figure 56. Variation saisonnière des taux de production des catégories fermentescibles dans le secteur commercial à revenu faible**



**Tableau 80. Taux de Production (en kg/habitant) annuels et saisonniers des déchets fermentescibles par catégories et par secteurs**

Secteurs	Catégories	Printemps	Eté	Automne	Hiver	année
Rés. niv. élevé	Putrescibles	42,21	33,91	36,45	33,86	146,43
	Papiers	5,97	7,31	9,67	7,79	30,73
	Cartons	4,26	4,91	7,33	8,01	24,51
Rés. niv. moyen	Putrescibles	37,52	33,95	27,14	35,86	134,47
	Papiers	5,72	5,56	7,18	4,58	23,04
	Cartons	4,39	3,52	6,47	5,09	19,47
Rés. niv. faible	Putrescibles	25,24	25,82	23,78	26,18	101,01
	Papiers	4,73	2,75	2,12	2,16	11,76
	Cartons	2,46	1,55	2,46	2,67	9,14
Com. niv. moyen	Putrescibles	79,35	61,70	54,06	64,42	259,52
	Papiers	16,56	22,66	16,74	22,83	78,80
	Cartons	9,50	16,65	27,15	21,69	74,99
Com. niv. faible	Putrescibles	49,41	46,38	34,97	34,70	165,46
	Papiers	11,30	7,43	10,71	10,43	39,88
	Cartons	7,61	12,89	20,05	22,34	62,89

- en ce qui concerne les papiers et les cartons, les plus forts taux de production sont généralement observés en automne et en hiver, variant :
  - o pour les papiers, de 2 à 10 kg par habitant dans les secteurs résidentiels et de 7 à 23 kg par habitant et par an dans les secteurs à caractère commercial,
  - o pour les cartons : de 2 à 8 kg par habitant dans les secteurs résidentiels et de 8 à 27 kg par habitant et par an dans les secteurs à caractère commercial.

## II. ESTIMATION DES COMPOSANTS POTENTIELLEMENT VALORISABLES PAR RECYCLAGE

Les composants des déchets ménagers qui pourraient être potentiellement valorisables par recyclage correspondent aux catégories suivantes : les papiers, les cartons, les textiles, les plastiques, le verre et les métaux. Bien que les papiers-cartons soient une fraction recyclable, et comme cette fraction également fermentescible a été déjà étudiée et comptabilisée dans le gisement valorisable par compostage, l'estimation du gisement potentiellement recyclable s'est limitée aux composants non fermentescibles, c'est-à-dire : les textiles, les plastiques, le verre et les métaux.

Comme pour les composants fermentescibles, l'estimation de ce gisement est approchée en pourcentages et en taux de production par habitant à partir des résultats des tris par secteurs et par saisons (cf.Chap.2). Par ailleurs, il faut souligner qu'une telle estimation a nécessité une détermination précise des composition en matières sèches afin d'éviter tout risque de sur-évaluation des gisements

recyclables par les impuretés (eau et souillures) et par la présence et la diffusion d’humidité à l’intérieure des matières.

**1. Estimation des composants potentiellement recyclables en pourcentages par secteurs et par saisons :**

**1.1. Estimations en pourcentages par rapport à la masse humide :**

L’estimation des composants potentiellement recyclables en pourcentages de la masse humide par secteurs d’échantillonnage est présentée dans le tableau 81.

**Tableau 81. Gisement potentiellement recyclable (en % de la masse humide)**

Saisons	Res niv.élevé	Res niv. moyen	Res.niv faible	Com niv.moyen	Com niv.faible
Printemps	15,63	8,72	11,57	15,21	14,70
Eté	15,97	11,97	16,87	16,63	13,92
Automne	15,87	12,20	12,34	21,44	17,65
Hiver	15,62	12,68	11,55	14,55	16,59

Ce gisement est beaucoup plus important dans les secteurs à caractère commercial (où il varie de 13,9 à 21,4% de la masse humide) que dans les secteurs résidentiels (où il varie de 8,7% à 16,9% de la masse humide).

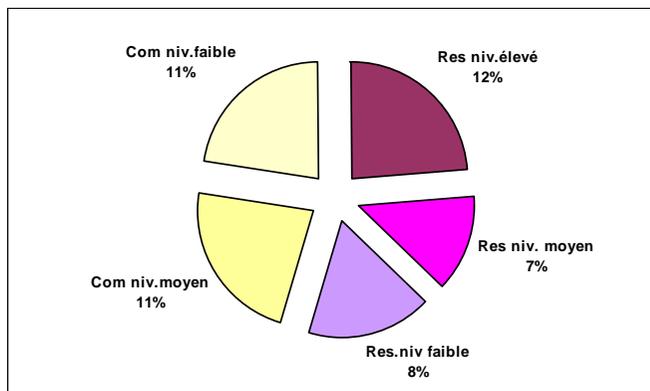
**1.2. Estimations en pourcentages par rapport à la masse sèche :**

La répartition en pourcentages de la masse sèche, des composants non fermentescibles potentiellement valorisables par recyclage, a aussi été calculée à partir des humidités propres à chaque catégorie concernée : les textiles, les plastiques, le verre et les métaux. Les résultats pourront donc faire apparaître les différences dues à la proportion humide. Les résultats de ces estimations sont présentés dans le tableau 82 et dans les figures 57 (pour la saison du printemps), 58 (pour la saison de l’été), 59 (pour la saison de l’automne) et 60 (pour la saison de l’hiver).

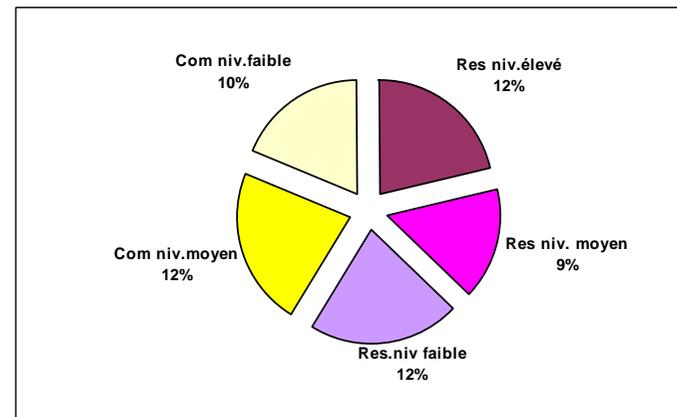
Ces estimations montrent que le gisement varie de 7 à 14% de la masse sèche, selon les secteurs et selon les saisons. D’une manière générale :

- les pourcentages les plus élevés (de 10 à 14%) sont enregistrés dans les secteurs à caractère commercial et le secteur résidentiel à revenu élevé ;
- les pourcentages les plus faibles (de 7 à 9%) sont enregistrés dans les secteurs résidentiels à revenus moyens et faibles.

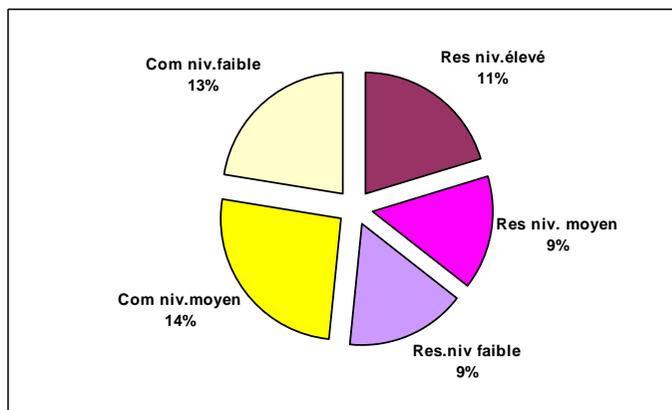
**Figure 57. Estimation des composants potentiellement recyclables au Printemps**



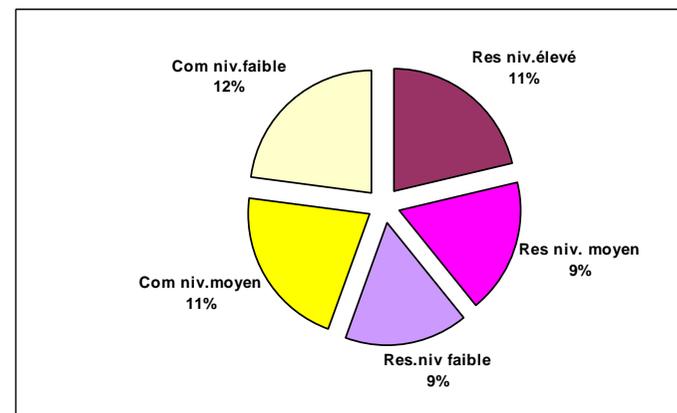
**Figure 58. Estimation des composants potentiellement recyclables en Eté**



**Figure 59. Estimation des composants potentiellement recyclables en Automne**



**Figure 60. Estimation des composants potentiellement recyclables en Hiver**



**Tableau 82. Gisements potentiellement recyclables (en % des masses humides et sèches)**

Saisons	Res.niv.élevé		Res.niv. moyen		Res.niv.faible		Com.niv.moyen		Com.niv.faible	
	%(humide)	%(sec)	%(humide)	%(sec)	%(humide)	%(sec)	%(humide)	%(sec)	%(humide)	%(sec)
Printemps	15,63	11,69	8,72	6,60	11,57	8,31	15,21	11,20	14,70	11,18
Eté	15,97	11,75	11,97	8,65	16,87	11,75	16,63	12,44	13,92	10,30
Automne	15,87	11,40	12,20	8,62	12,34	9,05	21,44	14,43	17,65	12,70
Hiver	15,62	11,15	12,68	9,28	11,55	8,59	14,55	11,06	16,59	12,03

La comparaison des répartitions en % de la masse sèche avec ceux calculés en % de la masse humide (Tab.82), fait apparaître des différences de composition variant de 24 à 33%. On doit donc insister sur le fait que ces différences constatées auraient fortement faussé les évaluations, si les estimations s'étaient limitées aux pourcentages de la masse humide, comme cela est souvent le cas dans les pratiques habituelles.

**2. Estimation des composants potentiellement recyclables en taux de production par habitant par secteurs et par saisons :**

Comme pour les composants fermentescibles, l'estimation des composants non fermentescibles en taux de production par habitant s'est basée sur les compositions en % (de la masse sèche) pondérées par les taux de production des déchets par habitant (cf.Tab 77), qui va effectivement permettre d'évaluer les quantités produites dans chaque secteur.

**2.1.Calcul des taux de production du gisement global :**

Les taux de production de déchets potentiellement recyclables, calculés en masse sèche par habitant et par an sont présentés selon les secteurs et les saisons dans le tableau 83. Il apparaît ainsi, que la production annuelle de ces composants varie de 18 kg par habitant (dans le secteur résidentiel à revenu faible) à 73 kg par habitant (dans le secteur commercial à revenu moyen). Comme pour les fermentescibles, ces différences sont extrêmement importantes, puisque variant d'un facteur de près de 1 à 4.

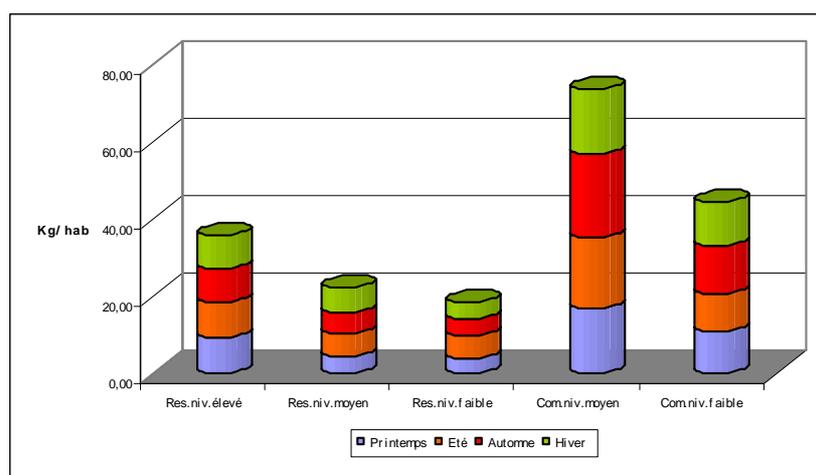
**Tableau 83. Taux de Production de déchets ménagers et assimilés et de déchets potentiellement recyclables (en kg/hab.an) dans les divers secteurs échantillonnés**

Secteurs	Déchets produits (kg/hab.an)	D.pot.Recyclables (kg/hab.an)
Résidentiels à revenus élevés	303	36
Résidentiels à revenus moyens	259	22
Résidentiels à revenus faibles	188	18
Commerciaux à revenus moyens	583	73
Commerciaux à revenus faibles	375	44

Par ailleurs, l'analyse saisonnière des taux de production par habitant (Fig 61), montre que :

- la production la plus importante (22 kg par habitant) est enregistrée en automne dans le secteur commercial à revenu moyen,
- la production la plus faible (4 kg par habitant) est enregistrée au printemps dans le secteur résidentiel à revenu faible.

**Figure 61. Taux de production (en kg/habitant) annuels et saisonniers des déchets potentiellement recyclables dans les secteurs échantillonnés**



D'une manière générale, les plus forts taux de production des composants potentiellement recyclables sont enregistrés en automne en ce qui concerne les secteurs à caractère commercial et en été pour ce qui est des secteurs résidentiels.

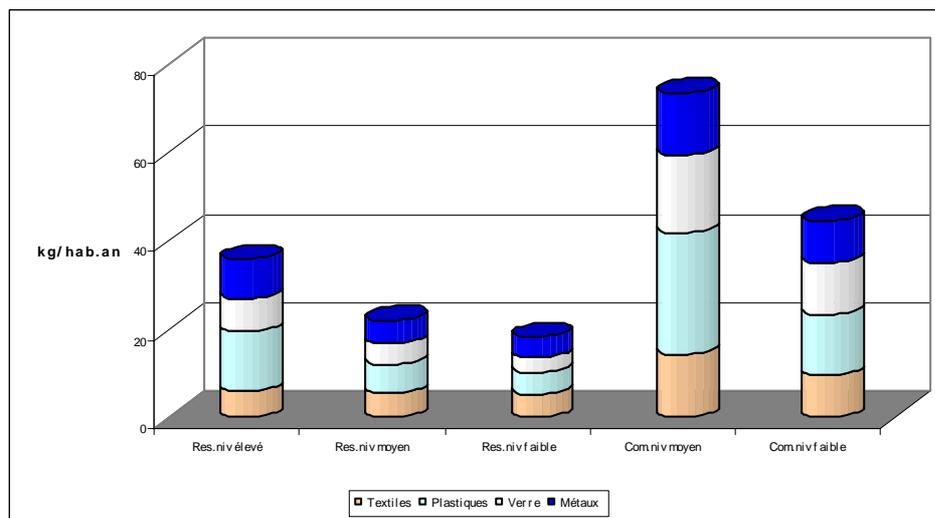
## 2.2. Calcul des taux de production du gisement par catégories :

Les taux de production correspondant à chacune des catégories des déchets non fermentescibles potentiellement recyclables (les textiles, les plastiques, le verre et les métaux) calculés en masse sèche par habitant et par an sont présentés dans le tableau 84 et la figure 62.

**Tableau 84. Taux de Production de déchets potentiellement recyclables par catégories (en kg/hab.an) dans les divers secteurs échantillonnés**

Catégories	Res.niv élevé	Res.niv moyen	Res.niv faible	Com.niv moyen	Com.niv faible
Textiles	6	5	5	14	9
Plastiques	14	7	5	27	14
Verre	8	5	3	18	12
Métaux	9	5	5	14	10
Total	36	22	18	73	44

**Figure 62. Taux de production (en kg/hab.an)**  
des catégories potentiellement recyclables dans les secteurs échantillonnés



Ces taux montrent de très importantes variations des catégories concernées, selon les secteurs et les revenus des populations.

- dans le cas des textiles, ces taux :

- sont de l'ordre de 5 kg par habitant et par an dans les secteurs résidentiels
- varient de 9 à 14 kg par habitant et par an dans les secteurs à caractère commercial.

- dans le cas des plastiques, ces taux varient :

- de 5 à 13 kg par habitant et par an dans les secteurs résidentiels (avec une graduation selon le niveau de vie),
- de 13 à 26 kg par habitant et par an dans les secteurs à caractère commercial.

- dans le cas du verre, ces taux varient :

- de 3 à 7 kg par habitant et par an dans les secteurs résidentiels,
- de 11 à 17 kg par habitant et par an dans les secteurs à caractère commercial.

- dans le cas des métaux, ces taux sont de l'ordre :

- de 5 kg par habitant et par an dans les secteurs résidentiels à revenus faibles et moyens,
- de 9 kg par habitant et par an dans le secteurs résidentiel à revenu élevé et dans le secteur commercial à faible revenu,
- de 14 kg par habitant et par an dans le secteur commercial à revenu moyen.

L'analyse des taux de production des catégories potentiellement recyclables, présentés dans le tableau 85, montre que les plus fortes productions sont enregistrées dans le secteur commercial à revenu moyen, avec des taux saisonniers de l'ordre :

- de 7,7 kg par habitant pour les plastiques,
- de 4,5 kg par habitant pour le verre,
- de 3,2 kg par habitant pour les métaux,
- de 1,98 kg par habitant pour les textile, avec un pic de 9,3 kg par habitant en automne.

**Tableau 85. Taux de Production (en kg/habitant) annuels et saisonniers des déchets potentiellement recyclables par catégories et par secteurs**

Secteurs	Catégories	Printemps	Eté	Automne	Hiver	année
Res.niv. élevé	Textiles	1,96	1,51	0,95	1,36	5,79
	Plastiques	2,29	3,20	4,19	3,91	13,59
	Verre	2,31	1,98	1,43	1,87	7,58
	Métaux	2,52	2,43	2,29	1,53	8,77
Res.niv. moyen	Textiles	0,86	1,40	1,52	1,58	5,35
	Plastiques	1,10	1,76	2,02	1,63	6,51
	Verre	1,25	1,10	1,13	1,35	4,83
	Métaux	1,17	1,49	1,05	1,62	5,33
Res.niv. faible	Textiles	1,13	1,99	0,88	1,06	5,05
	Plastiques	1,15	1,60	1,36	0,90	5,00
	Verre	0,84	0,81	0,82	0,94	3,40
	Métaux	0,90	1,27	1,32	1,23	4,72
Com.niv. moyen	Textiles	1,35	1,92	9,28	1,71	14,26
	Plastiques	7,72	7,04	6,51	6,05	27,32
	Verre	4,44	4,40	2,99	5,85	17,68
	Métaux	3,24	5,25	2,79	2,94	14,22
Com.niv. faible	Textiles	0,83	1,56	4,06	2,98	9,43
	Plastiques	4,05	3,57	2,82	3,42	13,86
	Verre	3,11	2,70	2,90	2,84	11,53
	Métaux	2,78	2,09	2,43	2,34	9,64

### 2.3. Calcul des taux de production du gisement par sous-catégories :

Les sous-catégories des composants potentiellement recyclables sont :

- les 3 sous-catégories suivantes des plastiques : les films, les bouteilles et les flacons (en PVC, PET et PEHD) et les autres ;
- les 2 sous-catégories suivantes des métaux : les métaux ferreux et les métaux non ferreux.

Les taux de production correspondant à chacune de ces sous-catégories ont été calculés à partir des estimations de ce gisement en pourcentages de la masse humide (cf.Chap.2) traduites en masses sèches.

#### 2.3.1. Calcul des taux de production des sous-catégories des plastiques :

Les taux de production des sous-catégories des plastiques, calculés en masse sèche par habitant et par an, selon les secteurs échantillonnés, sont présentés dans le tableau 86 et la figure 63.

**Tableau 86. Taux de Production des plastiques par sous-catégories  
(en kg/hab.an) dans les divers secteurs échantillonnés**

Catégories	Res.niv élevé	Res.niv moyen	Res.niv faible	Com.niv moyen	Com.niv faible
Films	4,5	2,6	1,5	8,6	4,1
Bouteilles-Flacons	5,7	2,0	1,6	8,5	4,4
Autres	3,4	1,9	1,9	10,2	5,4
Total Plastiques	13,6	6,5	5,0	27,3	13,9

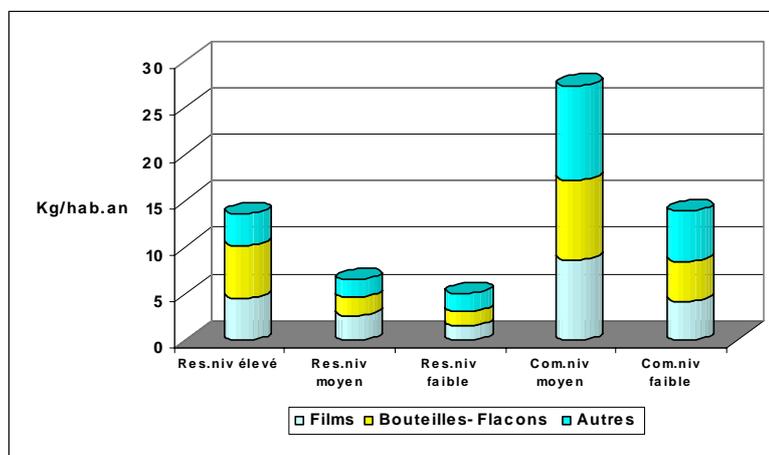
Il apparaît ainsi que les plus forts taux de production des plastiques sont enregistrés dans les secteurs à caractère commercial et le secteur résidentiel à revenu élevé, variant :

- de 4 à 9 kg par habitant et par an pour les films ainsi que pour les bouteilles et les flacons,
- de 3 à 10 kg par habitant et par an pour les autres.

L'analyse saisonnière de ces taux, présentée dans le tableau 87, montre que :

- dans le secteur résidentiel à revenu élevé, c'est en été et au printemps que les taux les plus forts de flacons et de bouteilles sont observés contrairement aux films dont les productions sont plus importantes en automne et en hiver,
- dans les secteurs à caractère commercial, les plus forts taux de films sont plutôt observés en été, alors que les flacons n'enregistrent pas de variations saisonnières notables.

**Figure 63. Taux de production (en kg/hab.an)  
des sous-catégories des plastiques dans les secteurs échantillonnés**



**Tableau 87. Taux de Production (en kg/habitant) annuels et saisonniers des plastiques par sous-catégories et par secteurs**

Secteurs	Catégories	Printemps	Eté	Automne	Hiver	année
Res.niv.élevé	Films	0,69	1,02	1,14	1,64	4,49
	Bouteilles et flacons	1,43	1,86	1,26	1,11	5,66
	Autres	0,18	0,31	1,79	1,15	3,44
Res.niv.moyen	Films	0,53	0,83	0,69	0,56	2,61
	Bouteilles et flacons	0,44	0,74	0,42	0,36	1,96
	Autres	0,13	0,19	0,91	0,71	1,94
Res.niv.faible	Films	0,38	0,46	0,33	0,31	1,49
	Bouteilles et flacons	0,34	0,43	0,59	0,21	1,58
	Autres	0,42	0,70	0,44	0,38	1,94
Com.niv.moyen	Films	2,80	2,58	1,15	2,09	8,61
	Bouteilles et flacons	2,48	1,95	2,33	1,77	8,53
	Autres	2,44	2,52	3,04	2,19	10,19
Com.niv.faible	Films	0,92	1,15	0,86	1,23	4,14
	Bouteilles et flacons	1,53	0,84	1,17	0,81	4,35
	Autres	1,60	1,59	0,80	1,39	5,37

### 2.3.2. Calcul des taux de production des sous-catégories des métaux :

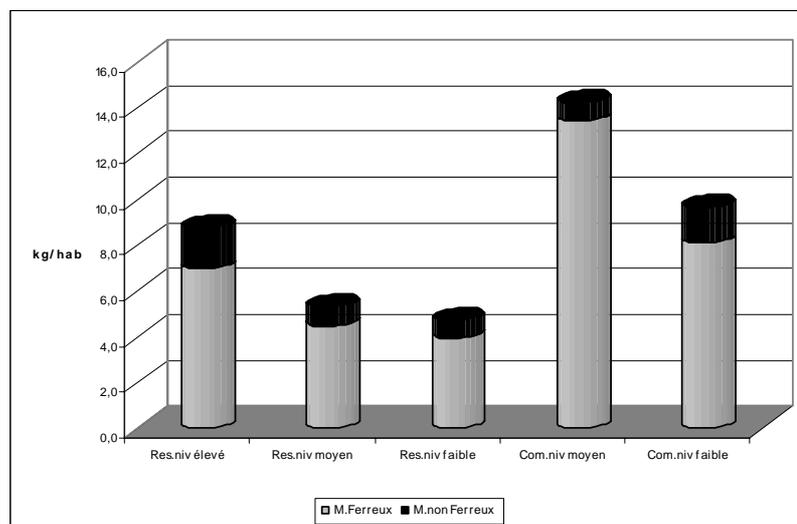
Les taux de production des sous-catégories des métaux, calculés en masse sèche par habitant et par an, selon les secteurs échantillonnés, sont présentés dans le tableau 88 et la figure 64. Il apparaît ainsi, que les productions de métaux non ferreux sont négligeables (de l'ordre de 1 kg par habitant et par an) par rapport aux productions des métaux ferreux dont les taux varient selon les secteurs et les revenus des populations de 4 à 13 kg par habitant et par an.

Comme pour les plastiques, les plus forts taux de production des métaux ferreux sont enregistrés dans les secteurs à caractère commercial et le secteur résidentiel à revenu élevé.

**Tableau 88. Taux de Production des métaux par sous-catégories (en kg/hab.an) dans les divers secteurs échantillonnés**

Catégories	Res.niv élevé	Res.niv moyen	Res.niv faible	Com.niv moyen	Com.niv faible
M.Ferreux	7,0	4,5	4,0	13,4	8,1
M.non Ferreux	1,8	0,9	0,8	0,8	1,5
Total Métaux	8,8	5,3	4,7	14,2	9,6

**Figure 64. Taux de production (en kg/hab.an)  
des sous-catégories des métaux dans les secteurs échantillonnés**



L'analyse saisonnière de ces taux, présentée dans le tableau 89, ne fait pas apparaître de variations saisonnières notables.

**Tableau 89. Taux de Production (en kg/habitant) annuels et saisonniers des métaux  
par sous-catégories et par secteurs**

Secteurs	Catégories	Printemps	Eté	Automne	Hiver	année
Res.niv.élevé	M.Ferreux	2,02	2,04	1,76	1,17	6,98
	M.non Ferreux	0,50	0,40	0,53	0,36	1,79
Res.niv.moyen	M.Ferreux	1,05	1,22	0,87	1,33	4,46
	M.non Ferreux	0,13	0,27	0,18	0,28	0,87
Res.niv.faible	M.Ferreux	0,75	1,11	1,09	1,02	3,95
	M.non Ferreux	0,15	0,17	0,23	0,22	0,76
Com.niv.moyen	M.Ferreux	2,88	4,91	2,75	2,89	13,43
	M.non Ferreux	0,36	0,34	0,04	0,04	0,79
Com.niv.faible	M.Ferreux	2,36	1,53	2,15	2,07	8,11
	M.non Ferreux	0,42	0,56	0,28	0,27	1,53

**4EME PARTIE**

**LA CARACTERISATION DES DECHETS MENAGERS ET ASSIMILES  
DANS LE GRAND TUNIS  
RESULTATS ET INTERPRETATIONS**

**CHAPITRE 4**

**CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES  
DES COMPOSANTS DES DECHETS**

## I. HUMIDITES DES DECHETS PAR SECTEURS ET PAR SAISONS

Le séchage a concerné toutes les catégories des déchets échantillonnés qui ont fait l'objet du tri préalable sur humide. Au total, 2 400 kg de déchets ont été séchés correspondant aux 5 400 fractions échantillonnées. Le temps nécessaire au séchage a varié entre 50 et 60 jours pour chaque campagne.

A partir des résultats de séchage, les humidités suivantes ont pu être déterminées :

- l'humidité globale des déchets,
- les humidités des fractions triées sur humide : les fermentescibles, les non fermentescibles et les fines (<20mm)

### 1. Détermination de l'humidité globale des échantillons triés :

Les humidités globales des échantillons triés correspondent aux humidités moyennes de l'ensemble des catégories présentes dans les déchets. Elles sont présentées selon les secteurs et les saisons dans le tableau 90. Afin d'approcher au mieux les humidités initiales des déchets, les humidités mesurées ont été corrigées en intégrant les pertes d'eau durant les tris (évaporation et vidage des bouteilles).

**Tableau 90. Humidités globales mesurées et corrigées (en %) par secteurs et par saisons**

secteurs	Printemps		Eté		Automne		Hiver	
	H.mesurée	H.corrigée	H.mesurée	H.corrigée	H.mesurée	H.corrigée	H.mesurée	H.corrigée
Res.niv élevé	51,2	56,0	40,4	42,5	43,2	46,3	40,3	44,2
Res.niv moyen	53,7	58,2	49,3	51,5	37,4	39,9	51,2	54,6
Res.niv faible	49,0	52,6	51,5	52,8	45,9	48,3	51,5	53,8
Com.niv moyen	50,9	55,3	37,8	39,1	31,6	34,9	39,8	42,1
Com.niv faible	48,3	51,7	45,9	48,2	31,9	34,3	31,7	35,1

Il apparaît ainsi que les humidités (corrigées) des déchets présentent les variations saisonnières suivantes :

- les humidités sont plus importantes au printemps, où elles peuvent atteindre les 58% ;
- les humidités les plus faibles (de l'ordre de 34%) sont observées en automne.

Cependant, il faut bien noter que ces humidités ne correspondent pas à celles présentes initialement dans les déchets qui sont à l'origine beaucoup plus importantes. En effet, les humidités mesurées sont celles résiduelles, suite aux pertes d'eaux pendant le stockage des déchets dans la rue, leur collecte dans les bennes et leur transport jusqu'à la décharge.

## 2. Détermination de l'humidité par catégories et par fractions granulométriques :

### 2.1. Humidités des fractions fermentescibles :

L'humidité des fractions fermentescibles a été mesurée sur les déchets putrescibles et les papiers-cartons aux granulométries supérieures à 100mm (les Gros) et celles comprises entre 20 et 100mm (les Moyens). Les résultats de séchage selon les secteurs et les saisons sont présentés dans le tableau 91.

**Tableau 91. Humidités des fractions fermentescibles (en %) selon les secteurs et les saisons**

Printemps						
Catégories	Granulométries	Res.niv.élevé	Res.niv.moyen	Res.niv.faible	Com.niv.moyen	Com.niv.faible
Putrescibles	Gros	82,5	80,4	76,7	55,8	63,2
	Moyens	66,8	67,7	69,1	65,1	66,5
Papiers-Cartons	Gros	55,4	54,3	53,5	44,0	46,0
	Moyens	63,0	64,2	65,1	52,1	52,0
Eté						
Catégories	Granulométries	Res.niv.élevé	Res.niv.moyen	Res.niv.faible	Com.niv.moyen	Com.niv.faible
Putrescibles	Gros	81,6	89,4	74,8	84,2	83,3
	Moyens	63,4	62,5	62,2	65,7	72,1
Papiers-Cartons	Gros	52,4	57,3	53,5	54,0	53,0
	Moyens	58,0	65,2	64,1	62,1	62,0
Automne						
Catégories	Granulométries	Res.niv.élevé	Res.niv.moyen	Res.niv.faible	Com.niv.moyen	Com.niv.faible
Putrescibles	Gros	58,8	75,4	nd	nd	nd
	Moyens	57,7	58,5	53,2	64,9	68,4
Papiers-Cartons	Gros	39,3	48,8	32,6	39,8	45,8
	Moyens	48,4	55,8	51,3	53,0	56,8
Hiver						
Catégories	Granulométries	Res.niv.élevé	Res.niv.moyen	Res.niv.faible	Com.niv.moyen	Com.niv.faible
Putrescibles	Gros	88,9	80,2	nd	nd	nd
	Moyens	75,5	75,1	73,2	70,9	68,8
Papiers-Cartons	Gros	59,0	46,9	46,0	45,7	44,4
	Moyens	63,3	53,4	53,0	56,7	55,3

Il apparaît ainsi que les humidités les plus importantes sont celles des putrescibles. Elles sont principalement observées :

- sur la fraction >100mm, où elles peuvent atteindre les 89%,
- en été et en hiver, où elles sont de l'ordre de 79%.

Ces importantes humidités, peuvent s'expliquer par l'abondance des fruits en été et par l'influence des pluies en hiver.

### 2.2. Humidités des fractions non fermentescibles :

Les fractions non fermentescibles sont composées des catégories suivantes : les composites, les textiles, les textiles sanitaires, les plastiques, les combustibles non classés, le verre, les métaux, les incombustibles non classés et les déchets spéciaux. L'humidité de ces fractions a été mesurée sur les gros (100 mm) et sur les moyens (20-100 mm).

Les résultats de séchage obtenus selon les secteurs et les saisons sont présentés dans le tableau 92. Ces résultats montrent des humidités assez importantes (variant de 24 à 59%) pour des catégories qui ont été introduites plus ou moins sèches dans les déchets. Ces humidités sont de toute évidence apportées par les putrescibles.

**Tableau 92. Humidités des fractions non fermentescibles (en %) selon les secteurs et les saisons**

<b>Printemps</b>					
Granulométries	Res.niv.élevé	Res.niv.moyen	Res.niv.faible	Com.niv.moyen	Com.niv.faible
Gros	42,4	51,6	53,2	45,4	39,5
Moyens	40,0	46,3	51,2	49,2	48,5
<b>Été</b>					
Granulométries	Res.niv.élevé	Res.niv.moyen	Res.niv.faible	Com.niv.moyen	Com.niv.faible
Gros	49,2	48,8	44,2	40,8	45,4
Moyens	48,9	50,0	48,8	48,4	43,9
<b>Automne</b>					
Granulométries	Res.niv.élevé	Res.niv.moyen	Res.niv.faible	Com.niv.moyen	Com.niv.faible
Gros	38,1	39,1	47,1	24,2	50,7
Moyens	31,9	31,0	36,0	35,4	46,0
<b>Hiver</b>					
Granulométries	Res.niv.élevé	Res.niv.moyen	Res.niv.faible	Com.niv.moyen	Com.niv.faible
Gros	58,5	50,9	46,5	40,4	45,8
Moyens	49,9	54,1	39,0	38,1	36,9

### 2.3. Humidités des fractions fines :

Les humidités déterminées sur les fractions fines de granulométries inférieures à 20 mm, varient de 37 à 64%. Ces fortes humidités sont principalement apportées par les déchets putrescibles qui sont majoritairement présents dans les Fines.

**Tableau 93. Humidités des fractions fines (en %) selon les secteurs et les saisons**

<b>Printemps</b>				
Res.niv.élevé	Res.niv.moyen	Res.niv.faible	Com.niv.moyen	Com.niv.faible
44,8	48,5	52,1	55,2	56,5
<b>Été</b>				
Res.niv.élevé	Res.niv.moyen	Res.niv.faible	Com.niv.moyen	Com.niv.faible
48,9	43,6	43,6	49,4	58,5
<b>Automne</b>				
Res.niv.élevé	Res.niv.moyen	Res.niv.faible	Com.niv.moyen	Com.niv.faible
43,9	44,1	36,7	49,3	52,7
<b>Hiver</b>				
Res.niv.élevé	Res.niv.moyen	Res.niv.faible	Com.niv.moyen	Com.niv.faible
63,8	63,3	59,2	57,9	54,4

## II. DETERMINATION DES TAUX DE MATIERES ORGANIQUES

### 1. Objectifs des mesures et bilan analytique :

Les composants qui ont fait l'objet de mesure des taux de matières organiques sont : les fermentescibles (putrescibles, papiers et cartons) et les fractions très fines de granulométries inférieures à 6,3 mm. L'objectif visé par ces mesures étant :

- d'une part, la connaissance des parts respectives des cendres et des matières volatiles dans les fractions très fines, afin de les réaffecter dans les catégories correspondantes (les putrescibles et les incombustibles non classés) ;
- d'autre part, la connaissance des apports respectifs en matières organiques, des diverses catégories des composants fermentescibles valorisables par compostage.

Les déterminations des taux de matières organiques ont été réalisées sur des échantillons prélevés à partir de chaque lot des déchets triés, les fractions concernées étant :

- les putrescibles supérieures à 20 mm (Gros et Moyens),
- les putrescibles inférieures 20 mm (Fins),
- les papiers-cartons, toutes granulométries confondues (Gros, Moyens et Fins),
- les fractions très fines inférieures à 6,3 mm.

Au total, 1200 déterminations ont dû être réalisées. Etant donné la capacité limitée (à seulement 4 calcinations par jour) du four du laboratoire, ces déterminations ont dû être étalées sur plus d'une année (d'avril 2004 à octobre 2005).

### 2. Détermination des taux de matières organiques dans les fractions « très fines » :

Les cendres et les matières volatiles obtenues après combustion des fractions inférieures à 6,3 mm sont présentées en pourcentages de la matière sèche, selon les secteurs et les saisons, dans le tableau 94.

Ces résultats font apparaître que les fractions très fines sont composées essentiellement de déchets inertes -gravats, sable, etc- (de l'ordre de 80%) et d'une faible part relativement faible de déchets putrescibles (de l'ordre de 20%).

Ces résultats ont permis le calcul de la composition des déchets en 12 catégories (cf. tableau 73), suite à la comptabilisation des cendres dans la catégorie « incombustibles non classés » et des matières volatiles dans la catégorie « déchets putrescibles ».

**Tableau 94. Résultats de la calcination des fractions très fines (en % de la MS)  
selon les secteurs et les saisons**

<b>Printemps</b>					
	Res.niv élevé	Res.niv moyen	Res.niv faible	Com.niv.moyen	Com.niv faible
Cendres	80,49	86,85	85,01	80,50	74,77
Matières volatiles	19,51	13,15	14,99	19,50	25,23
<b>Eté</b>					
	Res.niv élevé	Res.niv moyen	Res.niv faible	Com.niv.moyen	Com.niv faible
Cendres	87,20	87,25	85,16	83,39	84,92
Matières volatiles	12,80	12,75	14,84	16,61	15,08
<b>Automne</b>					
	Res.niv élevé	Res.niv moyen	Res.niv faible	Com.niv.moyen	Com.niv faible
Cendres	84,33	87,93	87,28	83,63	84,92
Matières volatiles	15,67	12,07	12,72	16,37	15,08
<b>Hiver</b>					
	Res.niv élevé	Res.niv moyen	Res.niv faible	Com.niv.moyen	Com.niv faible
Cendres	80,06	81,69	81,76	81,45	79,20
Matières volatiles	19,94	18,31	18,24	18,55	20,80

### 3. Détermination des taux de matières organiques dans les fermentescibles :

Les résultats des calcinations des composants fermentescibles (putrescibles, papiers et cartons) sont présentés en pourcentages de la matière sèche, selon les secteurs et les saisons, dans le tableau 95. Il apparaît ainsi, que les matières organiques sont présentes dans les fractions fermentescibles à des taux très importants, variant de 54 à 93%.

**Tableau 95. Taux de matières organiques contenues dans les catégories des fractions  
fermentescibles (en % de la MS) selon les secteurs et les saisons**

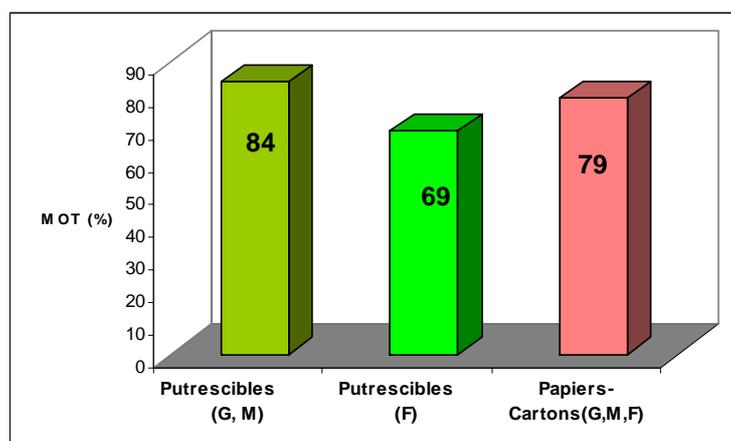
<b>Printemps</b>					
Catégories	Res.niv élevé	Res.niv moyen	Res.niv faible	Com.niv.moyen	Com.niv faible
Putrescibles (G, M)	90,3	81,4	79,4	92,8	93,0
Putrescibles (F)	63,2	63,4	60,2	80,3	72,0
Papiers-Cartons	81,0	73,2	64,7	84,0	83,7
<b>Eté</b>					
Catégories	Res.niv élevé	Res.niv moyen	Res.niv faible	Com.niv.moyen	Com.niv faible
Putrescibles (G, M)	85,0	77,4	76,7	84,7	89,6
Putrescibles (F)	67,0	60,6	63,8	67,9	83,1
Papiers-Cartons	69,6	69,6	71,0	79,1	85,5
<b>Automne</b>					
Catégories	Res.niv élevé	Res.niv moyen	Res.niv faible	Com.niv.moyen	Com.niv faible
Putrescibles (G, M)	84,0	78,0	76,0	83,0	88,0
Putrescibles (F)	65,0	57,1	54,3	70,1	70,7
Papiers-Cartons	77,3	76,3	81,5	79,1	83,7
<b>Hiver</b>					
Catégories	Res.niv élevé	Res.niv moyen	Res.niv faible	Com.niv.moyen	Com.niv faible
Putrescibles (G, M)	88,0	75,7	87,0	85,0	81,9
Putrescibles (F)	78,6	71,8	74,0	75,0	76,3
Papiers-Cartons	84,8	82,0	84,0	78,5	78,3

Les taux de ces apports en matières organiques sont en moyenne (Fig. 65) :

- de 84% pour les putrescibles de granulométries supérieures à 20 mm (les Gros et les Moyens),
- de 79% pour les papiers-cartons (toutes granulométries confondues),
- de 69% pour les putrescibles de granulométries inférieures à 20 mm (les Fins).

C'est donc bien dans les fractions fines que les taux de matières organiques sont les plus faibles, ce que l'on peut logiquement expliquer par la présence d'inertes (quantifiés précédemment dans la fraction <6,3mm).

**Figure 65. Taux moyens de matières organiques (en % de la MS) selon les catégories et les granulométries (tous secteurs et toutes saisons confondus)**



### III. DETERMINATION DES TENEURS EN CARBONE ET EN AZOTE

#### 1. Objectifs des mesures et bilan analytique :

Les teneurs en carbone et en azote ont été déterminés dans les composants fermentescibles des déchets (putrescibles, papiers et cartons). Les analyses ont été réalisées sur des échantillons prélevés à partir de chaque lot des déchets triés, les fractions concernées étant :

- les putrescibles, toutes granulométries confondues (Gros, Moyens et Fins)
- les papiers-cartons, toutes granulométries confondues (Gros, Moyens et Fins)

L'objectif visé par ces mesures étant l'approche de l'indice de biodégradabilité de ces composants et donc leur aptitude au compostage.

Au total, 720 déterminations de carbone et d'azote ont dû être effectuées.

## 2. Détermination des teneurs en carbone des composants fermentescibles :

Les teneurs en carbone des putrescibles, des papiers et des cartons sont présentés en % (en gramme par 100g de matière sèche), selon les secteurs et les saisons, dans le tableau 96.

**Tableau 96. Teneurs en Carbone organique (en % de la MS) selon les secteurs et les saisons**

Printemps					
Catégories	Res.niv élevé	Res.niv moyen	Res.niv faible	Com.niv.moyen	Com.niv faible
Putrescibles	27,4	25,9	24,9	30,9	29,5
Papiers-Cartons	43,5	39,3	34,8	45,2	45,0
Eté					
Catégories	Res.niv élevé	Res.niv moyen	Res.niv faible	Com.niv.moyen	Com.niv faible
Putrescibles	27,1	24,6	25,1	27,2	30,8
Papiers-Cartons	40,9	37,4	38,2	42,5	46,0
Automne					
Catégories	Res.niv élevé	Res.niv moyen	Res.niv faible	Com.niv.moyen	Com.niv faible
Putrescibles	26,6	24,1	23,3	27,3	28,3
Papiers-Cartons	44,6	40,3	39,2	43,5	44,1
Hiver					
Catégories	Res.niv élevé	Res.niv moyen	Res.niv faible	Com.niv.moyen	Com.niv faible
Putrescibles	29,8	26,3	28,8	28,6	28,2
Papiers-Cartons	45,6	44,1	45,2	42,2	42,2

Il apparaît que les papiers et les cartons sont plus riches que les putrescibles en carbone organique, avec des teneurs moyennes de plus de 40% pour les premiers et de seulement 30% pour les deuxièmes.

## 3. Détermination des teneurs en azote des composants fermentescibles :

Les teneurs en azote des putrescibles, des papiers et des cartons sont présentés en g/kg de matière sèche, selon les secteurs et les saisons, dans le tableau 97. Selon ces résultats, les déchets putrescibles apparaissent très riches en matières azotées avec des teneurs en azote total variant de 15 à 22 g/kg de matière sèche. Par contre, les papiers et les cartons ne renferment que de très faibles teneurs en azote de l'ordre de 6 g/kg de matière sèche.

## 4. Détermination des rapports C/N des composants fermentescibles :

Le rapport Carbone sur Azote (C/N) est considéré comme l'indice de biodégradabilité des substrats organiques solides. Lors du compostage, les besoins azotés sont fonction des teneurs en matériaux carbonés facilement biodégradables. Ainsi, pour les teneurs en carbone des fermentescibles qui varient de 30 à 40% de la matière sèche, les rapports C/N moyens calculés dans le tableau 98 montrent que :

- les putrescibles, dont les C/N sont de l'ordre de 15, sont des substrats facilement biodégradables,

- les papiers-cartons, dont les C/N varient de 60 à 107 sont des substrats difficilement biodégradables.

L’aptitude des déchets fermentescibles au compostage est déterminée par le ratio C/N de mélange de leurs divers constituants (les putrescibles, les papiers et les cartons). Ces ratios de mélange, pondérés par les quantités respectives de chaque catégorie, sont calculés selon les secteurs et les saisons dans le chapitre suivant (cf. Chap.5).

**Tableau 97. Teneurs en Azote total (en g/kg de la MS) selon les secteurs et les saisons**

<b>Printemps</b>					
Catégories	Res.niv élevé	Res.niv moyen	Res.niv faible	Com.niv.moyen	Com.niv faible
Putrescibles	15,6	15,8	15,1	14,5	14,7
Papiers-Cartons	5,7	6,3	5,6	7,8	7,4
<b>Eté</b>					
Catégories	Res.niv élevé	Res.niv moyen	Res.niv faible	Com.niv.moyen	Com.niv faible
Putrescibles	22,2	22,2	22,9	14,8	20,6
Papiers-Cartons	7,6	7,1	7,1	7,1	5,7
<b>Automne</b>					
Catégories	Res.niv élevé	Res.niv moyen	Res.niv faible	Com.niv.moyen	Com.niv faible
Putrescibles	16,5	18,5	14,9	15,4	17,7
Papiers-Cartons	5,5	4,6	3,0	3,6	3,0
<b>Hiver</b>					
Catégories	Res.niv élevé	Res.niv moyen	Res.niv faible	Com.niv.moyen	Com.niv faible
Putrescibles	20,2	21,1	18,9	17,8	15,5
Papiers-Cartons	4,9	4,5	5,6	6,2	6,5

**Tableau 98. Les ratios C/N moyens des composants fermentescibles**

<b>Printemps</b>	
Catégories	C/N moyen
Putrescibles	18,3
Papiers-Cartons	63,4
<b>Eté</b>	
Catégories	C/N moyen
Putrescibles	13,1
Papiers-Cartons	59,2
<b>Automne</b>	
Catégories	C/N moyen
Putrescibles	15,6
Papiers-Cartons	107,5
<b>Hiver</b>	
Catégories	C/N moyen
Putrescibles	15,2
Papiers-Cartons	79,1

## IV. DETERMINATION DES ELEMENTS TRACES METALLIQUES

### 1. Objectifs des mesures et bilan analytique :

Les éléments traces métalliques (ETM) ont été déterminés sur les fractions suivantes des échantillons prélevés à partir de chaque lot des déchets triés :

- les fermentescibles, toutes catégories (putrescibles, papiers, cartons) et toutes granulométries (Gros, Moyens et Fins) confondues,
- les fractions très fines (<6,3mm).

L'objectif visé par ces analyses étant la connaissance des apports respectifs en métaux lourds, des diverses fractions des composants fermentescibles valorisables par compostage.

Les éléments métalliques qui ont été recherchés sont : le Cadmium (Cd), le Chrome (Cr), le Cuivre (Cu), le Nickel (Ni), le Plomb (Pb) et le Zinc (Zn) ; le mercure (Hg) n'a pas pu être déterminé, en raison de la non disponibilité du système d'analyse adéquat. Pour la détermination de ces éléments sur les fractions concernées, 360 échantillons ont dû être traités par minéralisation et 2160 mesures ont dû être effectuées par spectrométrie d'absorption atomique de flamme.

### 2. Généralités sur les Eléments Traces Métalliques :

#### 2.1. Origine des ETM dans les ordures ménagères :

Selon une étude menée par l'ADEME en 1993 [2], les métaux lourds sont présents dans la plupart des catégories des ordures ménagères : le verre, les papiers, les cartons, les plastiques, les métaux, les combustibles non classés et les déchets spéciaux, comme le montre le tableau 99.

Cette étude avait pour objectif de faire le point par deux approches, l'une par l'amont (les produits mis sur le marché) et l'autre par l'aval (les déchets de consommation), sur l'origine des métaux lourds afin d'identifier à terme les moyens pour limiter leur présence dans les déchets. Cette étude intègre les résultats obtenus lors de la campagne nationale de caractérisation des ordures ménagères, menée en France en 1993 [1] et qui sont présentés dans le tableau 100.

Cependant, il est fort possible que la présence des ETM dans les déchets ménagers soit en train de baisser en raison des nouveaux procédés de fabrication de produits manufacturés. En effet, depuis 1993 ces produits ont considérablement évolué, notamment pour répondre aux nouvelles réglementations en vigueur sur la « dangerosité » potentielle des produits de consommation et

pour tenir compte de la prise de conscience des consommateurs de ces aspects environnementaux. Cette évolution est par exemple manifeste dans les domaines suivants :

- la diminution des teneurs en mercure des piles salines et alcalines,
- l'utilisation d'encres à faible teneur en éléments traces métalliques dans l'imprimerie.

Ces évolutions sont en fait spécifiques à chaque pays selon les contraintes imposées par les pouvoirs publics ou la qualité du tissu industriel, et les teneurs en ETM devront être analysées et évaluées au cas par cas.

**Tableau 99. Origine des métaux lourds dans les ordures ménagères [2]**

<b>Élément Métallique</b>	<b>Catégories des déchets concernées</b>
l' <b>Arsenic</b>	est présent principalement dans <b>le verre</b>
le <b>Bore</b>	est présent dans toutes les catégories et plus particulièrement dans <b>les plastiques et les cartons.</b>
le <b>Cadmium</b>	est principalement présent dans <b>les déchets ménagers spéciaux</b> (piles et accumulateurs au nickel-cadmium) et dans <b>les plastiques.</b>
le <b>Chrome</b>	est principalement présent dans <b>le verre</b> devant <b>les métaux</b> et <b>les incombustibles non classés</b>
le <b>Cobalt</b>	est présent dans toutes les catégories et principalement dans <b>les plastiques, les papiers et les cartons</b>
le <b>Cuivre</b>	se trouve essentiellement dans <b>les métaux.</b>
le <b>Manganèse</b>	se trouve dans <b>les déchets ménagers spéciaux</b> (piles) et <b>les métaux</b>
le <b>Mercure</b>	se trouve essentiellement dans <b>les déchets ménagers spéciaux</b> (piles)
le <b>Molybdène</b>	se trouve essentiellement dans <b>les plastiques</b> et <b>les métaux</b>
le <b>Nickel</b>	se trouve essentiellement dans <b>les déchets ménagers spéciaux</b> (les accumulateurs au nickel-cadmium) et <b>les métaux</b> et dans une moindre mesure dans <b>les plastiques.</b>
le <b>Plomb</b>	se trouve essentiellement dans <b>les métaux</b> et <b>les déchets ménagers spéciaux</b> (les batteries au plomb).
le <b>Sélénium</b>	est présent en très faible concentration dans <b>les plastiques, les métaux</b> et <b>les déchets ménagers spéciaux</b> (aérosols).
le <b>Zinc</b>	se trouve principalement dans <b>les déchets ménagers spéciaux</b> (piles) et <b>les métaux.</b>

**Tableau 100. Teneurs moyennes en ETM dans les ordures ménagères françaises en mg/kg de MS  
(résultats de la campagne nationale de 1993) [1]**

Catégories	Arsenic	Bore	Cadmium	Cobalt	Chrome	Cuivre	Manganèse	Mercure	Molybdène	Nickel	Plomb	Sélénium	Zinc
<b>Putrescibles</b>	0,9	15,1	1,8	62,2	27,7	67,3	112,9	0,2	Nd	9,1	153,6	nd	148
<b>Papiers</b>	nd	7,8	1,2	93,5	25,3	61,1	60,6	0,1	Nd	10,2	52,9	nd	95,5
<b>Cartons</b>	nd	31,6	1,4	172,9	23,6	38,1	56	0,7	Nd	11,8	26,1	nd	112,1
<b>Composites</b>	nd	5,9	1,1	399,9	29,1	122,8	132,4	0,4	0,5	16,7	441,4	nd	205,7
<b>Textiles</b>	nd	12	6,8	258,5	118,6	766,3	55,5	0,5	2,7	37,7	99,2	nd	1217,8
<b>T.Sanitaires</b>	nd	11,5	1,2	293,2	80,6	38,6	46,8	0,2	0,2	22,1	47,1	nd	1572,2
<b>Plastiques</b>	0,5	21,7	12,1	267,6	96,2	295,8	103,8	1	4,3	45,2	160,8	0,1	375,8
<b>Combustibles nc</b>	nd	25,6	14	224,3	387,2	497	85,4	0,2	Nd	19,6	184,4	nd	866,9
<b>Verre</b>	24	4	1,3	14,1	625,5	14,6	216,3	Nd	Nd	19,6	373,7	nd	58
<b>Métaux</b>	10,8	5,2	7,9	99,6	322,5	15541	2373	0,3	5,4	481,4	9053	0,1	5067
<b>Incombustibles nc</b>	5,3	45,7	1	18,7	244	21,2	444	0,02	Nd	23,3	641	nd	558
<b>D.Spéciaux</b>	nd	7,2	26,6	nd	nd	73,2	73438	1250	Nd	52	77,5	nd	218000
<b>Fines&lt;20mm</b>	4,3	13,3	4,5	25,6	150,7	464,6	304,7	1,3	0,4	34,1	930,8	nd	552,6

nd : valeur non détectée par l'appareil de mesure.

### 2.2. Caractéristiques des principaux ETM recherchés :

Les métaux lourds sont toujours présents dans les matières organiques. A de faibles doses, ils présentent un grand intérêt pour les plantes, mais à partir de doses limites, ils sont phytotoxiques et peuvent être source de grandes toxicités pour les êtres humains.

Les six principaux éléments métalliques que nous avons recherchés sont : le Cadmium, le Chrome, le Cuivre, le Nickel, le Plomb et le Zinc. Leurs caractéristiques (intérêt pour les plantes et toxicité) sont présentés dans le tableau 101 [7].

**Tableau 101. Caractéristiques des principaux métaux lourds [7]**

ETM	Intérêt pour les plantes	Toxicité	
		pour les plantes	pour l'être humain
<b>Cadmium (Cd)</b>	non nécessaire pour les plantes	varie selon l'espèce	toxique à partir de 0,01 mg/kg
<b>Chrome (Cr)</b>	non nécessaire pour les plantes	varie selon l'espèce	toxique à partir de 0,1 mg/kg
<b>Cuivre (Cu)</b>	indispensable à la nutrition	toxique à 20mg/kg (MS) mais certaines acceptent plus	toxique à partir de 0,1 mg/kg
<b>Nickel (Ni)</b>	- impliqué dans le métabolisme de l'azote - intervient dans la germination et la croissance	toxique à >10mg/kg (MS)	toxique à partir de 0,2 mg/kg
<b>Plomb (Pb)</b>	non nécessaire pour les plantes	faible impact	toxique à partir de 0,5 mg/kg
<b>Zinc (Zn)</b>	- lié aux métabolismes des sucres et des protéines - intervient dans la résistance aux pathogènes	grande tolérance des plantes	toxique à partir de 5 mg/kg

### 3. Détermination des teneurs en ETM des échantillons triés :

Les teneurs en métaux lourds des fractions fermentescibles et très fines des échantillons triés sont présentées en fourchettes de valeurs, regroupant tous les secteurs et toutes les saisons, dans le tableau 102.

Afin d'assurer une indispensable comparabilité avec les normes internationales *qui sont normalisées avec un déchet standard ayant 30% de MS en matière organique*, les teneurs en métaux lourds des échantillons analysés, ont été standardisées à 70% de MS de matière minérale d'après la formule suivante [75] :

$$TM_{s30\%} = TM_{\epsilon} \times \frac{(100 - PF_{\epsilon})}{70}$$

où :

$TM_{s30\%}$  : concentration en Métaux lourds normée en mg/kg de matière sèche,

$TM_{\epsilon}$  : concentration en Métaux lourds dans l'échantillon en mg/kg de matière sèche,

$PF_{\epsilon}$  : matière organique (perte au feu) en % de la matière sèche.

**Tableau 102. Fourchettes de valeurs des ETM (en mg/kg de MS) dans les fermentescibles et les fractions très fines**

	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
<b>Fermentescibles</b>	nd	nd - 9,86	3,76 – 28,71	nd – 14,90	11,82 – 219,37	nd – 466,34
<b>Fractions très Fines &lt;6,3mm</b>	nd – 0,12	nd – 40,20	2,95 – 364,38	0,80 – 37,85	15,42 – 118,15	25,33 – 893,02

nd : valeurs non détectées par l'appareil de mesure

Les teneurs en métaux lourds des fractions fermentescibles et très fines, normées à 30% de MS en matière organique, sont présentées en fourchettes de valeurs dans le tableau 103 et dans la figure 66.

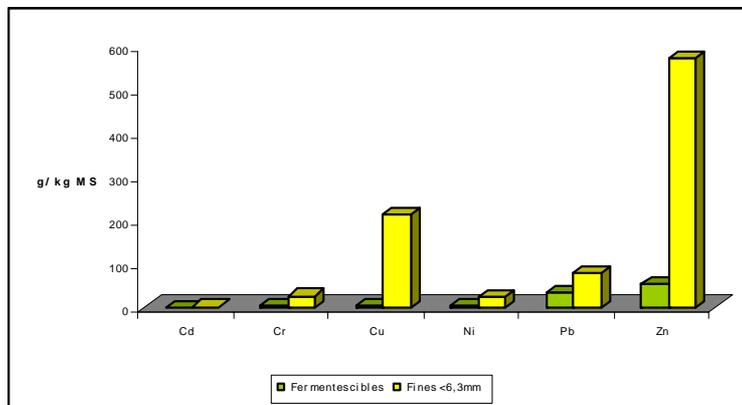
**Tableau 103. Fourchettes de valeurs des ETM (en mg/kg de MS) normées à 30% dans les fermentescibles et les fractions très fines**

	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
<b>Fermentescibles</b>	nd	nd – 2,28	nd – 6,84	nd – 3,44	2,35 – 64,26	nd – 107,76
<b>Fractions très Fines &lt;6,3mm</b>	nd – 0,15	nd – 50,12	3,44 – 423,98	0,96 – 47,20	18,71 – 137,47	29,12 – 1113,52

nd : valeurs non détectées par l'appareil de mesure

Les faibles teneurs en ETM des fractions fermentescibles montrent que les conditions de leur stockage et leur collecte en mélange avec les composants polluants (plastiques, piles, etc.) n'ont pas affecté leur qualité. L'aptitude au compostage de ces fractions (ainsi que celle des fractions très fines), est analysée pour chaque secteur et chaque saison dans le chapitre 5 (§ 4.3). Cependant, on note que dans tous les cas, la part la plus importante des ETM est apportée par les fractions fines.

**Figure 66. Teneurs moyennes normées en métaux lourds (en mg/kg de MS) dans les fermentescibles et les fractions très fines**



**4EME PARTIE**

**LA CARACTERISATION DES DECHETS MENAGERS ET ASSIMILES  
DANS LE GRAND TUNIS  
RESULTATS ET INTERPRETATIONS**

**CHAPITRE 5**

**BILAN DES GISEMENTS DANS LE GRAND TUNIS  
ET  
ANALYSE DE LEUR APTITUDE A LA VALORISATION  
PAR COMPOSTAGE ET PAR RECYCLAGE**

## I. LA COMPOSITION DES DECHETS MENAGERS ET ASSIMILES DANS LE GRAND TUNIS

Le Grand Tunis produit 510 286 tonnes par an de déchets dits « ménagers et assimilés ». La part des déchets ménagers et assimilés proprement dits peut être estimée à 459 257 tonnes, sur la base d'un ratio de 90%, estimé à partir de l'étude des flux réalisée au niveau de la commune de Tunis (cf. 3<sup>ème</sup> partie, Chap.2). Ce qui correspond à une production moyenne annuelle de 235 kg par habitant pour tout le Grand Tunis (milieux urbain et rural) et de 251 kg par habitant dans les secteurs concernés par la caractérisation (seulement le milieu urbain).

### 1. La composition annuelle moyenne par habitant :

La campagne de caractérisation réalisée en 2004, objet de cette étude, a permis de donner la répartition en pourcentages des 12 catégories constituant les déchets ménagers et assimilés par secteurs et par saisons (cf. Chap2). Cette composition correspond aux productions moyennes annuelles par habitant, présentées dans la figure 67. Il apparaît ainsi, qu'en moyenne :

- la moitié des déchets produits par le Grand Tunis est composée de déchets putrescibles, soit 128 kg par habitant et par an ;
- l'autre moitié est composée des 11 autres constituants, dont une part majoritaire de papiers (22 kg/hab.an), de cartons (21 kg/hab.an), d'incombustibles (18 kg/hab.an), de textiles sanitaires (12 kg/hab.an) et de plastiques (12 kg/hab.an).

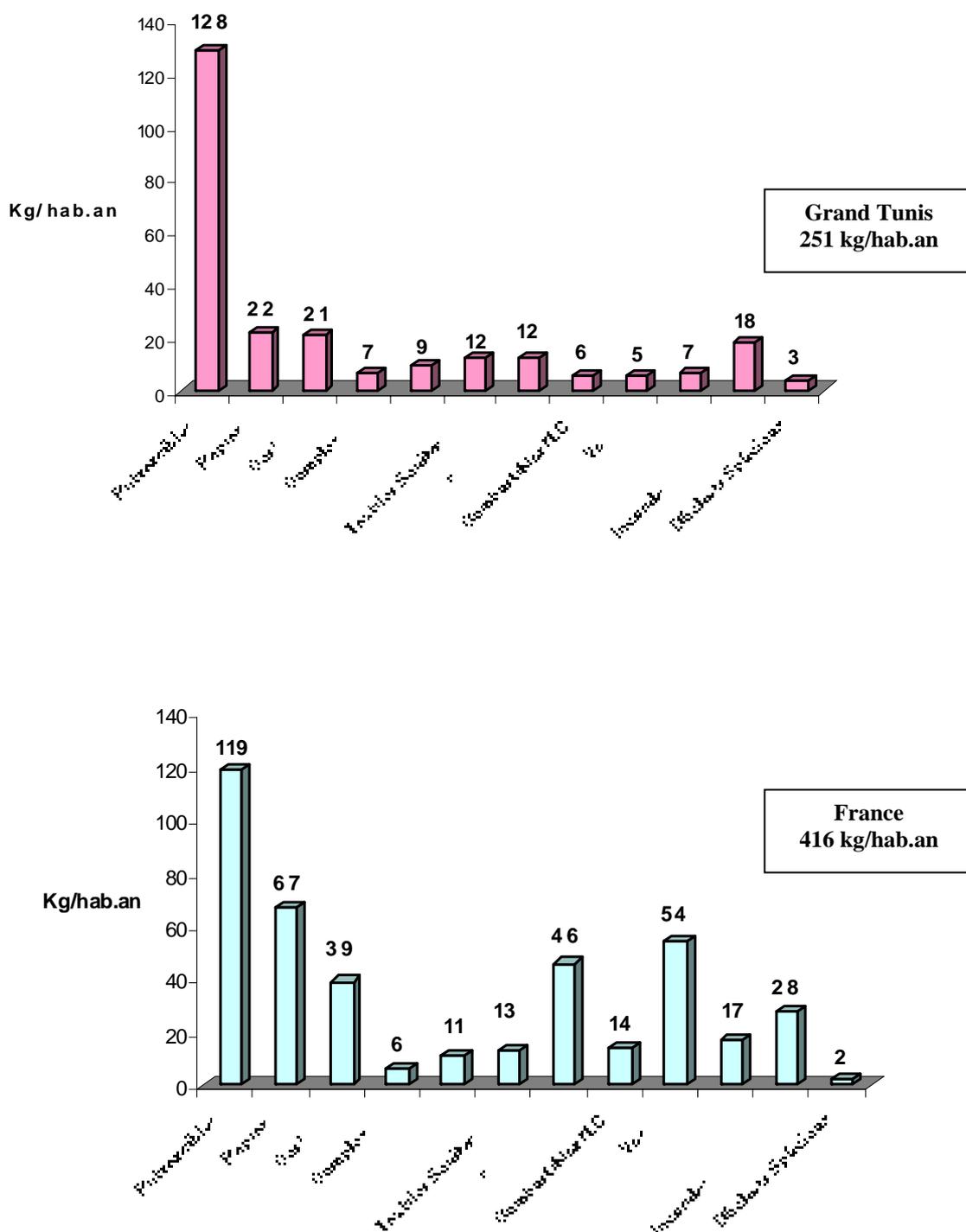
Si on compare cette composition à celle d'un pays développé tel que la France [5], on constate que le tunisois produit environ la même quantité de déchets putrescibles (120 à 130 kg) que le français. Cependant, la production des autres constituants est tout à fait différente (cf.Fig 67) :

- 11 fois moins de verre (5 kg contre 54 kg),
- 4 fois moins de plastiques (12 kg contre 46 kg),
- 3 fois moins de papiers (22 kg contre 67 kg),
- 2 fois moins de cartons (21 kg contre 39 kg),
- 2 fois moins de combustibles (6 kg contre 14 kg),
- 2 fois moins de métaux (7 kg contre 17 kg),
- 1,5 fois moins d'incombustibles (18 kg contre 28 kg),

Par ailleurs, la production des composites, des textiles, des textiles sanitaires et des déchets spéciaux est du même ordre (variant de 2 à 13 kg).

Autre constat fondamental, cette composition est une moyenne qui couvre les grandes disparités socio-économiques spécifiques des pays en développement : hétérogénéités urbaines et disparités des niveaux de vie des populations.

**Figure 67. Productions moyennes des déchets ménagers et assimilés dans le Grand Tunis et en France (en masse humide produite par habitant et par an)**



## 2. La composition annuelle par habitant selon les secteurs échantillonnés :

Sur la base de la sectorisation du Grand Tunis (cf. Chap1, 3<sup>ème</sup> partie), les compositions annuelles par habitant ont été calculées dans les secteurs identifiés suivants :

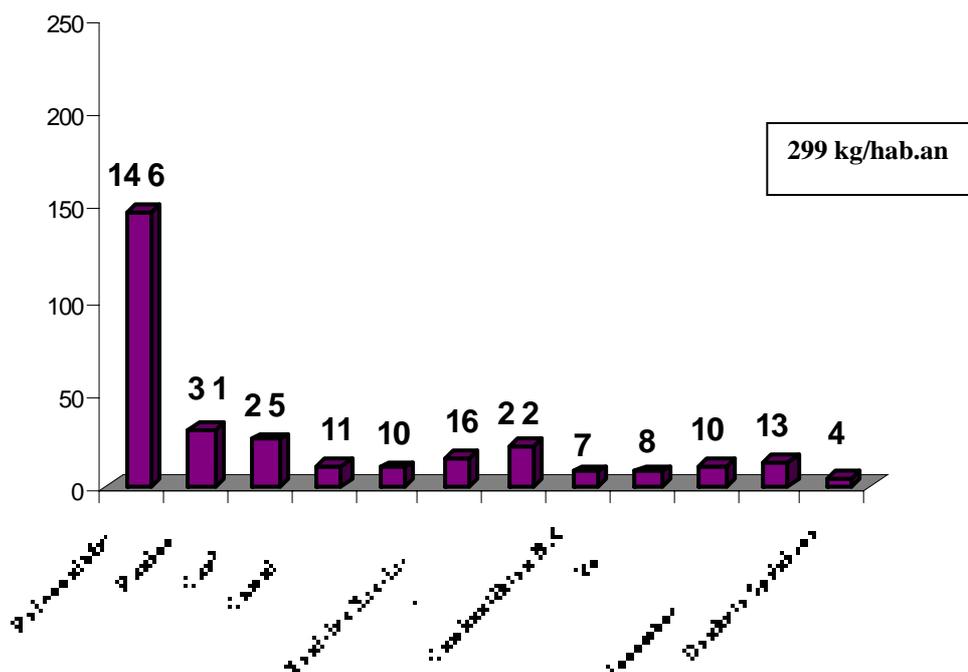
- les secteurs résidentiels à revenus : élevés, moyens et faibles ;
- les secteurs à caractère commercial à revenus : moyens et faibles.

### 2.1. La composition des déchets dans les secteurs résidentiels :

Les compositions des déchets par habitant et par an dans les secteurs résidentiels sont présentées dans les figures 68 (pour le secteur à revenu élevé), 69 (pour le secteur à revenu moyen) et 70 (pour le secteur à revenu faible).

L'analyse de ces compositions fait apparaître une évolution de la majorité des composants des déchets selon le niveau de vie des populations. Cette corrélation entre les taux de production des déchets et les revenus des habitants concerne essentiellement : les déchets putrescibles, les papiers, les cartons et les plastiques. Ainsi, l'augmentation de ces taux, dans le secteur à revenu élevé par rapport à ceux du secteur à revenu faible, est de l'ordre de 45% dans le cas des déchets putrescibles et dépasse les 150% dans le cas des emballages.

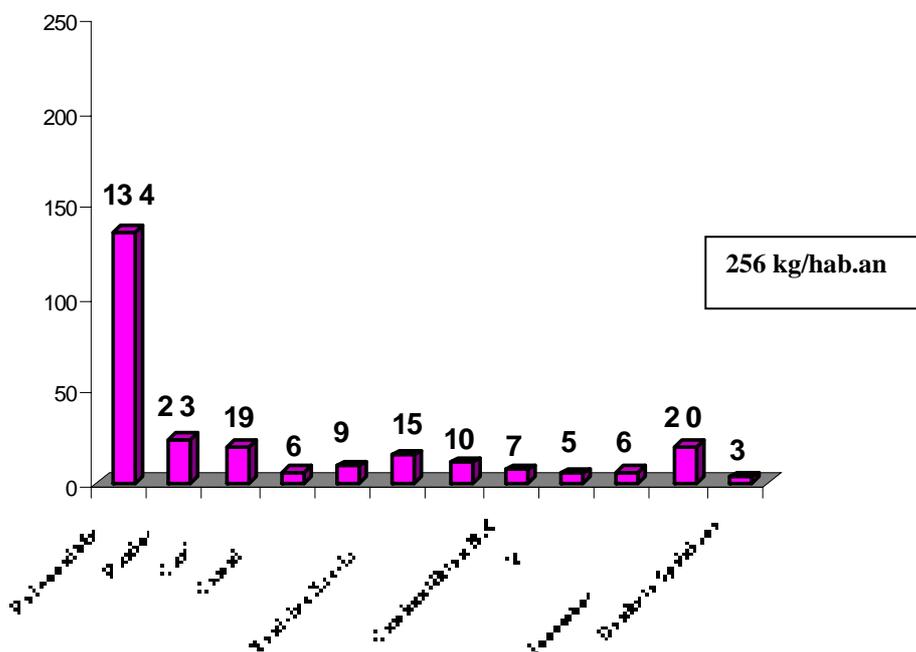
**Figure 68. Production des déchets (en masse humide produite par habitant et par an) dans le secteur résidentiel à revenu élevé**



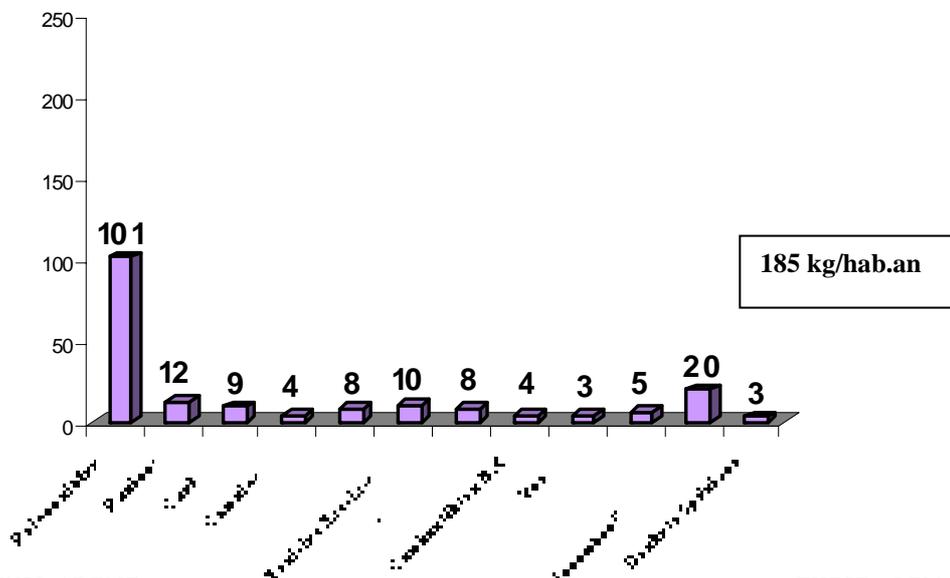
Cette augmentation excessive des emballages dans les secteurs à revenus élevés (que permettent de visualiser les planches photographiques de l'annexe 4), traduit les hétérogénéités extrêmes qui existent entre les quartiers « riches » et les quartiers « pauvres » selon leurs niveaux de vie et leurs modes de consommations.

Cependant, l'augmentation des déchets putrescibles dans les secteurs à revenus élevés réfutent les idées trop simplement acquises, qui laissent penser que les déchets des « riches » dans les PED, seraient moins organiques, à l'image de ceux des pays développés.

**Figure 69. Production des déchets (en masse humide produite par habitant et par an) dans le secteur résidentiel à revenu moyen**



**Figure 70. Production des déchets (en masse humide produite par habitant et par an) dans le secteur résidentiel à revenu faible**

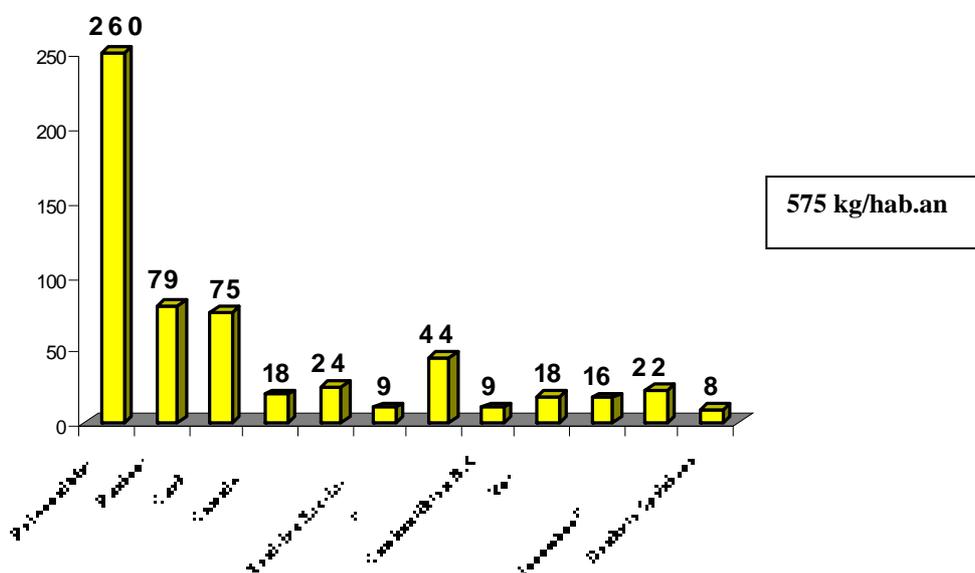


**2.2. La composition des déchets dans les secteurs commerciaux :**

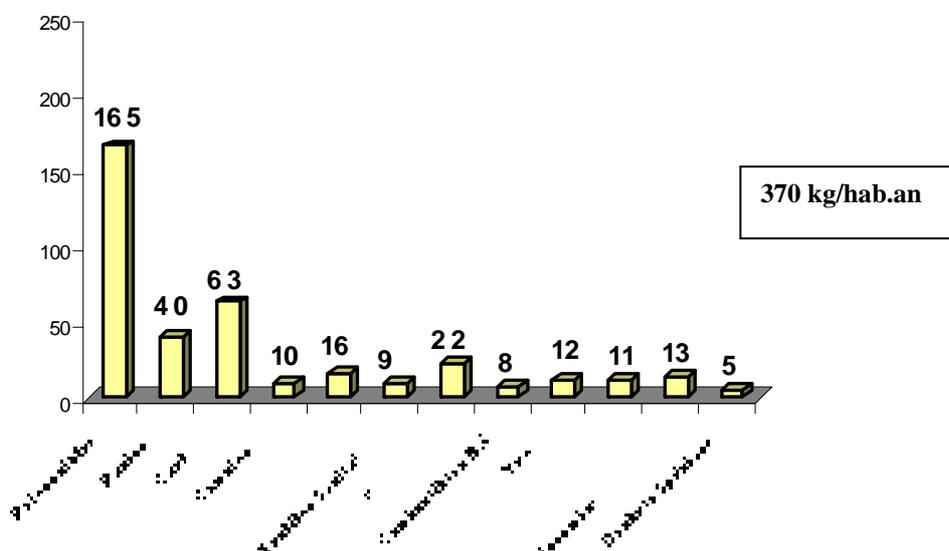
La composition des déchets par habitant et par an dans les secteurs commerciaux sont présentés dans les figures 71 (pour le secteur à revenu moyen) et 72 (pour le secteur à revenu faible).

Ces secteurs se caractérisent par de très importantes productions de déchets, pouvant dépasser le double de la production moyenne du Grand Tunis. Comme pour les secteurs résidentiels, une corrélation existe entre les taux de production des déchets et les niveaux de vie des populations.

**Figure 71. Production des déchets (en masse humide produite par habitant et par an) dans le secteur commercial à revenu moyen**



**Figure 72. Production des déchets (en masse humide produite par habitant et par an) dans le secteur commercial à revenu faible**



L'analyse de ces compositions fait apparaître qu'elles sont essentiellement constituées (près de 80%) de déchets putrescibles, de papiers, de cartons et de plastiques. Les fortes productions de déchets putrescibles (165 et 260 kg/hab.an) peuvent s'expliquer par le nombre important d'établissements gastronomiques (restaurants, cafés, pâtisseries, etc.) dans les secteurs commerciaux.

## II. LES GISEMENTS VALORISABLES PAR COMPOSTAGE

Les résultats d'une caractérisation à l'échelle d'une grande agglomération telle que le Grand Tunis, doivent permettre de donner des indications les plus précises possibles pour les choix de traitement d'une part, mais aussi pour les paramétrages techniques de ces traitements. L'exemple de la caractérisation de l'agglomération de Tunis, à l'occasion de cette thèse, vise donc non seulement à apporter les résultats de caractérisation des gisements (les répartitions des fractions en particulier), mais aussi à apprécier tous les éléments de paramétrage qu'il est possible de mesurer en appréciant la difficulté de leur mesure ou de leur signification. Cette évaluation concrète pourra ainsi valider ou compléter le contenu de la méthode mise au point dans le cadre de cette thèse.

C'est ainsi que les résultats ici présentés par rapport au choix du compostage présenteront non seulement les fractions compostables selon leur quantités, proportions et répartitions géographiques, mais aussi leur identification selon leurs répartitions granulométriques ou leurs composants physico-chimiques (potentiels toxiques, équilibres nutritionnels, etc). La connaissance de tous ces paramètres fondamentaux, étant indispensable pour valider une réelle faisabilité technique du compostage.

### 1. Les gisements par secteurs et par communes :

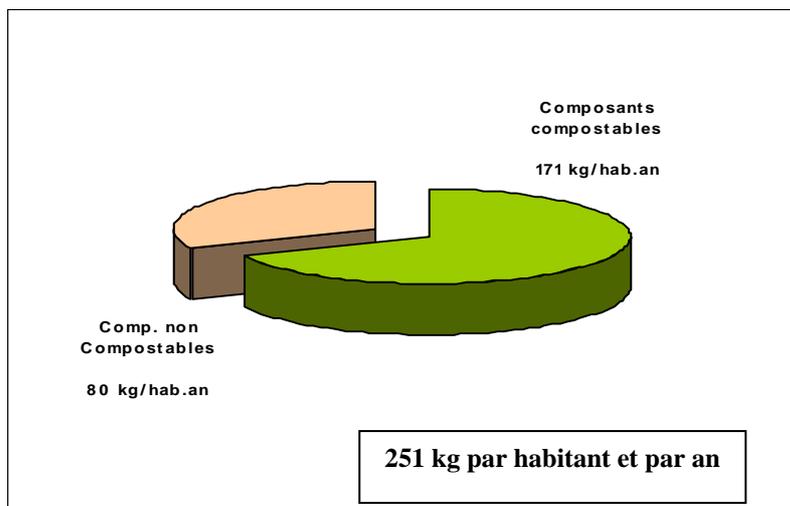
La majeure partie de la masse humide des déchets est constituée de composants valorisables par compostage. Ce gisement représente une production moyenne de 171 kg par habitant et par an (cf.Fig.73), soit près de 298 618 tonnes par an.

#### 1.1. Répartition des gisements par secteurs :

La répartition des gisements valorisables par compostage selon les secteurs est présentée dans la figure 74. Ces gisements se répartissent comme suit :

- 245 621 tonnes (soit 83% du gisement) sont produites par les secteurs résidentiels,
- 52 997 tonnes (soit 17% du gisement) sont produites par les secteurs à caractère commercial

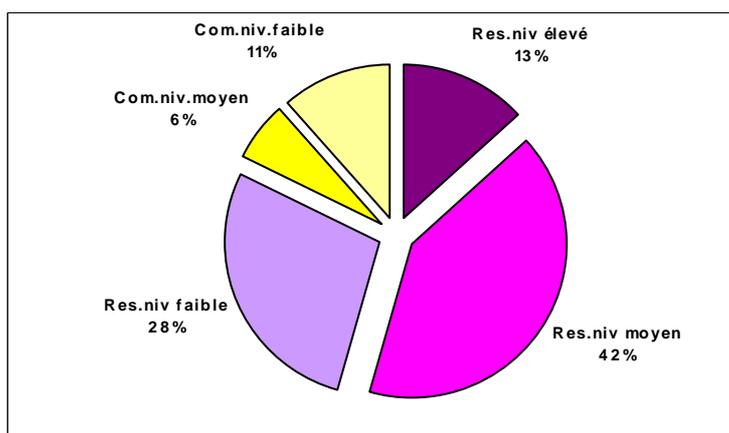
**Figure 73. Gisement potentiel valorisable par compostage (en kg/hab.an de masse humide) dans le Grand Tunis**



Le gisement le plus important se trouve donc dans les secteurs résidentiels, avec une graduation selon les revenus des habitants :

- 122 756 tonnes dans le secteur à revenu moyen (près de 42%),
- 83 183 tonnes dans le secteur à revenu faible (près de 28%),
- 39 681 tonnes dans le secteur à revenu élevé (près de 13%).

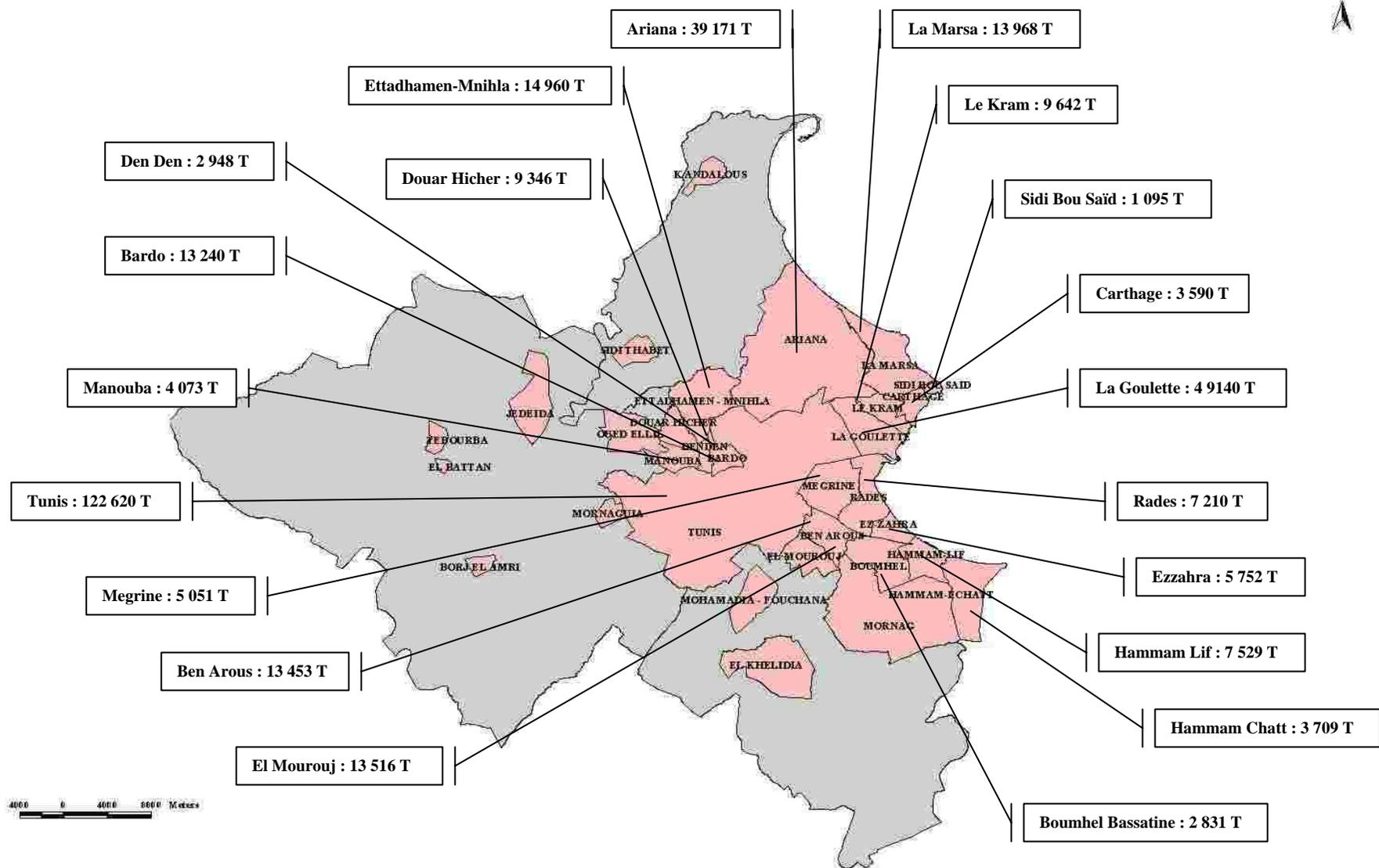
**Figure 74. Répartition des gisements valorisables par compostage selon les secteurs échantillonnés**



**1.2. Répartition des gisements par communes :**

La répartition des gisements valorisables par compostage selon les communes, est présentée dans le tableau 104 et dans la figure 75.

**Figure 75. Tonnages des gisements valorisables par compostage dans les communes du Grand Tunis**



**Tableau 104. Les gisements valorisables par compostage dans les communes du Grand Tunis**

<b>Communes</b>	<b>Déchets produits (t/an)</b>	<b>Gisement Compostable (t/an)</b>
Tunis	183602	122620
Ariana	53824	39171
Ettadhamen-Mnihla	21062	14960
la Marsa	19963	13968
Mourouj	19761	13516
Ben Arous	19668	13453
Bardo	19356	13240
Kram	14097	9642
Douar Hicher	14407	9346
Hammam-Lif	11007	7529
Rades	10541	7210
Ezzahra	8409	5752
Megrine	7384	5051
Goulette	7184	4914
Manouba	5954	4073
Hammam-Chatt	5423	3709
Carthage	5388	3590
Den Den	4544	2948
Boumhel-Bassatine	4365	2831
Sidi Bou Saïd	1644	1095
<b>Total</b>	<b>437582</b>	<b>298618</b>

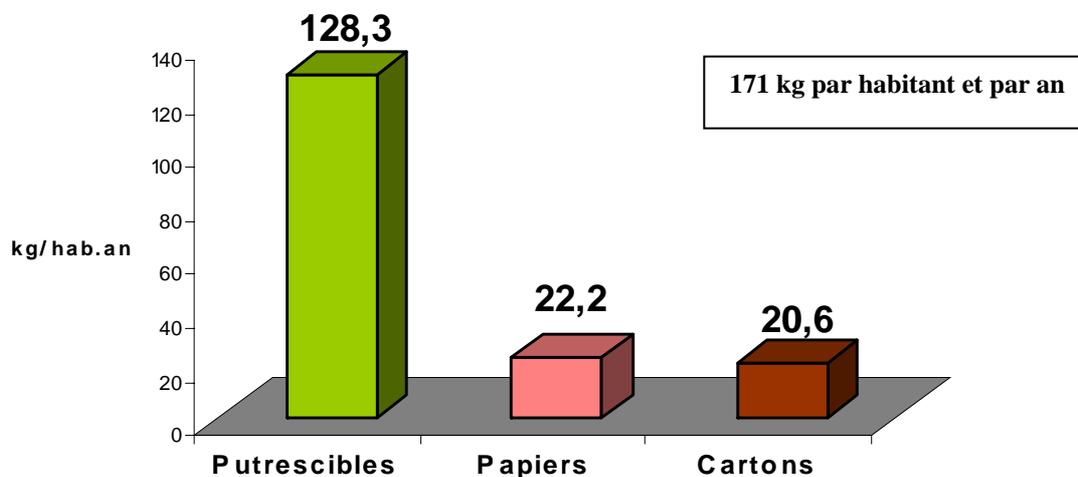
Les gisements de déchets valorisables par compostage varient selon les communes de 122 620 tonnes par an (41% du gisement global) pour la ville de Tunis à 1 095 tonnes par an dans la ville de Sidi Bou Saïd. A ces gisements, peuvent s'ajouter les déchets verts et les déchets des marchés produits par chaque commune. Dans le cas de la ville de Tunis, le gisement global des déchets valorisables par compostage (déchets ménagers, déchets verts et déchets des marchés) peut être estimé à 146 029 tonnes par an.

## 2. Les gisements en termes de catégories :

### 2.1. Le gisements global :

Le gisement potentiel des composants compostables a été approché à partir des données estimées de production des déchets putrescibles, des papiers et des cartons. Ce gisement, évalué en moyenne à 171 kg par habitant et par an, est constitué majoritairement de déchets putrescibles (près de 73%) soit une production moyenne de 128,3 kg/habitant et par an (fig. 76).

**Figure 76. Production moyenne des composants valorisables par compostage  
(en masse humide par habitant et par an)**



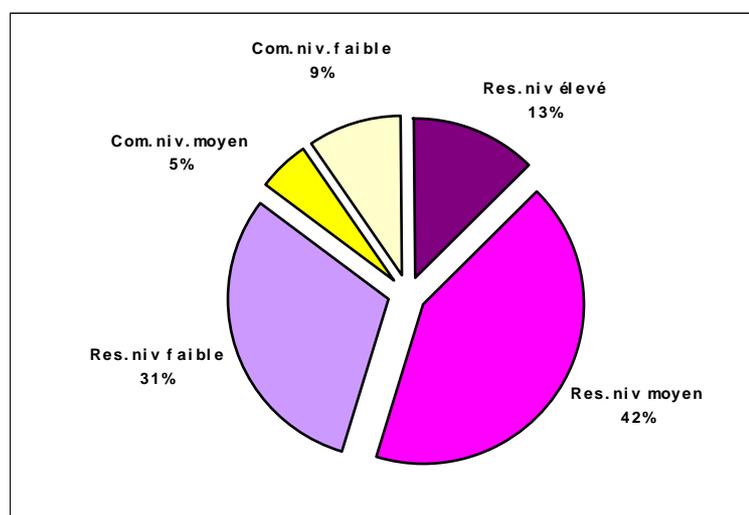
## 2.2. Répartition du gisement entre les secteurs :

Les répartitions des gisements de déchets putrescibles et de papiers-cartons selon les secteurs sont présentées dans les figures 76 et 77.

Les déchets putrescibles sont estimés à 223 904 tonnes par an. Il se répartissent entre secteurs comme suit (Fig. 77) :

- 191 003 tonnes, soit 85% du gisement, sont produites par les secteurs résidentiels,
- 32 900 tonnes, soit 15% du gisement, sont produites par les secteurs à caractère commercial.

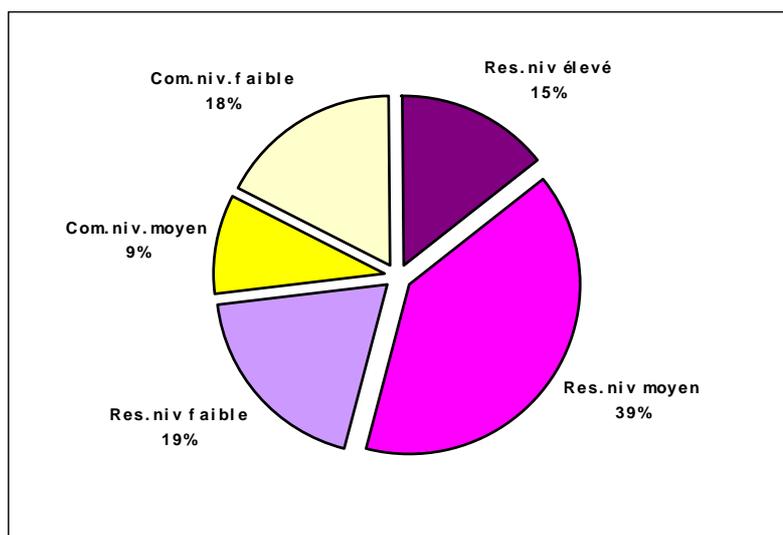
**Figure 77. Répartition des gisements de déchets putrescibles  
selon les secteurs échantillonnés**



Les papiers-cartons sont estimés à 74 714 tonnes par an. Il se répartissent entre secteurs comme suit (Fig. 78) :

- 54 617 tonnes, soit 73% du gisement, sont produites par les secteurs résidentiels (dont plus de la moitié est produite par le secteur à revenu moyen),
- 20 097 tonnes, soit 27% du gisement, sont produites par les secteurs à caractère commercial.

**Figure 78. Répartition des gisements de papiers-cartons selon les secteurs échantillonnés**

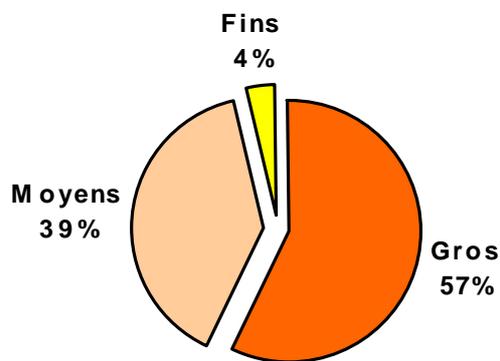
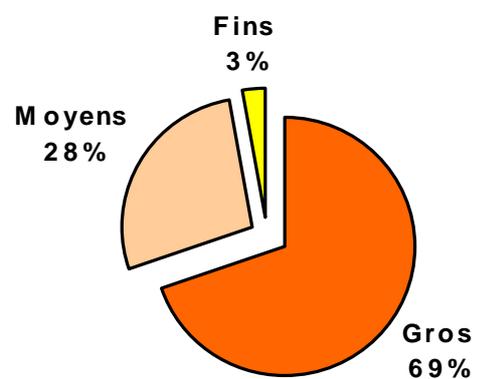
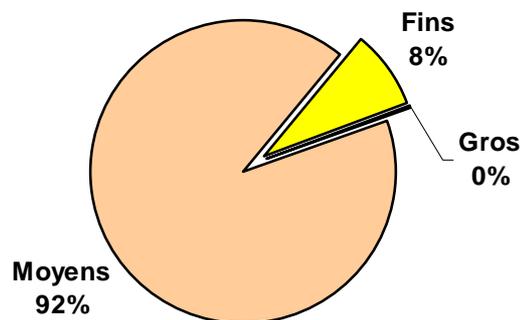


### 3. Les gisements en termes de granulométries :

La qualité d'un compost peut se décrire par son taux d'éléments indésirables (déchets non compostables). L'extraction de ces indésirables (ou impuretés) peut s'effectuer à différentes étapes du processus de compostage par le biais d'opérations mécaniques de tri et de criblage. Différentes phases de criblage peuvent ainsi se succéder durant la fermentation, cependant leur efficacité est étroitement liée aux choix des mailles des cribles utilisés qui doivent permettre l'extraction des déchets fermentescibles compostables en même temps qu'une élimination maximale des impuretés. La connaissance des granulométries de ces différentes fractions est donc d'une grande importance pour atteindre cet objectif de qualité.

#### 3.1. la répartition granulométrique des déchets fermentescibles :

Les répartitions des déchets fermentescibles selon leurs 3 granulométries : les Gros (>100mm), les Moyens (20 – 100mm) et les Fins (<20mm), sont présentées dans les figures 79 (pour les papiers), 80 (pour les cartons) et 81 (pour les putrescibles).

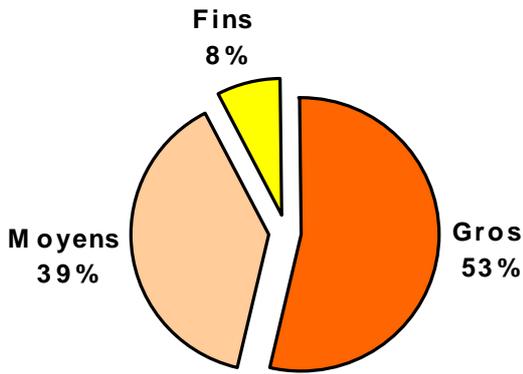
**Figure 79. Granulométries des Papiers****Figure 80. Granulométries des Cartons****Figure 81. Granulométries des Putrescibles**

L'analyse de ces répartitions granulométriques montre qu'un criblage grossier (à la maille 100 mm) serait déconseillé en début du compostage, car il aurait pour effet l'élimination de plus de la moitié des papiers-cartons (57% de papiers et 69% de cartons).

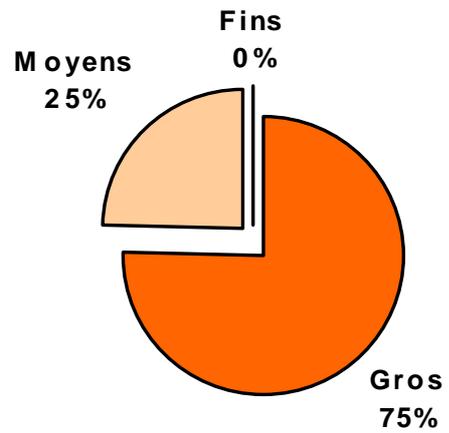
### 3.2. La répartition granulométrique des composants indésirables :

Les composants indésirables dans le compost sont : les composites, les textiles, les textiles sanitaires, les plastiques, les combustibles, les métaux, le verre, les incombustibles et les déchets spéciaux. Les répartitions granulométriques de ces composants, sont présentées dans les figures 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89 et 90.

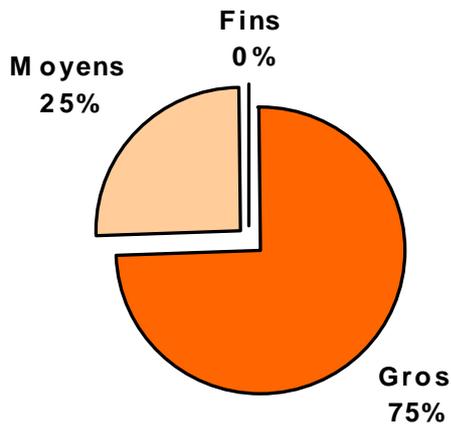
**Figure 82. Granulométries des Composites**



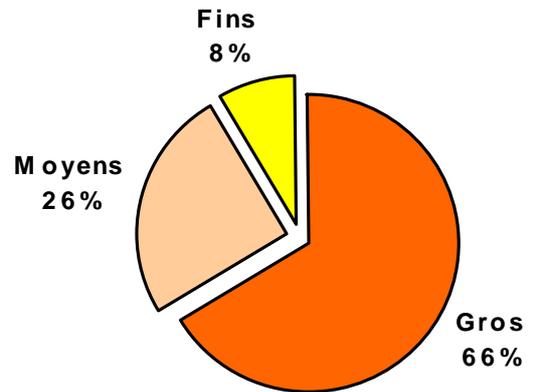
**Figure 83. Granulométries des Textiles**



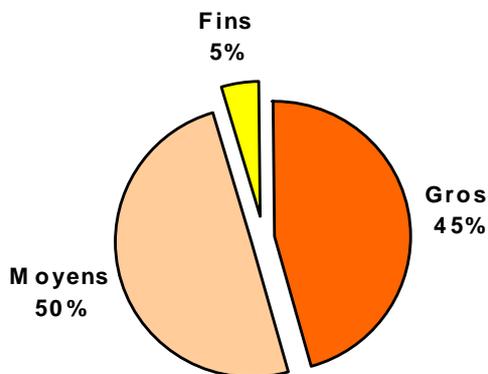
**Figure 84. Granulométries des Textiles Sanitaires**



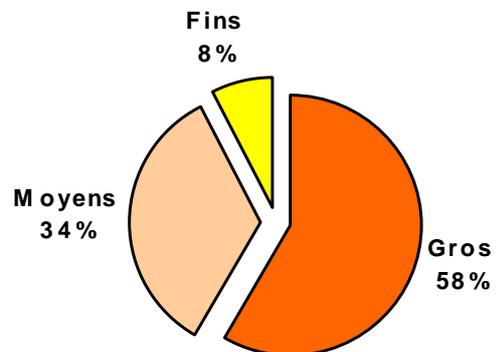
**Figure 85. Granulométries des Plastiques**



**Figure 86. Granulométries des Combustibles**

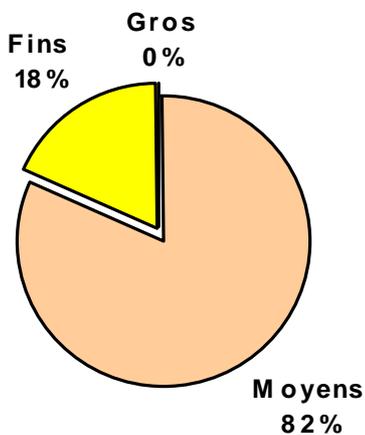


**Figure 87. Granulométries des Métaux**

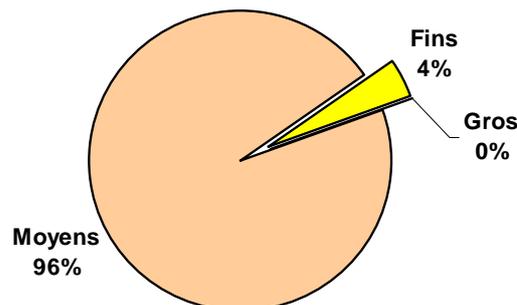


Il apparaît ainsi, que les composites, les textiles, les textiles sanitaires, les plastiques, les combustibles et les métaux sont composés majoritairement (53% à 75%) de matériaux de granulométries supérieures à 100mm.

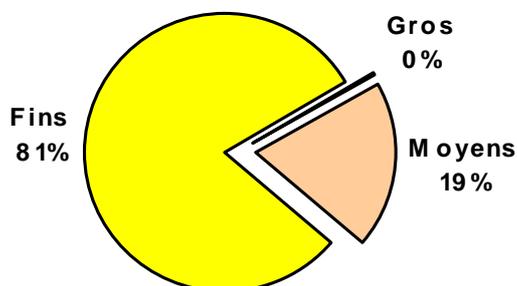
**Figure 88. Granulométries du Verre**



**Figure 89. Granulométries des Déchets Spéciaux**



**Figure 90. Granulométries des Incombustibles**



A l'inverse, le verre et les déchets spéciaux, sont composés majoritairement (82% à 96%) de matériaux de granulométries comprises entre 20 et 100 mm, et les incombustibles sont à 81% composés de fines <20 mm

Un criblage grossier (à la maille 100 mm) durant le compostage aura donc pour effet d'éliminer:

- près de la moitié des composites, des combustibles et des métaux ;
- près de 75% de textiles, de textiles sanitaires et de plastiques.

Enfin, des criblages moyens (à la maille 20 mm) et fins (à la maille < 20 mm) seront nécessaires pour l'élimination du verre (82%), des déchets spéciaux (96%) et des incombustibles (81%).

Cette analyse granulométrique met bien en évidence l'importance du choix des mailles des cribles à utiliser pour l'élimination des indésirables. Cependant, le moment auquel intervient le criblage est crucial, car il doit répondre à deux objectifs de qualité (extraction maximale des matières organiques et contamination minimale par les métaux lourds) qui semblent contradictoires, étant donné la situation suivante :

- plus le criblage est tardif, plus l'extraction des matières organiques sera maximale, car le processus de décomposition aurait réduit au maximum la granulométrie des papiers et des cartons ;
- mais un criblage tardif présente un grand risque de contamination des matières organiques par les ETM, suite à la diffusion des métaux provenant essentiellement des plastiques et des métaux au sein de la biomasse.

#### **4. L'aptitude des déchets au compostage en terme de paramètres physico-chimiques :**

Le compostage met en jeu un ensemble de réactions biochimiques complexes directement dépendantes des 3 paramètres suivants : l'eau, l'oxygène (2 paramètres étroitement corrélés) et la nature du substrat. La caractérisation de ces paramètres dans les déchets entrants est essentielle pour le contrôle et la maîtrise du processus. Par ailleurs, la qualité d'un compost peut se décrire par son innocuité (absence de toxicité vis-à-vis de l'environnement) qui peut être approchée par l'analyse des éléments traces métalliques.

##### **4.1. L'aptitude des déchets au compostage en terme d'humidités :**

Pour un bon déroulement du processus de compostage, les teneurs en eau doivent se situer entre un maximum au delà duquel l'oxygénation des déchets est affectée (concurrence eau/air dans l'occupation de la macro-porosité) et un minimum au-dessous duquel l'activité biologique décroît ou sera bloquée. Ces teneurs limites qui sont variables selon les substrats, sont généralement comprises entre 40 et 70% d'eau.

Les fourchettes des teneurs en eau moyennes des composants valorisables par compostage (putrescibles, papiers, cartons) sont présentées dans le tableau 105. Ces humidités varient selon les saisons, les catégories et leurs granulométries de 33 à 89%, avec des moyennes saisonnières (Fig. 91) de l'ordre de 60% dans les secteurs à caractère commercial et de 70% dans les secteurs résidentiels.

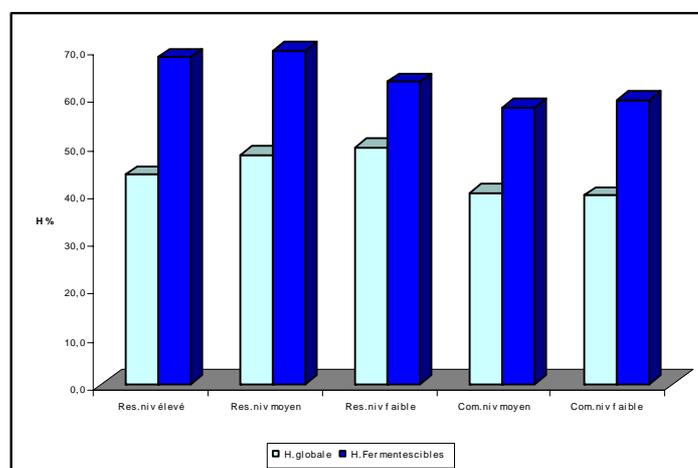
Ces teneurs en eau, en effet proches des limites supérieures, montrent que les composants fermentescibles sont des substrats trop humides, dont le compostage peut se heurter à un risque d'anaérobiose. Pour un déroulement de la fermentation dans des conditions plus favorables, les

humidités globales des déchets qui sont de l'ordre de 50% (cf.Fig.91) pourraient être exploitées pour un effet déshydratant de la masse durant le compostage.

**Tableau 105. Fourchettes des Humidités (en %) dans les composants valorisables par compostage**

Printemps		
Catégories	Granulométries	fourchette de valeurs
Putrescibles	Gros	59 - 83
	Moyens	65 - 69
Papiers-Cartons	Gros	44 - 55
	Moyens	52 - 65
Été		
Catégories	Granulométries	fourchette de valeurs
Putrescibles	Gros	75 - 89
	Moyens	62 - 72
Papiers-Cartons	Gros	52 - 57
	Moyens	58 - 65
Automne		
Catégories	Granulométries	fourchette de valeurs
Putrescibles	Gros	59 - 75
	Moyens	53 - 68
Papiers-Cartons	Gros	33 - 49
	Moyens	48 - 57
Hiver		
Catégories	Granulométries	fourchette de valeurs
Putrescibles	Gros	80 - 89
	Moyens	69 - 76
Papiers-Cartons	Gros	44 - 59
	Moyens	53 - 63

**Figure 91. Comparaison des humidités des composants fermentescibles avec les humidités globales des déchets selon les secteurs échantillonnés**



#### 4.2. L’aptitude des déchets au compostage en terme d’équilibres nutritionnels :

Durant le compostage, l’équilibre nutritionnel des micro-organismes est assuré par les deux principaux éléments suivants : le carbone (C) et l’azote (N). On admet habituellement qu’un bon équilibre entre ces 2 éléments (C/N), se situe entre 20 et 30, car :

- un C/N plus bas conduit à un excès d’azote sous forme ammoniacale (avec dégagement gazeux -NH<sub>3</sub>-).
- un C/N plus élevé limite le développement de la biomasse microbienne faute d’azote et allonge les cinétiques de compostage.

Les composants fermentescibles (putrescibles, papiers, cartons) se caractérisent par des rapports C/N extrêmes qui varient de 13 à 107 (cf Tab.98, Chap 4). L’aptitude des déchets fermentescibles au compostage va donc dépendre des rapports C/N de mélange, qui vont dépendre eux-mêmes de leurs compositions en chaque catégorie.

Sur la base des compositions massiques (en putrescibles, en papiers et en cartons) et des résultats d’analyses en C et en N, les rapports C/N de mélange ont pu être calculés selon les secteurs et selon les saisons. Ces rapports qui sont présentés dans le tableau 106 :

- sont assez faibles (entre 14 et 25) dans les secteurs résidentiels ; les ratios en deçà des valeurs limites étant indiqués en *gras-italique*.
- se situent dans la zone optimale (entre 25 et 30) dans les secteurs à caractère commercial.

**Tableau 106. Rapports C/N de mélange selon les secteurs et les saisons**

	Res.niv élevé	Res.niv moyen	Res.niv faible	Com.niv.moyen	Com.niv faible
Printemps	25	22	20	30	30
Été	<b>17</b>	<b>15</b>	<b>14</b>	28	25
Automne	23	<b>18</b>	20	30	28
Hiver	21	<b>18</b>	<b>19</b>	25	28

Les déchets issus des secteurs commerciaux se caractérisent donc par un bon équilibre nutritionnel qui est dû à leur composition équilibrée en matières azotées (les putrescibles) et en matières carbonées (les papiers-cartons).

Par contre, les déchets issus des secteurs résidentiels se distinguent par des rapports C/N à la limite des valeurs optimum, qui deviennent critiques pendant la saison estivale. Ce déséquilibre nutritionnel des déchets est dû :

- d’une part, à leurs faibles teneurs en papiers et en cartons (matières carbonées),
- et d’autre part, à leur richesse en déchets putrescibles (matières azotées) surtout en été en raison de l’abondance des fruits.

### 4.3. L’aptitude des déchets au compostage en terme de pollution métallique :

La qualité des composts constitue un facteur clé pour la réussite de leur commercialisation et donc la pérennité de la filière de valorisation de la matière organique. Un critère essentiel de la qualité est l’innocuité vis-à-vis des métaux lourds.

Les ETM sont présents dans la plupart des composants des ordures ménagères : plastiques, métaux, verre, piles, etc. (cf. Tab.99). Leur diffusion au sein de la biomasse fermentescible durant le compostage se fait par divers processus : attaques acides, abrasions mécaniques, fragilisation des plastiques, etc. Il est par conséquent très important, de prévoir leurs comportements et d’extraire ces composants polluants de la biomasse en amont du compostage, afin d’éviter la contamination des fractions fermentescibles. Leur répartition dans la masse des déchets selon leur granulométrie est aussi un paramètre très important pour l’appréciation des mesures techniques visant à les écarter au cours du procédé de compostage.

Il faudra enfin tenir compte du fait que ces résultats bruts obtenus dans les déchets devront être confirmés par des tests de paramétrages réels, pouvant seuls donner l’assurance effective du contenu final du compost en ETM.

#### 4.3.1. Les références de normalisation des métaux lourds dans les composts :

Les critères de qualité applicables aux composts varient d’un pays à l’autre, aussi bien en ce qui concerne leur étendue que leurs exigences et leurs valeurs limites. Les seuils des teneurs en éléments traces métalliques dans quelques pays (France et Allemagne) comparés aux normes européennes [75] et [16] sont présentés dans le tableau 107.

Les valeurs limites, imposées par la réglementation européenne (1488/97) s’avèrent très sévères. Généralement, elles ne sont jamais satisfaites même dans le cas des composts issus des collectes sélectives [6].

**Tableau 107. Les valeurs limites (en mg/kg de matière sèche) pour les ETM dans les composts en Europe**

Métaux lourds	Norme européenne CEE 1488/97	Norme allemande Label RAL	Norme française NF U 44-051
Cadmium (Cd)	0,7	1,5	3
Chrome (Cr)	70	100	120
Cuivre (Cu)	70	100	300
Mercure (Hg)	0,4	1,0	2
Nickel (Ni)	25	50	60
Plomb (Pb)	45	150	180
Zinc (Zn)	200	400	600

#### 4.3.2. Les métaux lourds dans la biomasse fermentescible des déchets échantillonnés :

Les six éléments métalliques suivants : le Cadmium, le Chrome, le Cuivre, le Nickel, le Plomb et le Zinc, ont été recherchés dans les fractions fermentescibles (putrescibles, papiers et cartons) et très fines (< 6,3 mm) des échantillons triés (cf. § IV).

**Tableau 108. Teneurs en ETM normées (en mg/kg de MS) dans les fermentescibles**

Printemps						
Secteurs	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Res.niv élevé	nd	nd	nd	nd	6,62	12,82
Res.niv.moyen	nd	nd	6,84	1,23	6,94	16,57
Res.niv faible	nd	nd	5,00	1,33	23,98	5,26
Com.niv.moyen	nd	nd	5,86	0,28	3,02	14,84
Com.niv.faible	nd	nd	5,58	0,19	9,18	32,62
Eté						
Secteurs	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Res.niv élevé	nd	nd	2,36	nd	13,02	nd
Res.niv.moyen	nd	nd	2,42	0,23	16,96	nd
Res.niv faible	nd	nd	3,75	0,51	19,43	22,04
Com.niv.moyen	nd	nd	2,57	nd	10,67	5,56
Com.niv.faible	nd	nd	0,76	nd	2,35	4,54
Automne						
Secteurs	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Res.niv élevé	nd	nd	1,32	nd	9,48	25,05
Res.niv.moyen	nd	nd	2,09	0,16	17,62	14,92
Res.niv faible	nd	0,69	3,53	1,30	14,24	92,48
Com.niv.moyen	nd	nd	3,52	0,22	13,58	12,34
Com.niv.faible	nd	nd	1,76	0,16	9,38	12,45
Hiver						
Secteurs	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Res.niv élevé	nd	2,28	4,69	3,44	5,35	107,76
Res.niv.moyen	nd	nd	2,19	0,11	10,60	26,11
Res.niv faible	nd	nd	3,46	nd	11,35	20,57
Com.niv.moyen	nd	nd	3,37	nd	64,26	32,72
Com.niv.faible	nd	nd	1,32	0,05	6,52	13,23

nd : valeur non détectée par l'appareil de mesure

Les teneurs en ETM dans ces 2 fractions, normées à 30% de MS en matière organique sont présentées dans les tableaux 108 et 109, selon les secteurs et les saisons. La lecture de ces tableaux fait apparaître les éléments suivants :

#### ■ En ce qui concerne les Fermentescibles :

Les teneurs en métaux lourds sont très faibles et même en deçà des valeurs limites les plus sévères, à l'exception de la teneur en plomb (64,26) enregistrée en hiver dans le secteur commercial à revenu moyen. Cette valeur reste malgré tout inférieure aux valeurs limites des normes française et allemande.

■ **En ce qui concerne les Fines :**

Les teneurs en métaux lourds sont plus importantes que celles présentes dans les fermentescibles. Cependant, elles restent en général, en deçà des normes même les plus sévères. Les deux valeurs (indiquées en *gras-italique*) qui dépassent les seuils limites, correspondent à des contaminations par le zinc et le cuivre, respectivement dans le secteur résidentiel (à revenu faible) et le secteur commercial à revenu moyen.

**Tableau 109. Teneurs en ETM normées (en mg/kg de MS) dans les fractions très fines**

Printemps						
Secteurs	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Res.niv élevé	nd	nd	14,89	2,58	50,32	29,12
Res.niv.moyen	nd	8,17	12,78	6,87	54,41	84,06
Res.niv faible	nd	1,61	27,95	9,56	90,81	61,43
Com.niv.moyen	nd	14,90	36,40	1,94	38,37	506,29
Com.niv.faible	nd	nd	23,15	12,45	58,41	113,52
Été						
Secteurs	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Res.niv élevé	nd	nd	20,90	3,30	68,35	46,76
Res.niv.moyen	nd	0,89	25,72	7,72	87,73	86,84
Res.niv faible	nd	nd	23,75	5,98	55,47	134,65
Com.niv.moyen	nd	nd	21,72	0,96	45,03	210,51
Com.niv.faible	nd	nd	8,02	1,97	29,38	32,83
Automne						
Secteurs	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Res.niv élevé	nd	nd	186,40	7,58	125,70	315,52
Res.niv.moyen	nd	nd	7,33	4,85	38,61	142,24
Res.niv faible	0,15	50,12	31,20	47,20	74,06	<b>1113,52</b>
Com.niv.moyen	nd	nd	30,83	5,82	76,74	182,18
Com.niv.faible	nd	nd	179,49	4,32	18,71	137,01
Hiver						
Secteurs	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Res.niv élevé	nd	nd	3,44	2,28	26,59	109,21
Res.niv.moyen	nd	nd	8,98	3,02	50,73	88,92
Res.niv faible	nd	nd	14,12	6,17	76,19	114,73
Com.niv.moyen	nd	nd	<b>423,98</b>	12,09	137,47	237,11
Com.niv.faible	nd	nd	18,94	7,87	50,39	275,33

nd : valeur non détectée par l'appareil de mesure

La pollution des fractions fines par les métaux lourds peut être attribuée à divers déchets polluants tels que : les amalgames dentaires (issus des déchets de cabinets dentaires), les débris de lampes (sous forme d'oxydes comme colorants), les fils de cuivre, etc.

### III. LES GISEMENTS POTENTIELLEMENT VALORISABLES PAR RECYCLAGE

Cette option de recyclage, base des stratégies de gestion des déchets dans les pays développés, a tendance à être promue de manière inconsidérée par les coopérations internationales dans les pays en développement, sans tenir compte des réelles compositions de leurs déchets et des contraintes qui doivent être surmontées. Dans le cas de la Tunisie, la stratégie exemplaire développée au niveau

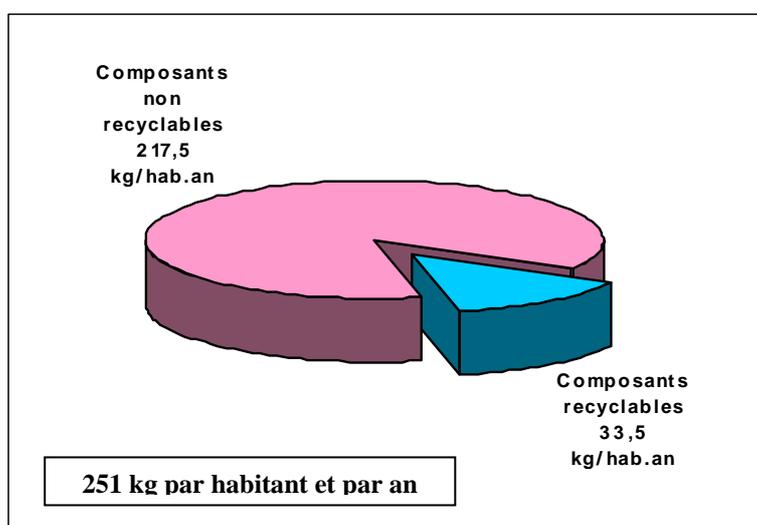
national a pris position pour le recyclage, avec la création d'un système d'organisation et de financement semblable à ceux des pays européens (Eco-emballages en France, etc.), dénommé Eco-Lef. Il est donc indispensable dans ce chapitre, de valider la méthode de caractérisation par rapport à cet objectif potentiel de recyclage.

### 1. Le gisement global en masse humide :

Seulement 13% de la masse humide des déchets sont constitués de composants potentiellement valorisables par recyclage. Ce qui représente une production moyenne de 33,5 kg par habitant et par an, soit près de 58 652 tonnes par an.

Ce résultat ne doit cependant pas être pris en tant que tel pour référence. Il représente des masses qui peuvent être fortement humides du fait de l'humidité globale des déchets. Ce gisement est en réalité sur-évalué par l'eau contenue dans les déchets qui est estimée à plus de 12 000 tonnes.

**Figure 92. Gisement potentiel valorisable par recyclage (en kg/hab.an de masse humide) dans le Grand Tunis**



### 2. Le gisement en terme de catégories et de sous-catégories en masses sèches :

Le gisement de déchets potentiellement valorisables par recyclage dans le Grand Tunis est évalué en masse sèche à 46 177 tonnes par an, correspondant à une production moyenne annuelle de 26,8 kg par habitant. Ce gisement est composé des catégories et sous-catégories suivantes : les textiles, les plastiques (films, bouteilles, autres), le verre et les métaux (ferreux et non ferreux).

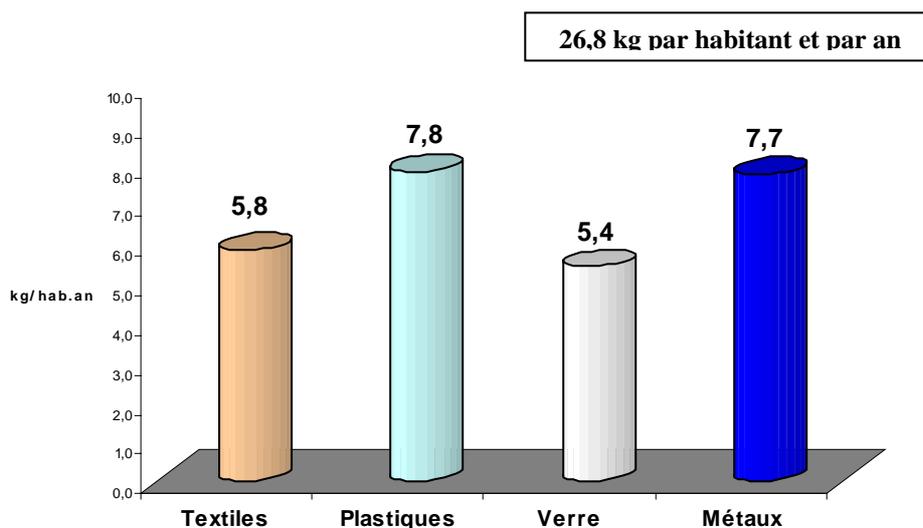
### 2.1. Le gisement en terme de catégories :

Le gisement par catégories a été approché à partir des données de la composition en masses sèches des textiles, des plastiques, du verre et des métaux. Ce gisement est constitué de :

- 10 147 tonnes de textiles,
- 13 616 tonnes de plastiques,
- 9 436 tonnes de verre,
- 12 974 tonnes de métaux.

Les productions moyennes par habitant et par an, auxquelles correspondent ces gisements, sont présentées dans la figure 93.

**Figure 93. Productions moyennes des composants potentiellement valorisables par recyclage (en masse sèche par habitant et par an)**



### 2.2. Le gisement en terme de sous-catégories :

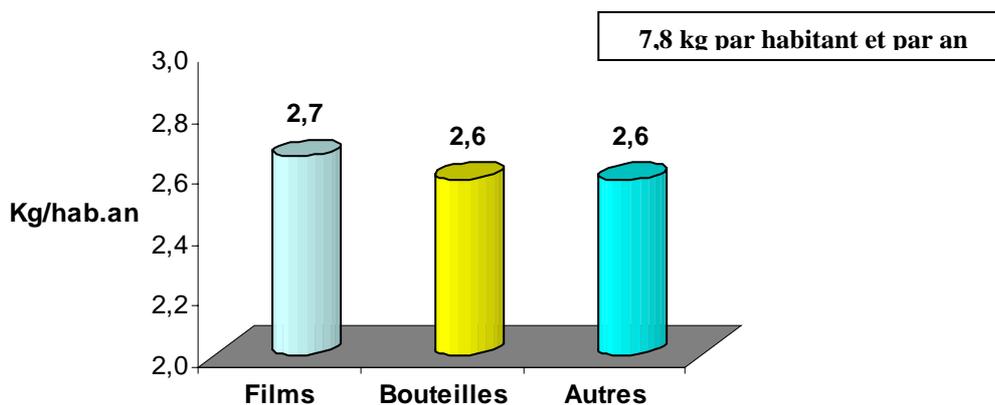
Le gisement par sous-catégories a été approché à partir des données de la composition en masses sèches des composantes des plastiques et de celles des métaux. Les productions moyennes de ces composants dans le Grand Tunis sont présentés en masse sèche par habitant et par an dans les figures 94 (pour les plastiques) et 95 (pour les métaux).

### ■ Les composants des plastiques :

Le gisement des plastiques est composé de :

- 4 626 tonnes de films
- 4 496 tonnes de flacons et de bouteilles
- 4 494 tonnes de composants autres.

**Figure 94. Productions moyennes des composants des plastiques**  
(en masse sèche par habitant et par an)

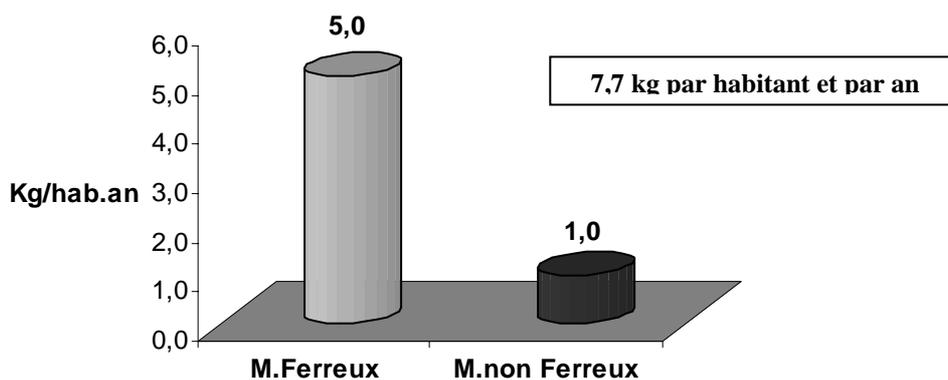


### ■ Les composants des métaux :

Le gisement des métaux est composé de :

- 8 813 tonnes de métaux ferreux,
- 1 705 tonnes de métaux non ferreux.

**Figure 95. Productions moyennes des composants des métaux**  
(en masse sèche par habitant et par an)



### 3. Le gisement potentiel des emballages ciblés par le Système « Eco-Lef » :

Le système Public de Reprise et de Valorisation des déchets d'emballages « Eco-Lef » est un programme de collecte rémunérée des déchets d'emballage en partenariat avec les collectivités locales (cf. 1<sup>ère</sup> partie, Chap1). Les emballages ciblés par le système Eco~Lef sont les emballages plastiques et métalliques (d'une contenance supérieure ou égale à 100 ml) suivants :

- les bouteilles de boissons gazeuses et d'eau (en PET),
- les bouteilles de lait (en PEHD)
- les films et sachets en plastique (en PP )
- les boîtes métalliques (en aluminium)

Les résultats obtenus selon la méthode de caractérisation mise au point, ont permis de quantifier et de localiser tous les déchets ciblés par le système Eco-Lef, selon les secteurs géographiques, et de plus au niveau de chaque commune .

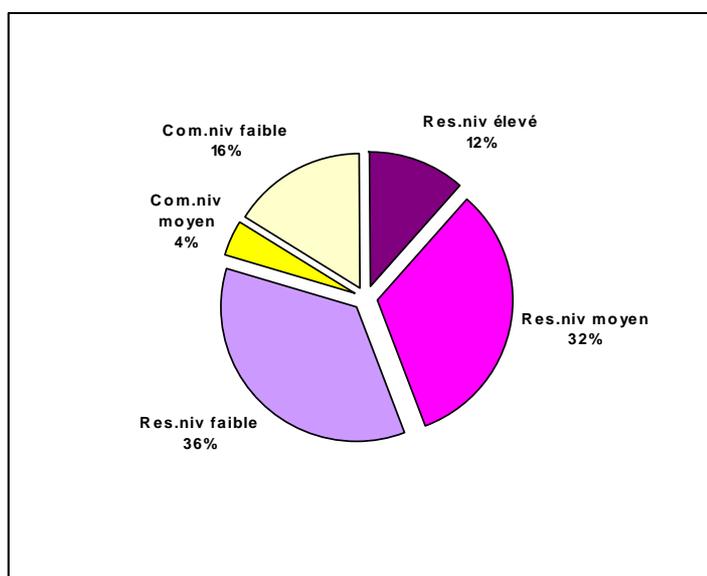
#### 3.1. Répartition des gisements par secteurs :

La répartition des gisements des emballages ciblés par le système « Eco-Lef » est présenté dans les figures 96 (pour les PEHD), 97 (pour les PET), 98 (pour les PP) et 99 (pour l'aluminium).

##### 3.1.1. Répartition des emballages en Polyéthylène Haute Densité (PEHD) :

Les emballages en PEHD sont évalués à 841 tonnes par an. Ce gisement dont la majorité (80%) est produite par les secteurs résidentiels, se répartit entre les secteurs de la manière suivante (Fig 96) :

**Figure 96.** Répartition des emballages en PEHD selon les secteurs échantillonnés



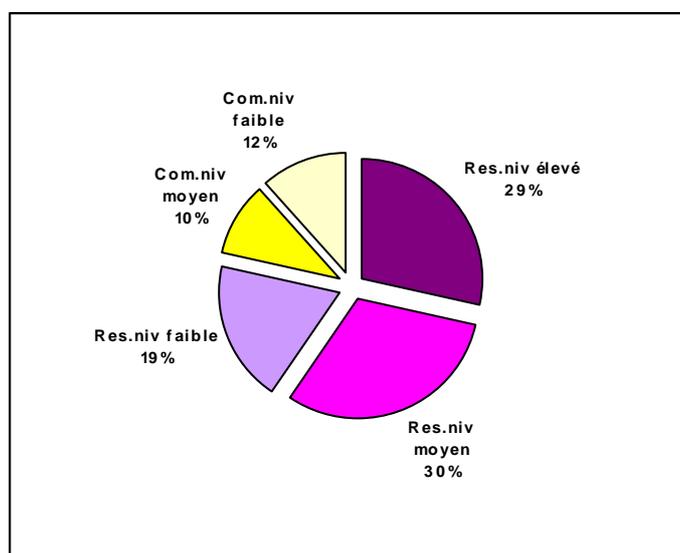
- 297,39 tonnes dans le secteur résidentiel à revenu faible (36%),
- 272,36 tonnes dans le secteur résidentiel à revenu moyen (32%),
- 135,66 tonnes dans le secteur commercial à revenu faible (16%),
- 98,00 tonnes dans le secteur résidentiel à revenu élevé (12%).
- 37,44 tonnes dans le secteur commercial à revenu moyen (4%),

### 3.1.2. Répartition des emballages en Polyéthylène Téréphtalate (PET) :

Le gisement des bouteilles en PET est évalué à 3 462 tonnes par an, dont près de 78 % sont produites par les secteurs résidentiels. Sa répartition entre les divers secteurs, est la suivantes (Fig.97) :

- 1067,65 tonnes dans le secteur résidentiel à revenu moyen (30%),
- 994,46 tonnes dans le secteur résidentiel à revenu élevé (29%),
- 663,65 tonnes dans le secteur résidentiel à revenu faible (19%),
- 399,79 tonnes dans le secteur commercial à revenu faible (12%),
- 336,08 tonnes dans le secteur commercial à revenu moyen (10%).

**Figure 97. Répartition des emballages en PET selon les secteurs échantillonnés**



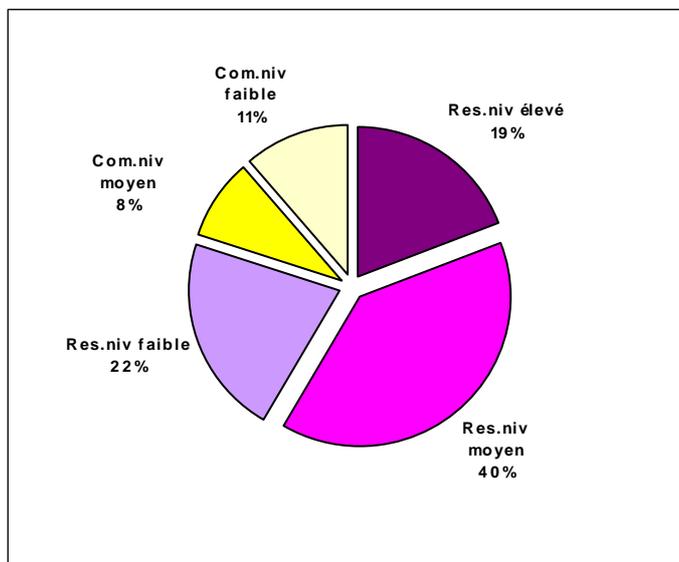
### 3.1.3. Répartition des emballages en Polypropylènes (PP) :

Les emballages en Polypropylènes (ou films) sont évalués à 4 626 tonnes par an. Ce gisement, dont plus de 80% est produit par les secteurs résidentiels, se répartit entre les divers secteurs de la manière suivante (Fig.98) :

- 1 808,54 tonnes dans le secteur résidentiel à revenu moyen (40%),
- 1 013,42 tonnes dans le secteur résidentiel à revenu faible (22%),

- 883,78 tonnes dans le secteur résidentiel à revenu élevé (19%),
- 393,07 tonnes dans le secteur commercial à revenu moyen (11%),
- 527,50 tonnes dans le secteur commercial à revenu faible (8%).

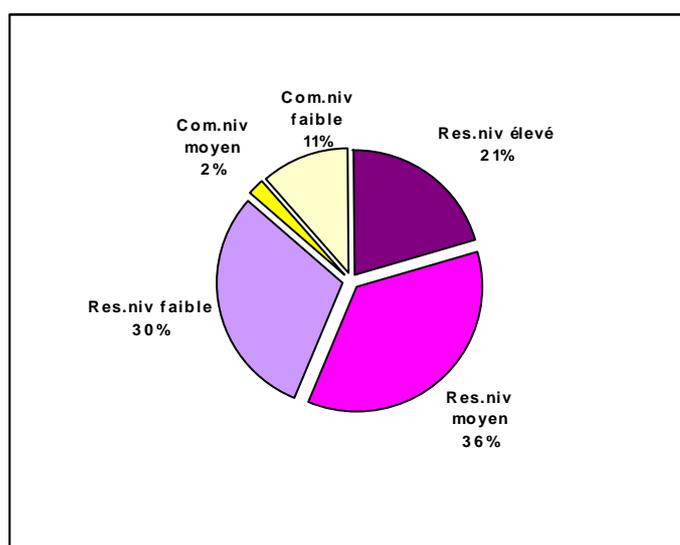
**Figure 98. Répartition des emballages Films selon les secteurs échantillonnés**



### 3.1.4. Répartition des emballages métalliques en aluminium :

Les emballages métalliques en aluminium sont évalués à 1 705 tonnes par an. Ce gisement se répartit entre les secteurs comme suit (Fig.99) :

**Figure 99. Répartition des emballages métalliques en aluminium selon les secteurs échantillonnés**



- 601,79 tonnes dans le secteur résidentiel à revenu moyen (36%),
- 519,55 tonnes dans le secteur résidentiel à revenu faible (30%),
- 352,52 tonnes dans le secteur résidentiel à revenu élevé (21%),
- 194,97 tonnes dans le secteur commercial à revenu faible (11%),
- 35,97 tonnes dans le secteur commercial à revenu moyen (2%).

### 3.2. Répartition des gisements par communes :

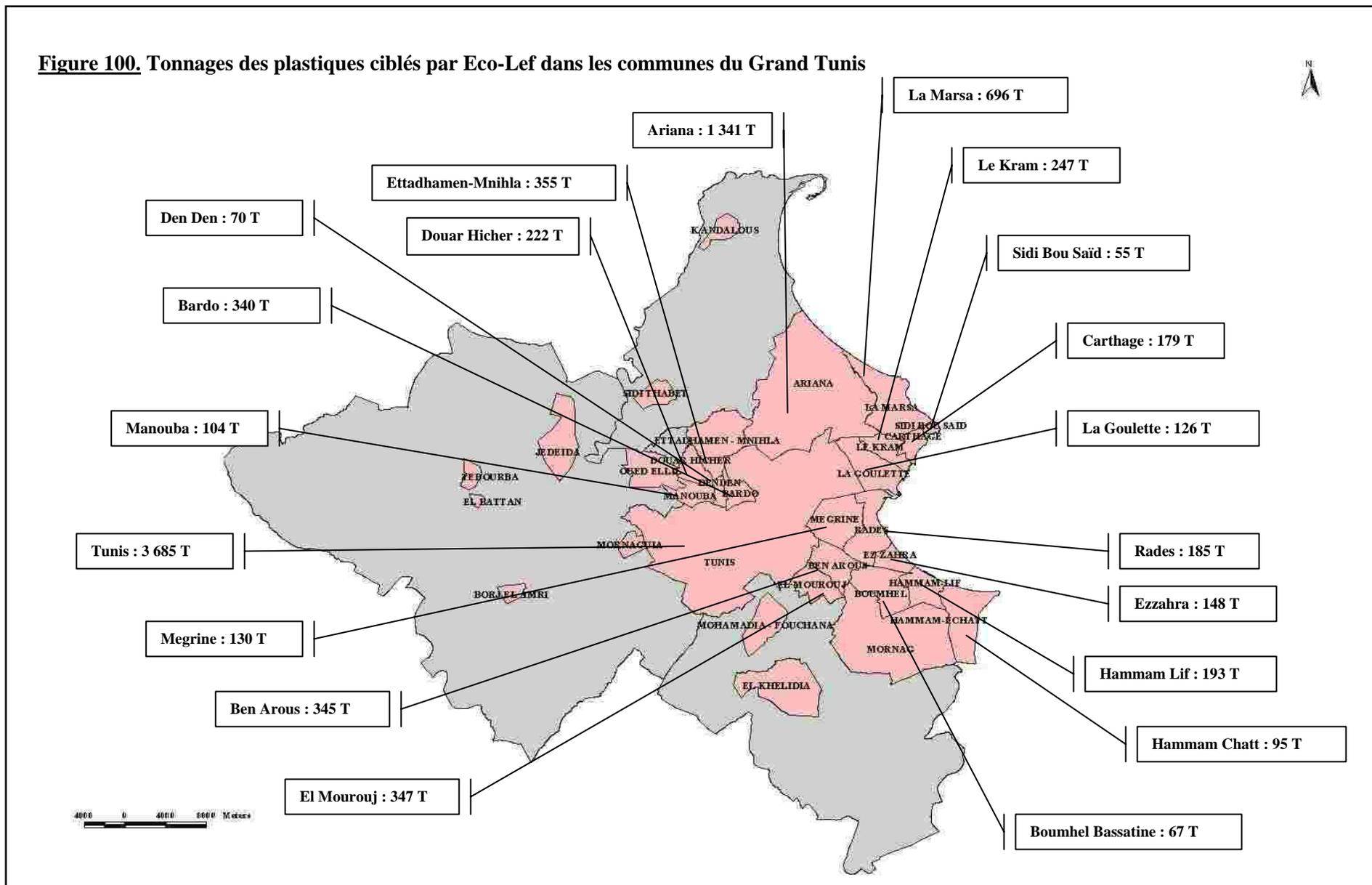
La majorité des emballages ciblés par le système Eco-Lef (près de 84%) sont constitués par des plastiques. La répartition de ce gisement dans les communes du Grand Tunis est présentée dans le tableau 110. et la figure 100.

**Tableau 110. Les gisements des plastiques ciblés par Eco-Lef dans les communes du Grand Tunis**

Communes	Déchets produits (t/an)	Plastiques (Eco-Lef) t/an
Tunis	183602	3685
Ariana	53824	1341
la Marsa	19963	696
Ettadhamen-Mnihla	21062	355
Mourouj	19761	347
Ben Arous	19668	345
Bardo	19356	340
Kram	14097	247
Douar Hicher	14407	222
Hammam-Lif	11007	193
Rades	10541	185
Carthage	5388	179
Ezzahra	8409	148
Megrine	7384	130
Goulette	7184	126
Manouba	5954	104
Hammam-Chatt	5423	95
Den Den	4544	70
Boumhel-Bassatine	4365	67
Sidi Bou Saïd	1644	55
Total	437582	8929

Ces gisements représentent ainsi, environ 2% de la totalité des déchets produits dans le Grand Tunis.

**Figure 100.** Tonnages des plastiques ciblés par Eco-Lef dans les communes du Grand Tunis



#### 4. Bilan et analyse du Système « Eco-Lef » :

En Tunisie, la mise en place des collectes sélectives et la création du système public de reprise et de valorisation des déchets d'emballages « Eco-Lef » avait pour objectif la réduction des quantités d'emballages à collecter (essentiellement ceux en plastiques) tout en apportant des recettes par le biais du recyclage et donc des économies des coûts. Trois systèmes de collecte ont été successivement implantés et testés : en porte à porte, en apport volontaire et en apport rémunéré. Ces systèmes ainsi que les difficultés qu'ils ont rencontrées, sont décrits dans le chapitre 1 de la 1<sup>ère</sup> partie de ce document.

Les systèmes en porte à porte et en apport volontaire, qui se sont révélés très coûteux et inefficaces, ont été abandonnés. Le système en apport rémunéré qui leur a succédé en 2001 est maintenu jusqu'à nos jours, sans que son efficacité technique et économique ne soit confirmée.

Par ailleurs, le constat qui intéresse directement le cadre de cette thèse est que tous ces systèmes ont été implantés sans une caractérisation précise des déchets ciblés par le système Eco-Lef. Il est donc particulièrement opportun d'analyser les conséquences d'une telle lacune, autant du point de vue de la pertinence des choix initiaux stratégiques, que des résultats obtenus. Cette analyse pourra ainsi renforcer la justification de la caractérisation des déchets et expliciter la nature et le degré de précision des paramètres de caractérisation.

##### 4.1. Une évaluation théorique des gisements :

Selon les études réalisées par le Ministère de l'Environnement [23] le gisement des emballages plastiques ciblés par le système Eco-Lef dans tout le territoire tunisien est de 26 000 tonnes par an, composés de :

- 1 000 tonnes/an de films,
- 19 000 tonnes/an de bouteilles en PET,
- 6 000 tonnes/an de bouteilles en PEHD.

Ces résultats ont été acquis de manière théorique pour toute la Tunisie, sans aucune mesure ni analyse réelle des déchets concernés.

Si on compare ce gisement à celui que nous pouvons extrapoler au niveau du pays (avec toute la prudence nécessaire) à partir des résultats de la caractérisation dans le Grand Tunis (cf. tableau 111), nous constatons une surestimation par les études officielles de 10 à 30% des PET et des PEHD, et une sous-estimation de plus de 2 000 % en ce qui concerne les films.

Ces erreurs dans l'estimation officielle des gisements peuvent d'ailleurs être confirmés par les résultats effectifs de la collecte présentés ci-après (cf. tableau 112) avec plus de 3 000 tonnes de films collectés en 2004.

**Tableau 111. Les gisements d'emballages en plastiques (en tonnes/an) estimés dans toute la Tunisie**

	Estimations officielles (théoriques)	Estimations à partir des résultats de la caractérisation sur Tunis
Films	1 000	23 130
PET	19 000	17 310
PEHD	6 000	4 205

#### 4.2. Une inefficacité technique et économique :

Le bilan des emballages plastiques collectés sur la période 2001-2004 [47] est présenté dans le tableau 112. En se basant sur les gisements estimés à partir des résultats de la caractérisation (cf. tableau 111), l'évolution des taux de collecte peut être estimée comme suit :

- pour les films : de 1,8% (en 2001) à 14% (en 2004),
- pour les PET : de 3,6% (en 2001) à 15% (en 2004),
- pour les PEHD : de 1,3% (en 2001) à 5% (en 2004).

**Tableau 112. Plastiques collectés (en tonnes/an) sur la période 2001-2004**

	2001	2002	2003	2004
Films	415	1148	1341	3 247
PET	621	1085	1625	2 716
PEHD	54	164	178	228
Total	1 090	2 397	3 144	6 191

On notera ainsi, que la connaissance de ces taux de collecte est particulièrement indispensable à l'appréciation d'un résultat effectif pour tel ou tel produit soumis à une collecte sélective : les résultats constatés sont en effet extrêmement hétérogènes et faibles. L'absence de données issues de la caractérisation ne permettait pas de disposer de ces bases indispensables pour le choix de produits soumis à une collecte sélective, de même que d'assurer le « pilotage » de résultats effectifs au cours du développement des diverses actions.

En ce qui concerne les aspects économiques, après leur collecte, les plastiques sont transformés en granulés et vendus à l'exportation à raison de 500 dinars la tonne (soit 300€ la tonne).

Selon l'ANGED, le coût de la collecte des emballages plastiques se situe entre 550 et 750 dinars la tonne (rémunération des collecteurs, équipement et gestion des points de collecte, etc.), sans compter le coût du traitement (lavage, transformation en granulats, etc.).

Le bilan économique présenté dans le tableau 113 met en évidence les lourds déficits induits par la collecte sélective, avec des surcoûts dépassant le million de dinars (en 2004) si on ajoute le coût du traitement, qui sont donc à la charge du système Eco-Lef.

**Tableau 113. Bilan économique des plastiques collectés sur la période 2001-2004**

	2001	2002	2003	2004
Plastiques collectés (tonnes/an)	1 090	2 397	3 144	6 191
Coûts moyens de la collecte en dinars (sans traitement)	708 500	1 558 050	2 043 600	4 024 150
Revenus de la vente des plastiques (en dinars)	545 000	1 198 500	1 572 000	3 095 500
Déficit (en dinars)	163 500	359 550	471 600	928 650

#### **4.3. Interprétation générale, enjeu de la caractérisation et confirmation des paramètres déterminants :**

Le bilan et l'analyse du système Eco-Lef que nous venons de présenter mettent en évidence les limites d'un choix pour les collectes sélectives dans un cas comme celui de la Tunisie ou d'un pays en développement en général, en raison d'une faible efficacité technique et d'un coût extrêmement élevé (les deux paramètres étant liés).

Mais ils mettent surtout en évidence l'absence de bases réelles et déterminantes pour justifier les choix initiaux, puis le pilotage des résultats du fait de l'absence de bases de caractérisation et de localisation du potentiel de récupération ; sans compter de plus, la méconnaissance des produits ciblés par le recyclage, de leur nature et de leurs débouchés effectifs.

Tous ces fondements stratégiques dépendent d'une caractérisation fine et précise des gisements, permettant d'apprécier les variations spatio-temporelles selon les communes, les secteurs et les

saisons, tel que le montrent les résultats de la caractérisation du Grand Tunis, présentés dans ce chapitre.

Ces résultats permettent de visualiser commune par commune, tous les gisements potentiels selon les produits mobilisables et leurs caractéristiques physiques ou chimiques (composition chimique, degré d'humidité, densité, degré de souillure, etc.). Ce bilan est fondamental pour confirmer la méthode de caractérisation et ses modalités d'application, et justifier les enjeux potentiels et les objectifs de recyclage.

**CONCLUSION**

Dans les pays en développement, l'absence fréquente ou l'insuffisance des démarches de caractérisation des déchets, en préalable à la mise en œuvre des projets, ne permet pas d'apporter les fondements nécessaires à des choix raisonnés et conduit très souvent à des erreurs dans les modes de traitement. Ces démarches supposent aussi d'être menées par des laboratoires spécialisés dans le domaine des déchets, disposant de compétences et d'équipements pour concevoir des méthodologies opérationnelles et adaptées aux contraintes des PED.

En Tunisie, « *la Plate-forme Expérimentale sur les Déchets* » que la Technopôle de Borj Cedria est en train de mettre en place, a permis la conception d'une telle méthodologie. Les principaux résultats des travaux de recherche de cette thèse, menés dans ce cadre, sont les suivants :

- la mise en évidence des enjeux de la caractérisation des déchets ménagers dans les PED et de la nécessité d'utiliser des méthodes rigoureuses et adaptées aux spécificités de ces pays, répondant à leurs contraintes opérationnelles ;
- la mise au point d'une telle méthode de caractérisation et sa validation dans le cas du Grand Tunis (Tunisie) ;
- la réalisation de la caractérisation globale des déchets ménagers dans le Grand Tunis, d'un point de vue quantitatif et qualitatif, et la cartographie des gisements potentiellement valorisables ;
- la mise en évidence de l'importance de la caractérisation des déchets, non seulement pour prendre position sur les choix de traitement mais de plus pour apporter des éléments basiques de paramétrage de ces choix, principalement pour le compostage.

Enfin, en synthèse de ces divers résultats, la formalisation des principes de la méthode de caractérisation et de ses modalités d'application est proposée dans une dernière partie de cette conclusion.

### ***1. Les enjeux de la caractérisation des déchets ménagers dans les PED et le besoin de méthodes rigoureuses, opérationnelles et adaptées***

Trois constats et analyses fondamentaux ont été établis sur la base de recherches bibliographiques et de notre propre expérience de terrain. Ils mettent en évidence le besoin de la caractérisation des déchets en tant que préalable indispensable à toute stratégie ou projet de traitement.

#### **➤ L'analyse des échecs et des difficultés des projets « Déchets » qu'ils soient réalisés par les gouvernements ou par les bailleurs de fonds :**

Cette analyse a fait apparaître des difficultés d'adaptation des technologies et l'absence d'analyses spécifiques aux conditions locales, qui peuvent être expliquées par les raisons suivantes :

- l'insuffisance des analyses nécessaires pour connaître de manière détaillée la nature des déchets et les spécificités locales,

- l'absence des tests paramétriques préalables pour caractériser les process lors des procédures de Schémas-Directeurs ou d'études de gestion des déchets,
- l'absence de programmes de Recherche-Développement et finalisée dans le domaine des déchets, elle-même liée à l'absence de budgets de recherche en ce domaine.

➤ **Le constat de la faible connaissance des déchets :**

Cette faiblesse en matière de caractérisation des déchets, qui est la source des nombreux échecs ou erreurs de leur gestion, apparaît être due principalement :

- à la conscience peu développée du besoin d'une caractérisation précise des déchets comme un des fondements des positions d'une politique,
- aux difficultés administratives et financières pour dégager des fonds pour la réalisation de la caractérisation qui est une opération coûteuse et fastidieuse,
- à l'absence de méthodes de caractérisations rigoureuses, qui ont été préalablement adaptées aux contraintes et aux objectifs de caractérisation des PED,
- à l'absence de laboratoires spécialisés dans le domaine des déchets, disposant de compétences et d'équipements pour mettre en œuvre une méthode adaptée et pour réaliser des analyses elles-mêmes spécifiques.

➤ **La mise en évidence des différences extrêmes entre les pays développés et ceux en voie de développement, ce qui impose des méthodes adaptées aux contraintes et aux spécificités des PED :**

Les déchets des PED sont le résultat d'un si grand nombre de conditions de production différentes des pays développés, que l'on doit considérer qu'ils sont tout simplement différents et entrer dans une logique de caractérisation propre à ces pays.

Leurs grandes hétérogénéités et variabilités climatiques, urbaines et socio-économiques, rendent inopérantes les méthodes développées dans les contextes des pays industrialisés et imposent une démarche méthodologique basée sur des mesures et analyses réelles d'échantillons représentatifs, selon des protocoles précis et de plus adaptés à la nature des déchets et aux contextes locaux des pays en développement. Pour cela, les modalités suivantes doivent être impérativement appliquées :

- les campagnes de caractérisation doivent être menées durant les saisons extrêmes ;
- les zones d'étude doivent être découpées en secteurs présentant des caractéristiques spatiales et socio-économiques homogènes, ce qui amènera vraisemblablement à un grand nombre de secteurs, étant donné les grandes hétérogénéités des PED ;
- le protocole d'échantillonnage doit être rigoureux, assurant une représentativité des échantillons et basé sur des caractéristiques propres aux déchets locaux (masses fragmentaires, humidités, ...) et le mode de tri doit être opérationnel et adapté ;
- un ensemble d'analyses physico-chimiques doivent être réalisées. Elles doivent permettre d'obtenir les indications nécessaires aux choix des traitements.

## **2. La mise au point d'une méthode de caractérisation des déchets ménagers adaptée à la situation des pays en développement**

Pour répondre aux contraintes et spécificités des pays en développement, une méthode de caractérisation des déchets ménagers adaptée a été mise au point. Ses bases scientifiques et opérationnelles reposent sur un principe de démarche méthodologique intégrant les contraintes des PED, une stratégie d'échantillonnage basée sur des fondements statistiques et un mode de tri adapté.

### ➤ **Une démarche méthodologique intégrant les contraintes des PED :**

La démarche méthodologique comporte les quatre étapes classiques de la caractérisation : enquêtes préalables aboutissant en particulier à la sectorisation, organisation des campagnes sur la base des informations recueillies, réalisation des campagnes comprenant les opérations d'échantillonnages et de tris, et réalisation des analyses au laboratoire. Cependant, contrairement aux démarches habituelles, elle se distingue par l'importance des deux étapes suivantes :

- d'une part, l'envergure de la collecte des données et l'analyse des contraintes, car : les données sont souvent absentes et peu fiables lorsqu'elles existent, les moyens locaux sont généralement limités, les budgets pour les analyses sont faibles, la nature des déchets est très contraignante pour leur manipulation et leur tri (en particulier à cause de leur humidité), etc.
- et d'autre part, l'intégration de ces contraintes dans la démarche méthodologique, en particulier : l'évaluation des divers flux de déchets et leur quantification, l'identification des divers producteurs de déchets et leur regroupement selon leur typologie, le choix des camions d'échantillonnage à partir de l'identification des circuits de collecte, etc.

Dans le cas des PED, la caractérisation des déchets s'avère plus complexe en raison de leurs grandes diversités urbaines et socio-économiques et plus fastidieuse en raison des aléas opératoires et des moyens le plus souvent limités. Si dans les Pays développés, la phase préalable aux campagnes de caractérisation est réalisée en 1 ou 2 semaines, dans les PED elle peut nécessiter et s'étaler sur plusieurs mois d'enquêtes et d'organisations. Pourtant, la durée qui lui est habituellement consacrée ne dépasse généralement pas les deux semaines. Ce temps trop court ne peut qu'entraîner les conséquences négatives suivantes :

- les données collectées sont souvent incomplètes ou peu précises,
- des erreurs de tri sont commises, en raison d'une part, de la non maîtrise du tri des matériaux et de leur identification par le personnel et d'autre part, de l'état rudimentaire du matériel de tri,
- les résultats ne sont pas précis, car issus de protocoles d'échantillonnage non fondés et de modes de tri non adaptés,
- les analyses physico-chimiques sont rarement réalisées ou incomplètes.

Cette analyse a été mise en évidence par l'application de la démarche méthodologique dans le cas du Grand Tunis. C'est ainsi que, la phase préalable a nécessité plus d'une année entière d'enquêtes et de préparations malgré les moyens considérables disponibles à la Technopôle de Borj cedria et ceux mis à la disposition du projet par les partenaires institutionnels.

➤ **Une stratégie d'échantillonnage basée sur des fondements statistiques et des données propres aux déchets des pays concernés :**

Les méthodes de caractérisation des déchets existantes répondent rarement aux exigences statistiques de l'échantillonnage et leur utilisation dans les PED ne peut aboutir qu'à des résultats imprécis. Pour garantir une réelle représentativité, la stratégie d'échantillonnage que nous proposons tient compte de la variabilité intrinsèque de la composition des déchets en faisant appel aux principes statistiques de l'échantillonnage des déchets et en s'appuyant sur les caractéristiques des déchets locaux. Les éléments de cette stratégie sont principalement :

- les paramètres d'échantillonnage, comprenant la masse des prélèvements élémentaires, le nombre des prélèvements dans une benne et le nombre de bennes à analyser ;
- et l'erreur fondamentale d'analyse minimale engendrée par l'hétérogénéité des matériaux dans les échantillons prélevés, pour chacune des catégories composant les déchets étudiés.

La détermination des paramètres d'échantillonnage et des erreurs d'analyses doit s'appuyer sur des bases de données propres aux déchets locaux, en particulier celles concernant les masses fragmentaires de chaque catégorie de déchets. Pour cela, une « analyse test » doit être réalisée en préalable des campagnes de caractérisation.

Cette analyse est indispensable et ses résultats sont spécifiques au contexte de chaque pays. Elle permet également de préciser la nomenclature de tri, c'est-à-dire le nombre de catégories et de sous-catégories, qui doivent être hiérarchisées selon leur importance dans les ordures étudiées.

➤ **Un mode de tri adapté à la nature des déchets des PED et à leurs contraintes :**

L'analyse des modes de tri existants (sec et humide) fait apparaître leur non adaptation aux contraintes des pays en développement qui sont principalement les suivantes :

- d'une part, la nature des déchets très organique et très humide, ce qui peut induire des erreurs en modifiant leur composition réelle (phénomènes d'adhérences, transferts de granulométries, ... ) ;
- et d'autre part, les conditions pratiques de tri et de manipulation qui sont très difficiles et les capacités de séchage qui sont souvent limitées.

Pour apporter une solution opérationnelle à l'ensemble de ces contraintes, un mode de tri adapté a été mis au point. Il comprend les deux phases complémentaires et successives suivantes :

- une phase de tri préalable des déchets bruts en tranches granulométriques et en grandes catégories groupées selon le degré de putrescibilité des déchets,
- une phase de tri complet ultérieur des déchets séchés, concernant toutes les catégories et sous-catégories pré-définies.

Un test expérimental comparatif sur des déchets préalablement reconstitués fait clairement apparaître que le « tri adapté » est plus efficace que les tris « sur humide » et « sur sec » :

- sur le plan du coût et de la rapidité, le tri adapté est :
  - deux fois plus rapide que le tri sur humide,
  - moins coûteux en matériel de séchage que le tri sec, car il nécessite 15 fois moins de capacité de séchage,
  - moins coûteux en main d'œuvre que le tri sur humide car il nécessite 2 fois moins de personnel.
- sur le plan de la précision, le tri adapté bénéficie des avantages des deux modes de tri (sec et humide) sans supporter leurs inconvénients :
  - comme le tri sur humide, il réduit le fractionnement des putrescibles suite à leur séchage : ce qui réduit les erreurs de 44% (par rapport au tri sec),
  - comme le tri sur sec, il réduit le colmatage des putrescibles sur certains matériaux, en les libérant après séchage : ce qui réduit les erreurs de près de 30% (par rapport au tri humide).
- sur le plan opérationnel, le tri adapté est le seul à pouvoir répondre aux contraintes et aux spécificités des PED :
  - il permet le tri immédiat des déchets suite à leur échantillonnage,
  - il n'alourdit pas le travail des trieurs sur site qui se fait dans des conditions de travail très difficiles,
  - il permet de réduire les quantités de déchets à sécher et donc les capacités de séchage nécessaires,
  - il permet de programmer le tri des fractions ultérieurement et indépendamment des opérations lourdes d'échantillonnage sur site.

Ce mode opératoire sera soumis, très prochainement, à une normalisation qui intégrera tous les détails de sa conception.

### ***3. La caractérisation quantitative et qualitative des déchets ménagers dans le Grand Tunis et la cartographie des gisements potentiellement valorisables***

En Tunisie, la mise en place des projets concernant les déchets ménagers et assimilés repose sur une composition adoptée dès l'année 1992, de manière unique pour tout le pays. Cependant, cette composition prise pour référence officielle ne peut donner une représentation réelle des déchets, en raison du manque de rigueur scientifique et opérationnelle des méthodes utilisées et de la non prise en compte des paramètres de variations saisonnières, urbaines et socio-économiques dans la caractérisation des déchets. Cette mauvaise prise en compte de la nature des déchets et de leurs variations spatio-temporelles, apparaît sans aucun doute, à la source des nombreux échecs et difficultés rencontrés dans la gestion des déchets ménagers en Tunisie.

C'est en référence à cette situation, que la disponibilité de réels résultats utilisables dans les projets et la mise au point d'une méthode de caractérisation des déchets adaptée se sont imposées. La méthode adaptée qui est l'objet de ce travail de thèse, a été validée dans le cas du Grand Tunis, capitale politique et économique de la Tunisie, représentant une population de 2 247 800 habitants.

Le choix de cette cité, capitale d'un pays en développement, – qui a tenu certes à la disponibilité des moyens de travail - a permis de confirmer l'intérêt stratégique de disposer de résultats réels et exhaustifs à l'appui des options de la gestion des déchets dans cette agglomération dont on connaît les problèmes d'envergure rencontrés. Enfin, la masse des résultats obtenus pour tous les paramètres recherchés a permis une analyse globale et de fond des modes de production et de comportement des déchets.

L'application de la méthode et la caractérisation des déchets ménagers et assimilés dans le Grand Tunis a nécessité l'échantillonnage de près de 12 tonnes de déchets qui ont subi plus de 20 000 opérations de tris et de criblages, dans le but de la détermination des répartitions des composants et des catégories des déchets à chaque saison et dans chaque secteur socio-économique de l'agglomération de Tunis.

Les résultats quantitatifs et qualitatifs obtenus sont de 3 ordres :

- la composition moyenne des déchets ménagers et assimilés dans le Grand Tunis, avec mise en évidence des différences entre les PED et les pays développés ;
- les compositions saisonnières et sectorielles des déchets ménagers et assimilés, avec mise en évidence de la pertinence de la sectorisation ;
- la quantification et la répartition géographique des gisements potentiellement valorisables.

➤ **La composition moyenne des déchets ménagers et assimilés :**

De manière générale, la composition moyenne des déchets ménagers et assimilés dans le Grand Tunis se caractérise par une fraction organique (putrescibles, papiers, cartons) importante, variant de 61 à 76% du poids humide des déchets. Cette part représente une production moyenne de 171 kg par habitant et par an, par rapport à la production moyenne globale des déchets (estimée à 251 kg par habitant et par an) avec une part majoritaire de matières organiques putrescibles de 128 kg par habitant et par an.

Si on compare cette composition à celle d'un pays développé tel que la France, des constats fondamentaux sont mis en évidence :

- La quantité de déchets putrescible produite par habitant est du même ordre que celle des pays développés, contrairement aux jugements émis habituellement qui laissent penser que les déchets dans les PED contiendraient plus de matières organiques putrescibles. La présentation habituelle en % induit ce type d'appréciation erronée.
- Ce n'est cependant pas le cas pour les autres composants des déchets, principalement en ce qui concerne le verre et les plastiques, dont les productions par habitant sont respectivement 11 fois et 4 fois moindre qu'en France.
- Cette composition est néanmoins une moyenne qui masque les grandes disparités spatio-temporelles spécifiques des pays en développement, contrairement aux pays développés où la composition des déchets ne varie que très faiblement d'une saison à l'autre, et entre les villes et les quartiers. Cette disparité confirme l'importance de la sectorisation dans les opérations de caractérisation.

➤ **Les compositions sectorielles et saisonnières des déchets ménagers et assimilés :**

Pour pouvoir étudier la variabilité de la composition des déchets ménagers dans l'espace et dans le temps, quatre campagnes de caractérisation ont été réparties uniformément sur l'année et réalisées dans les 5 zones urbaines identifiées par sectorisation : 3 secteurs résidentiels (à revenus : faible, moyen et élevé) et 2 secteurs commerciaux (à revenus : faible et moyen).

La caractérisation durant ces 4 campagnes a abouti à des variations extrêmement importantes dans la production et la composition des déchets, ce qui met clairement en évidence l'influence des facteurs saisonniers et socio-économiques et montre la pertinence de la sectorisation retenue.

- Sur le plan quantitatif, de grandes disparités sont enregistrées dans la production globale des déchets, qui varie selon les secteurs de 185 kg par habitant et par an à près de 600 kg par habitant et par an :
  - les fortes productions sont enregistrées dans les secteurs résidentiels à revenus élevés et dans les secteurs commerciaux,

- une corrélation entre les taux de production des déchets et les revenus des habitants est constatée, traduisant l'augmentation de la consommation dans les quartiers aisés.

On assiste ainsi, dans certains de ces secteurs à des productions de déchets très importantes qui peuvent égaler et même dépasser celles générées par les pays développés (la production des déchets en France étant de 416 kg/hab.an).

- Sur le plan qualitatif, les principales disparités dans la composition des déchets sont enregistrées au niveau des déchets putrescibles, des papiers, des cartons et des plastiques.
  - dans les secteurs commerciaux, les déchets apparaissent essentiellement constituées (72%) de déchets organiques fermentescibles (putrescibles, papiers, cartons), avec de très fortes productions de putrescibles (atteignant les 260 kg/hab.an).
  - dans les secteurs résidentiels, les productions en putrescibles et en déchets d'emballages enregistrent une nette augmentation dans les quartiers « riches » par rapport aux quartiers « pauvres » : de l'ordre de 45% dans le cas des déchets putrescibles et dépassant les 150% en ce qui concerne les emballages (principalement les plastiques).
  - ces grands écarts dans les productions des matières organiques et des déchets d'emballages entre les quartiers à revenus élevés et ceux à faibles revenus, traduisent les hétérogénéités extrêmes qui existent dans les niveaux de vie et leurs modes de consommations.

Ces résultats apportent certaines mises au point fondamentales. Ainsi, les parts importantes de déchets putrescibles constatés dans les secteurs à revenus élevés réfutent l'idée trop simplement acquise, qui laisse penser que les déchets des « riches » dans les PED seraient moins organiques, à l'image de ceux des pays développés. Il en est de même, du constat des très importantes fractions organiques relevées dans les secteurs commerciaux, ce qui va aussi à l'encontre des jugements émis habituellement. Et là, on peut encore mettre en évidence l'erreur induite par la présentation habituelle en %.

- L'influence des saisons sur la composition des déchets est significative, principalement en ce qui concerne :
  - la fraction organique putrescible : avec des proportions importantes au printemps (atteignant les 60% du poids humide) contrairement à l'automne où elles sont beaucoup plus faibles (de l'ordre de 40%).
  - la fraction inerte fine (sables, graviers, ...) : avec des proportions importantes en été, variant selon les secteurs, de 5 à 10%.

L'importance de la fraction organique au printemps pourrait s'expliquer par l'abondance des fruits et des légumes en cette période de l'année.

Quant à la fraction fine, son augmentation durant la saison estivale pourrait s'expliquer par les apports des vents de sables (venant du sud) qui soufflent fréquemment en été sur la capitale. Les plus fortes proportions sont observées dans les quartiers à revenus faibles, et pas seulement en été, en raison sans doute de l'état souvent rudimentaire des voies publiques.

De tels résultats confirment l'importance du facteur climatique, qui ne peut donc être exclu des objectifs d'une caractérisation.

➤ **La quantification et la répartition géographique des gisements potentiellement valorisables :**

Parmi les nombreuses interprétations qui justifient la mise en œuvre d'une opération lourde et détaillée de caractérisation telle que celle menée dans le Grand Tunis, la quantification et la répartition géographique des gisements potentiellement valorisables par recyclage et par compostage apparaît comme un objectif opérationnel primordial.

• **Les gisements potentiellement valorisables par recyclage :**

L'option de recyclage, base des stratégies de gestion des déchets dans les pays développés, a tendance à être promue par les coopérations internationales dans les PED, sans tenir compte des réelles compositions de leurs déchets et des contraintes qui doivent être surmontées. Dans le cas de la Tunisie, la stratégie nationale en matière de gestion des déchets a aussi pris position pour le recyclage (essentiellement les plastiques), avec la création d'un système d'organisation et de financement semblable à ceux des pays européens (ex. Eco-emballages en France) dénommé Eco-Lef. Le cadre de cette thèse a fourni l'opportunité de valider à la fois la méthode et les objectifs de caractérisation par rapport aux principes et aux résultats obtenus par Eco-Lef.

La caractérisation des déchets dans le Grand Tunis a permis de quantifier et de localiser tous les types de plastiques ciblés par le système Eco-Lef, selon les divers secteurs socio-économiques et au niveau de chaque commune. Les principaux résultats de cette caractérisation ont fait apparaître les conclusions suivantes :

- Les emballages en plastiques ne représentent que 2% (soit 8 929 tonnes/an) de la totalité des déchets produits dans le Grand Tunis estimés à 437 582 tonnes/an.
- Ce gisement est majoritairement composé de films (1 %) et de bouteilles en PET (0,8 %) ; les bouteilles en PEHD ne représentant que 0,2 % du gisement.
- Plus de la moitié du gisement (soit près de 5 000 tonnes/an) se trouve dans les deux communes de Tunis et de l'Ariana. Dans les autres communes du Grand Tunis, les plastiques ne sont présents qu'en de très faibles quantités, variant de 55 à 696 tonnes/an.

- Les augmentations des plastiques de près de 120% dans les secteurs commerciaux (par rapport aux secteurs résidentiels) et de plus de 200% dans les secteurs résidentiels à revenus élevés (par rapport aux secteurs les moins aisés) traduisent les extrêmes hétérogénéités dans les niveaux et modes de vie des populations.

De tels résultats originaux constituent les bases réelles et déterminantes pour justifier le choix du tri sélectif puis son implantation dans une agglomération. En Tunisie, trois systèmes de collectes sélectives ont été successivement testés : en porte à porte, en apport volontaire et en apport rémunéré. Ces systèmes ont été implantés sur la base d'études théoriques sans mesure ni analyse réelle initiale des déchets ciblés (leurs natures, leurs quantités, leurs localisations) ; ce qui n'a pas permis d'apprécier la faiblesse des gisements et a abouti à une inefficacité technique et une non viabilité économique de ces systèmes

- Les gisements potentiellement valorisables par compostage :

La caractérisation des déchets dans le Grand Tunis a permis d'évaluer les gisements de composants valorisables par compostage selon leurs quantités, leurs proportions et leurs répartitions géographiques. Les principaux résultats de cette caractérisation sont :

- La majeure partie de la masse humide des déchets est constituée de composants valorisables par compostage. Ce gisement est de l'ordre de 298 618 tonnes/an, soit 68 % de la totalité des déchets produits dans le Grand Tunis estimés à 437 582 tonnes/an.
- La plus grande partie de ce gisement (83%) est générée par les secteurs résidentiels, principalement ceux à revenus moyens qui en produisent 122 756 tonnes/an (soit près de 41% du gisement).
- Près de la moitié de ce gisement, soit 122 620 tonnes par an, est générée par la commune de Tunis. Les gisements dans les autres communes varient de 1 095 à 39 171 tonnes/an.
- A ces gisements, peuvent s'ajouter d'autres déchets organiques produits dans chaque commune. Dans le cas de la ville de Tunis, le gisement global des déchets valorisables par compostage (déchets ménagers, déchets verts et déchets des marchés) peut être estimé à 146 029 tonnes par an.

De tels résultats sont des éléments fondamentaux dans un schéma directeur pour le traitement des déchets par compostage. Ils permettent d'identifier - cartographier - précisément les gisements mobilisables selon leur localisation, leur quantité et leur qualité. A contrario, le constat habituel en Tunisie ou dans les pays en développement en général, est que ce type d'études se base sur la réplique de ratios théoriques et de constats généraux qui ne permettent ni de quantifier réellement les gisements valorisables par compostage ni de les localiser.

#### ***4. Importance de la caractérisation des déchets dans une démarche de paramétrage de systèmes de traitements adaptés, principalement pour le compostage***

Compte tenu de l'importance de la fraction organique contenue dans les déchets et de leur humidité, et le grand besoin des sols pauvres et dégradés en matière organique, le compostage constitue à priori une solution adéquate et d'un intérêt majeur pour les pays en développement. Cependant, les très nombreux échecs constatés en ce domaine ont amené un grand nombre de décideurs institutionnels à mettre à l'écart cette solution, sans que les raisons soient fondamentalement analysées, et surtout que des solutions ou des démarches soient engagées en fonction d'un tel réel bilan justifié.

En préalable à tout projet industriel de compostage, la logique du traitement d'un process acquise à l'issue d'un paramétrage basé sur la nature propre des déchets est indispensable. La connaissance d'un ensemble de paramètres de la composition et des caractéristiques physico-chimiques des déchets s'impose pour caractériser les modalités de leur traitement dans une chaîne de compostage.

L'ensemble de ces paramètres peut donner lieu à l'identification d'un critère que nous proposons de dénommer « critère de compostabilité » qui sera un objectif précis de la caractérisation. Ce critère peut comporter les 4 éléments suivants que nous avons caractérisés de manière précise dans notre étude :

- la composition granulométrique des fractions organiques et celles indésirables et toxiques à éliminer,
- l'humidité des déchets,
- le rapport carbone/azote,
- les teneurs en éléments traces métalliques.

Pour la détermination de ces paramètres physico-chimiques, près de 2 400 kg de déchets ont été séchés correspondant aux 5 400 fractions échantillonnées. Ces échantillons ont dû subir plus de 10 000 opérations analytiques, qui se sont déroulées sur près d'une année et demi (d'avril 2004 à octobre 2005).

##### **➤ La composition granulométrique des déchets :**

L'analyse granulométrique des déchets caractérisés dans le Grand Tunis met en évidence l'importance du choix des mailles des cribles à utiliser pour l'extraction des matières indésirables et polluantes. Les granulométries de ces matières non compostables étant les suivantes :

- près de la moitié des composites, des combustibles et des métaux, et environ 75% des textiles, des textiles sanitaires et des plastiques ont des granulométries supérieures à 100 mm,
- la majorité du verre (82%) et des déchets spéciaux (96%) ont des granulométries supérieures à 20 mm,

- plus de 80% des incombustibles (sables, graviers, ...) ont des granulométries inférieures à 20mm.

Par ailleurs, les granulométries des matières fermentescibles compostables se présentent comme suit :

- plus de la moitié des papiers et des cartons (60 à 70%) ont des granulométries supérieures à 100 mm,
- la majorité de la fraction putrescible (92%) a une granulométrie supérieure à 20 mm.

Ces résultats inédits montrent que le moment auquel intervient le criblage – clé du paramétrage du processus de compostage - est un moment crucial, car il doit répondre à deux objectifs de qualité qui semblent contradictoires : l'extraction maximale des matières organiques d'une part et l'élimination optimale des indésirables et des polluants d'autre part. La mise au point de procédés adaptés devra justifier ce compromis.

### ➤ **L'humidité des déchets :**

L'humidité des déchets est un paramètre clé car il influence notablement leur mode de traitement. Pourtant il est souvent ignoré dans les études de caractérisations des projets « Déchets » qui laissent supposer que cette teneur serait négligeable du fait du climat généralement chaud des pays en développement. Les conséquences très négatives suivantes sont alors constatées :

- des productions de lixiviats dans les décharges, sans commune mesure avec celles initialement prévues ;
- la non combustion des déchets et des masses considérables de jus pollués dans les fosses des usines d'incinération ;
- l'anaérobiose des déchets en fermentation et le colmatage des équipements dans les installations de compostage.

Les résultats de la caractérisation des déchets dans le Grand Tunis fait apparaître des taux d'humidités très importantes et qui sont de plus variables avec les saisons et les secteurs, mais aussi avec les catégories et les granulométries des déchets.

#### • D'une manière globale :

- Bien qu'elles soient plus faibles - suite aux pertes d'eaux pendant le stockage des déchets dans la rue, leur collecte dans les bennes et leur transport jusqu'à la décharge - que celles présentes initialement dans les déchets, les humidités mesurées sont en général élevées (> 50%).
- Des variations saisonnières sont clairement observées avec des humidités très importantes au printemps (atteignant les 58%) et des humidités plus faibles (de l'ordre de 34%) en automne.

- D'une manière particulière :
  - Les humidités les plus importantes sont celles des putrescibles, pouvant atteindre les 79% en été et en hiver (sans doute en raison de l'abondance des fruits en été et de l'influence des pluies en hiver) et même les 89% dans les fractions de granulométries > 100mm.
  - Contrairement aux jugements habituels, les humidités des autres fractions non putrescibles (papiers, cartons, plastiques, ...) sont assez élevées, variant de 24 à 59%. Ces importantes humidités, pour des catégories qui ont été introduites plus ou moins sèches dans les déchets, sont de toute évidence apportées par les putrescibles.
  - Les humidités des fractions fines de granulométries inférieures à 20 mm, varient de 37 à 64%. Ces fortes humidités sont principalement dues à la présence majoritaire des déchets putrescibles dans cette fraction.

Ces résultats mettent en évidence l'importance de la connaissance de l'humidité et de ses variations pour la gestion des systèmes de traitement en général et du compostage en particulier. Ce constat confirme la nécessité de tenir compte des variations saisonnières dans une caractérisation. Les teneurs en eau des composants fermentescibles (putrescibles, papiers, cartons) proches des limites supérieures de l'oxygénation des déchets durant la fermentation (70%), montrent que ces substrats trop humides peuvent se heurter à un risque d'anaérobiose au cours du compostage.

La mise au point de procédés adaptés devra être justifiée vis-à-vis de la gestion des diverses humidités des déchets compostés.

#### ➤ **Le rapport carbone/azote :**

L'aptitude des déchets fermentescibles au compostage dépend de leur rapport carbone/azote (C/N) qui doit se situer dans une zone optimale (entre 20 et 30) pour assurer un bon équilibre nutritionnel aux micro-organismes et donc un bon déroulement de la fermentation.

Sur la base des compositions massiques des fermentescibles, les rapports C/N ont pu être calculés dans les divers secteurs et durant les 4 campagnes saisonnières et font apparaître divers comportements des déchets :

- Les C/N des déchets dans les secteurs commerciaux sont plus importants (entre 25 et 30) que ceux dans les secteurs résidentiels (< 20), en raison de leur richesse en matières carbonées (papiers-cartons).
- Dans les secteurs résidentiels, les C/N sont beaucoup plus faibles dans les quartiers les moins aisés, et d'une manière générale, ils sont extrêmement faibles (entre 14 et 17) pendant la saison estivale, en raison de l'abondance des fruits.

La connaissance des compositions massiques des constituants de la fraction fermentescible (les putrescibles, les papiers, les cartons) apparaît donc fondamentale pour la détermination de l'aptitude des déchets au compostage. Elle permettrait d'ajuster les rapports C/N des déchets et de pouvoir maîtriser en toute connaissance de cause le bon déroulement de la fermentation.

On constate ainsi, que les déchets des PED se caractérisent par des C/N faibles par rapport à ceux des pays développés ( $> 30$ ). La transposition directe de ce paramètre de compostabilité n'est donc pas possible sans l'analyse préalable des déchets.

### ➤ **Les teneurs en polluants métalliques :**

La qualité des composts constitue un facteur clé pour leur acceptation dans les circuits de commercialisation et donc pour la pérennité de la filière de valorisation de la matière organique. Un critère essentiel de cette qualité est l'innocuité vis-à-vis des métaux lourds.

Les éléments traces métalliques (ou métaux lourds) sont présents dans la plupart des composants des ordures ménagères : plastiques, métaux, verre, piles, etc. Leur diffusion au sein de la biomasse fermentescible durant le compostage se fait par divers processus : attaques acides, abrasions mécaniques, fragilisation des plastiques, etc. Il est par conséquent très important de prévoir leur localisation et leur comportement afin d'extraire ces composants polluants de la biomasse en amont du processus de traitement, et d'éviter ainsi la contamination des fractions fermentescibles. Leur répartition dans la masse des déchets selon leur granulométrie est donc un paramètre très important pour l'appréciation des mesures techniques visant à les écarter au cours du procédé de compostage.

Dans le cas de la caractérisation des déchets dans le Grand Tunis, le dosage des métaux lourds montre que :

- Dans la fraction fermentescible, les teneurs en métaux lourds sont généralement très faibles et même en deçà des valeurs limites les plus sévères ; et ce, quelque soit les secteurs et les saisons,
- Dans la fraction fine ( $< 6,3\text{mm}$ ) les teneurs en métaux lourds sont plus importantes que celles présentes dans les fermentescibles. Cependant, elles restent en général, en deçà des normes.

Les faibles teneurs en métaux lourds des fractions fermentescibles montrent que les conditions de leur stockage et leur collecte en mélange avec les composants (plastiques, piles, etc.) susceptibles de les polluer n'ont pas affecté leur qualité. Cependant, ces résultats obtenus sur les déchets bruts (avant le processus de compostage) devront être confirmés par des tests de paramétrages réels de ce processus, pouvant seuls donner la mesure effective du contenu final du compost en éléments traces métalliques.

## LA FORMALISATION DE LA METHODE DE CARACTERISATION

Les apports originaux de notre recherche résident dans la mise au point d'une méthode de caractérisation des déchets ménagers justifiée par une démarche intégrant les contraintes des PED, une stratégie d'échantillonnage basée sur des fondements statistiques et un mode de tri adapté.

Les principes et les modalités d'application de cette méthode peuvent être identifiés par les cinq étapes suivantes, et constituer ainsi les bases d'un cahier de charge opérationnel pour les projets :

### ***1. La collecte des données climatiques, urbaines, démographiques et socio-économiques nécessaires à l'organisation des campagnes de caractérisation.***

Cette étape est fondamentale dans le cas des PED, en raison de l'importance des facteurs de variations (climatiques, démographiques, ...) de la production des déchets. Elle nécessite une analyse complète et approfondie des contraintes locales (découpages administratifs non précis, recensements de la population aléatoires, collecte des déchets en mélange, ...) et leur intégration dans les enquêtes préalables afin de disposer de données précises et complètes.

### ***2. L'organisation des campagnes de caractérisation.***

Cette étape doit concerner la conception des campagnes et les conditions pratiques de leur déroulement. En ce qui concerne ces conditions pratiques, qui sont généralement très aléatoires, il faut particulièrement veiller à leur maîtrise. Pour cela :

- Les périodes d'échantillonnage doivent être choisies durant les saisons extrêmes : ex. saisons sèches et saisons pluvieuses.
- Les zones d'étude doivent être découpées en secteurs rassemblant les producteurs de déchets de même typologie. Ce découpage doit reposer sur des critères traduisant l'importante diversification des contextes urbains et socio-économiques des PED : ex. les revenus des ménages, la densité de l'habitat, etc.
- Les camions à échantillonner doivent être identifiés et leurs circuits précisés.
- Les sites d'échantillonnage et de tri doivent être identifiés sur la décharge (lieu préférentiel pour les PED) et aménagés.
- Le personnel chargé du tri (généralement celui de la municipalité impliquée dans la caractérisation) doit être formé pour l'identification des matériaux et leur séparation en diverses catégories. La cadence du tri doit être maîtrisée et bien évaluée.
- L'utilisation du matériel lourd de la décharge (pont-bascule et chargeur), qui est nécessaire au pesage des camions et à l'échantillonnage, doit être convenue avec le gestionnaire de la décharge.

- Le matériel de tri (balance industrielle, table de tri, ...) doit être disponible et fonctionnel. Le matériel coûteux (tel que la balance) peut être loué ou prêté.
- Un laboratoire qualifié doit être identifié pour la réalisation des analyses physico-chimiques. Dans le cas de la non disponibilité des équipements d'analyses dans les laboratoires locaux, les déchets préalablement préparés peuvent être analysés dans des laboratoires spécialisés étrangers.
- La préparation des échantillons doit être réalisée dans les laboratoires locaux. Elle nécessite une (ou plusieurs) étuve de séchage de grande capacité, un broyeur de déchets non contaminant et des tamis normalisés. L'acquisition de ce matériel doit donc être programmée dans la préparation du budget du projet.

### **3. La réalisation d'une analyse « test ».**

Cette étape consiste à la caractérisation, en préalable des campagnes, du contenu d'une benne d'ordures ménagères choisie au hasard dans la zone d'étude. La caractérisation (ou analyse) « test » permet de disposer des données propres aux déchets locaux (masses fragmentaires, humidités, ...) et de résultats (compositions massique et granulométrique) dont l'étude statistique va permettre la définition des éléments de la stratégie d'échantillonnage. Ces éléments sont :

- les paramètres d'échantillonnage représentatifs : la masse des prélèvements élémentaires, le nombre des prélèvements dans une benne et le nombre de bennes à analyser ;
- l'erreur fondamentale d'analyse minimale engendrée par l'hétérogénéité des matériaux dans les échantillons prélevés, pour chacune des catégories composant les déchets étudiés.

Cette analyse est indispensable et ses résultats sont spécifiques au contexte de chaque pays. Elle permet également de préciser la nomenclature de tri, c'est-à-dire le nombre de catégories et de sous-catégories, qui doivent être hiérarchisées selon leur importance dans les ordures étudiées.

### **4. La réalisation des campagnes de caractérisation :**

Pour chaque campagne, les opérations d'échantillonnage et de tri doivent être planifiées selon les résultats du calcul statistique et en tenant compte des contraintes de travail sur la décharge.

Le mode de tri doit être adapté à la nature des déchets très organique et très humide, et tenir compte des conditions pratiques de tri et de manipulation qui sont très difficiles et les capacités de séchage qui sont souvent limitées dans les PED.

Le mode de tri « adapté » mis au point dans le cadre de cette thèse, répond à l'ensemble de ces contraintes, tout en étant plus rapide, moins coûteux et plus précis que les deux modes de tri existants (sec et humide).

### **5. La réalisation des analyses physico-chimiques et l'interprétation des résultats :**

Les résultats de la caractérisation doivent aboutir aux compositions saisonnières et sectorielles des déchets dans toute la zone d'étude, avec mise en évidence de la pertinence de la sectorisation. De même, ils doivent permettre la quantification et la répartition géographique des gisements potentiellement valorisables.

La réalisation d'un ensemble d'analyses physico-chimiques doit permettre d'obtenir les indications nécessaires aux choix des traitements (incinération, mise en décharge, compostage, etc.). En ce qui concerne le compostage, qui constitue une solution adéquate pour les PED, la connaissance d'un ensemble de paramètres, ou « critères de compostabilité » s'impose pour caractériser les modalités de traitement des déchets dans une chaîne de compostage.

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

**(1) [ADEME, 1993]**

**AGENCE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA MAITRISE DE L'ENERGIE, FRANCE** – *Méthode de caractérisation des ordures ménagères, MODECOM<sup>TM</sup>* - Manuel de base – édité par l'Ademe Centre d'Angers, Septembre 1993 - Réf 1601 - Coll., « Connaître pour agir », 64p.

**(2) [ADEME, 1996 a]**

**AGENCE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA MAITRISE DE L'ENERGIE, FRANCE** - *Du produit au déchets : comprendre l'origine des métaux lourds dans les ordures ménagères* – édité par l'Ademe Centre d'Angers, Septembre 1996 - Coll., « Connaître pour agir », 58p.

**(3) [ADEME, 1996 b]**

**AGENCE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA MAITRISE DE L'ENERGIE, FRANCE** - *Adaptation de la méthode MODECOM<sup>TM</sup> de caractérisation des ordures ménagères aux collectes séparatives – Détermination des masses d'échantillons et recommandations pour la mise en œuvre de l'échantillonnage* – édité par l'Ademe Centre d'Angers (Contrat ANTEA n°9504163), Novembre 1996 - Coll., « Connaître pour agir », 44p.

**(4) [ADEME, 1997]**

**AGENCE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA MAITRISE DE L'ENERGIE, FRANCE** – *MODECOM<sup>TM</sup> et les collectes séparatives. Compléments au guide méthodologique de caractérisation des ordures ménagères* - édité par l'Ademe Centre d'Angers, Novembre 1997 - Réf 1601 - Coll., « Connaître pour agir », 49p.

**(5) [ADEME 1999]**

**AGENCE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA MAITRISE DE L'ENERGIE, FRANCE** - *La composition des ordures ménagères en France* - édité par l'Ademe Centre d'Angers, (1<sup>ère</sup> édition) Janvier 1999 - Coll., « Données et Références », 59p.

**(6) [ADEME 2001]**

**AGENCE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA MAITRISE DE L'ENERGIE, FRANCE** - *Qualité et biodéchets : les systèmes de gestion européens – Etat de l'art et fiches techniques* - édité par l'Ademe Centre d'Angers, Juin 2001 - Réf 3713 - Coll., « Connaître pour agir ». 208p.

**(7) [ADEME 2005]**

**AGENCE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA MAITRISE DE L'ENERGIE, FRANCE** – *Contamination des sols : transfert des sols vers les plantes* - édité par EDP Sciences/ADEME, Juin 2005., 413p.

**(8) [AFNOR, 1975]**

**ASSOCIATION FRANCAISE DE NORMALISATION** – Norme NF XP 06-050 – *Statistique et Qualité. Etude de la normalité d'une distribution*, Juillet 1975.

**(9) [AFNOR, 1985]**

**ASSOCIATION FRANCAISE DE NORMALISATION** – Norme NF U44-160 *Amendements organiques et supports de culture –Détermination de la matière organique totale – Méthode par calcination*, Mai 1985

**(10) [AFNOR, 1995]**

**ASSOCIATION FRANCAISE DE NORMALISATION** – Norme NF ISO 11261 – *Qualité du sol – Dosage de l'azote total – Méthode de Kjeldahl modifiée, norme homologuée*, Juin 1995

**(11) [AFNOR, 1996 a]**

**ASSOCIATION FRANCAISE DE NORMALISATION** – Norme NF XP X30-411- *Déchets - Guide d'élaboration de procédures d'échantillonnage*, norme expérimentale, Février 1996.

**(12) [AFNOR, 1996 b]**

**ASSOCIATION FRANCAISE DE NORMALISATION** – Norme NF XP X31-151 : *Qualité des sols – sols, sédiments – mise en solution totale par attaque acide*, norme homologuée, Juillet 1996.

**(13) [AFNOR, 1996 c]**

**ASSOCIATION FRANCAISE DE NORMALISATION** – Norme NF XP X30-408 – *Déchets - Caractérisation d'un échantillon de déchets ménagers et assimilés*, norme expérimentale, Octobre 1996.

**(14) [AFNOR, 1996 d]**

**ASSOCIATION FRANCAISE DE NORMALISATION** – Norme NF XP X30-416 : *Déchets - Guide pour la caractérisation des ordures ménagères et assimilées, échantillonnage d'une benne*, norme expérimentale, Novembre 1996.

**(15) [AFNOR, 2005]**

**ASSOCIATION FRANCAISE DE NORMALISATION** – Norme NF XP X30-466 – *Déchets ménagers et assimilés – Méthodes de caractérisation- Analyse sur produit sec*, norme expérimentale, Mars 2005.

**(16) [AFNOR, 2006]**

**ASSOCIATION FRANCAISE DE NORMALISATION** – Norme NF U 44-051 – *Amendements organiques – Dénominations, spécifications et marquage*, norme homologuée, avril 2006

**(17) [AGHTM, 1985]**

**ASSOCIATION GENERALE DES HYGIENISTES ET TECHNICIENS MUNICIPAUX - Les résidus urbains – Traitement et valorisation (2<sup>ème</sup> édition) – Paris :** Technique et Documentation, Lavoisier., 1985 - *volume 2* - 437p.

**(18) [ANPE, 1998 a]**

**AGENCE NATIONALE DE LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT, TUNISIE - Manuel d'exploitation de la Station de Compostage de Béja (Gestion de qualité, exploitation, utilisation du compost),** réalisé par l'assistance allemande GTZ, Août 1998., 20p.

**(19) [ANPE, 1998 b]**

**AGENCE NATIONALE DE LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT, TUNISIE - Etude d'exécution de l'unité de compostage des ordures ménagères de Sousse. Etude de faisabilité.** Etude préparée pour l'ANPE par SWECO International (Suède) et MEDIEN (Tunisie) – Septembre 1998, 151p.

**(20) [ANPE, 1999 a]**

**AGENCE NATIONALE DE LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT, TUNISIE - Etude d'exécution de l'unité de compostage des ordures ménagères de Sousse. Etude d'impact.** Etude préparée pour l'ANPE par SWECO International (Suède) et MEDIEN (Tunisie) – Janvier 1999, 75p.

**(21) [ANPE, 1999 b]**

**AGENCE NATIONALE DE LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT, TUNISIE - Rapport sur l'amélioration de la gestion de la décharge Jebel Chekir / Tunis- Partie I –** préparé pour le Ministère de l'Environnement Tunisien par la coopération allemande GTZ, Février 1999, 65p.

**(22) [ANPE, 1999 c]**

**AGENCE NATIONALE DE LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT, TUNISIE – Etude pour la Gestion des déchets solides industriels,** Avril 1999, 43p.

**(23) [ANPE, 2000 a]**

**AGENCE NATIONALE DE LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT, TUNISIE - Optimisation du système Eco~Lef de reprise et de valorisation des déchets d'emballage ménagers. Rapport d'évaluation de l'état existant,** préparé pour le Ministère de l'Environnement Tunisien par la coopération allemande GTZ, Septembre 2000, 55p.

**(24) [ANPE, 2000 b]**

**AGENCE NATIONALE DE LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT, TUNISIE - Etude d'exécution de l'unité de compostage des ordures ménagères de Sousse. Rapport technique d'exécution.** Etude préparée pour l'ANPE par SWECO International (Suède) et MEDIEN (Tunisie) – Décembre 2000, 81p.

**(25) [ANPE, 2004]**

**AGENCE NATIONALE DE LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT, TUNISIE** - *Evaluation technico-économique des procédés de traitement des déchets ménagers en Tunisie. Phase II – Opportunités offertes pour le traitement des déchets municipaux en Tunisie – Plan d'action*, Etude réalisée pour l'ANPE par GIRUS/ Midi Environnement/ SMART Consult – Juin 2004, 79p.

**(26) [ANRED, 1986]**

**AGENCE NATIONALE POUR LA RECUPERATION ET L'ELIMINATION DES DECHETS, FRANCE** – *Rôle et fonctionnement des décharges dans les agglomérations des PED* - Programme Rexcoop, 1986, 167 p.

**(27) [ANRED, 1992]**

**AGENCE NATIONALE POUR LA RECUPERATION ET L'ELIMINATION DES DECHETS, FRANCE** - *Contribution à une évaluation des flux et filières des déchets dans les Pays du Sud – Déchets solides municipaux des PVD/Etude pays par pays* – (les Transformeurs), Janvier 1992, 115p.

**(28) [ARYKAN, 1997]**

**ARYKAN O., OZTURK I., DEMIR I. et al.** - *Changes in MSW quality and influence on waste management in Istanbul*, Metropolitan city - Proceedings Sardinia 97, Sixth International Landfill Symposium – Cagliari, Italy: 13-17 October 1997., pp 449-456.

**(29) [BRUNNER, 1986]**

**BRUNNER Paul H., ERNST Walter R.** – *Alternative methods for the analysis of municipal solid waste*, Rev. Waste Management & Research, 1986, 4, pp 147-160.

**(30) [CAMPBELL, 1993]**

**CAMPBELL D.J.V.** *Waste management need in developing countries*, Proceedings Sardinia 93, Fourth International Landfill Symposium - Cagliari, Italy: 11-15 October 1993., pp 1851-1866.

**(31) [CEN, 2004]**

**COMMISSION EUROPEENNE DE NORMALISATION** - *Characterisation of waste – Sampling of waste materials: Framework for the preparation and application of a sampling Plan* - norme en projet : prEN 14899 - CEN TC292/WG1.

**(32) [COINTREAU-LEVINE, 1996]**

**COINTREAU-LEVINE, Sandra** - *Privatisation de la gestion des déchets solides dans les pays en développement* – Intervention au Séminaire Régional IAGU-GREA-AO-PDM « Déchets solides en milieu urbain d'Afrique de l'ouest et centrale – vers une gestion durable », Abidjan, 14 au 16 février 1996, 16p.

**(33) [De PALMA, 2001]**

**De PALMA Roberta**, *Municipal Solid Waste Management and recycling of secondary raw materials in China* – Rev. ISWA TIMES, janvier 2001, pp13-18.

**(34) [DGCL-DEA, 1991]**

**DIRECTION GENERALE DES COLLECTIVITES LOCALES - DIRECTION DE L'EAU ET DE L'ASSAINISSEMENT, MAROC** - *Principes et pratiques pour la gestion rationnelle des déchets solides municipaux* – Document réalisé pour le Ministère de l'Intérieur Marocain avec le soutien de l'Agence Américaine pour le Développement International (USAID), 1991, 82p.

**(35) [DGCL-DEA, 1995]**

**DIRECTION GENERALE DES COLLECTIVITES LOCALES - DIRECTION DE L'EAU ET DE L'ASSAINISSEMENT, MAROC** - *Collecte et traitement des ordures ménagères au Maroc* – Document Technique réalisé pour le Ministère de l'Intérieur Marocain avec le soutien du Ministère français des Affaires Etrangères, 1995, 40p.

**(36) [EEA, 2000]**

**EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY**, *Household and municipal waste : Comparability of data in EEA member countries* , April 2000, 69p.

**(37) [EPA, 1999]**

**ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, USA** - *Characterization of Municipal Solid Waste in the united States* : 1998 update, july 199, 159p.

**(38) [GILLET, 1985]**

**GILLET Robert** - *Traité de gestion des déchets solides et son application aux pays en voie de développement* – Copenhague : OMS-PNUD, 1985- Tomes 1 et 2. 980 pages.

**(39) [GTZ, 2000]**

**GESELLSCHAFT FÜR TECHNISCHE ZUSAMMENARBEIT, Assistance Technique Allemande**, *Upgrading of disposal standards in Gaza*, intervention présentée par Manfred Scheu au Workshop International “Planning for sustainable and Integrated Solid Waste Management”, Manila, du 18 au 21 Septembre 2000, 9 p.

**(40) [GY, 1983]**

**GY Pierre**. - *Les erreurs d'échantillonnage*, Rev. Analisis, 1983, Volume 11, n°9, pp413-440

**(41) [GY, 1988]**

**GY Pierre**. - *Hétérogénéité, Echantillonnage, Homogénéisation*, Paris : Masson, 1988, 608 p.

**(42) [GY, 1996]**

**GY Pierre**. - *L'échantillonnage des lots de matière en vue de leur analyse*. Sciences de l'ingénieur, Collection Mesures Physiques, Paris : Masson, 1986, 148p.

**(43) [INM, 2003]**

**INSTITUT NATIONAL DE METEOROLOGIE, TUNISIE** – *Relevés météorologiques à la Station de Tunis-Carthage, sur la période 1987-2002*

**(44) [KHLIFI, 2002]**

**KHLIFI Nesrine** - *Evaluation du traitement des déchets ménagers par compostage à la station pilote de Béja. Analyse granulométrique et étude de la dynamique de l'Azote durant la pré-fermentation* – 72p. Projet de Fin d'Etudes de l'Ecole Supérieure d'Ingénieurs d'Equipement Rural, réalisé dans le cadre de l'expertise de la station de Béja par la TBC, Juin 2002.

**(45) [MEAT, 2001]**

**MINISTERE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE L'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE, TUNISIE** - *Rapport national de l'environnement tunisien, de l'année 2000*, avril 2001, 146p.

**(46) [MEAT, 2003]**

**MINISTERE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE L'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE, TUNISIE** - *Rapport national de l'environnement tunisien, de l'année 2002*, mai 2003, 142p.

**(47) [MEDD, 2005]**

**MINISTERE DE L'ENVIRONNEMENT ET DU DEVELOPPEMENT DURABLE, TUNISIE** - *Rapport national de l'environnement tunisien, de l'année 2004*, mai 2005, 195p.

**(48) [METAP-PRGDS-Algérie, 2005]**

**PROGRAMME D'ASSISTANCE TECHNIQUE POUR L'ENVIRONNEMENT MEDITERRANEEN – PROJET REGIONAL DE GESTION DES DECHETS SOLIDES**, *Analyse et recommandations en matière de recouvrement des coûts de la gestion des déchets municipaux en Algérie*, avril 2005, 85p.

**(49) [METAP-PRGDS-Egypte, 2004]**

**PROGRAMME D'ASSISTANCE TECHNIQUE POUR L'ENVIRONNEMENT MEDITERRANEEN – PROJET REGIONAL DE GESTION DES DECHETS SOLIDES**, *Rapport Pays- Egypte*, préparé par le consortium international GTZ-ERM-GKW, janvier 2004, 55p.

**(50) [METAP-PRGDS-Jordanie, 2004]**

**PROGRAMME D'ASSISTANCE TECHNIQUE POUR L'ENVIRONNEMENT MEDITERRANEEN – PROJET REGIONAL DE GESTION DES DECHETS SOLIDES**, *Rapport Pays - Jordanie*, préparé par le consortium international GTZ-ERM-GKW, janvier 2004, 18p.

**(51) [METAP-PRGDS-Maroc, 2004]**

**PROGRAMME D'ASSISTANCE TECHNIQUE POUR L'ENVIRONNEMENT MEDITERRANEEN – PROJET REGIONAL DE GESTION DES DECHETS SOLIDES**, *Rapport Pays - Maroc*, préparé par le consortium international GTZ-ERM-GKW, mai 2004, 51p.

**(52) [METAP-PRGDS-Palestine, 2004]**

**PROGRAMME D'ASSISTANCE TECHNIQUE POUR L'ENVIRONNEMENT MEDITERRANEEN – PROJET REGIONAL DE GESTION DES DECHETS SOLIDES**, *Rapport Pays - Palestine*, préparé par le consortium international GTZ-ERM-GKW, avril 2004, 55p.

**(53) [METAP-PRGDS-Syrie, 2004],**

**PROGRAMME D'ASSISTANCE TECHNIQUE POUR L'ENVIRONNEMENT MEDITERRANEEN – PROJET REGIONAL DE GESTION DES DECHETS SOLIDES**, *Rapport Pays - Syrie*, préparé par le consortium international GTZ-ERM-GKW, août 2004, 32p.

**( 54) [METAP-PRGDS-Tunisie, 2004]**

**PROGRAMME D'ASSISTANCE TECHNIQUE POUR L'ENVIRONNEMENT MEDITERRANEEN – PROJET REGIONAL DE GESTION DES DECHETS SOLIDES**, *Rapport Pays - Tunisie*, préparé par le consortium international GTZ-ERM-GKW, janvier 2004, 42p.

**(55) [METAP-PRGDS, 2005]**

**PROGRAMME D'ASSISTANCE TECHNIQUE POUR L'ENVIRONNEMENT MEDITERRANEEN – PROJET REGIONAL DE GESTION DES DECHETS SOLIDES**, *Rapport Synthèse Pays*, préparé par le consortium international GTZ-ERM-GKW, 2005, 70p.

**(56) [MORVAN, 1996]**

**MORVAN Bernard** - *L'échantillonnage des déchets ménagers*- Rev. Ingénieries– EAT, 1996, n°5, pp.3-12.

**(57) [MORVAN, 2000]**

**MORVAN Bernard** - *Méthode de caractérisation des déchets ménagers : analyse sur produit sec* - Rev. Déchets Sciences & Techniques, 2000, n°20, pp9-11

**(58) [MUNICIPALITE DE TUNIS, 2003]**

**MUNICIPALITE DE TUNIS** - *Gestion des déchets dans la ville de Tunis* - Rapport annuel, mars 2003, 9p.

**(59) [NGNIKAM, 1997]**

**NGNIKAM Emmanuel, VERMANDE Paul, TANAWA Mile, WETHE Joseph** - *Une démarche intégrée pour la maîtrise de la gestion des déchets solides urbains au Cameroun* - Rev. Déchets Sciences & Techniques, 1997, n°20, pp22-34.

**(60) [NIE, 2002]**

**NIE Yongfeng, LI Jinhui, Niu Dongjie et al** - *managing municipal solid wastes in China* – Rev. Waste Management World, 2002 (march-avril), pp42-46.

**(61) [ONAS, 1993]**

**OFFICE NATIONAL DE L'ASSAINISSEMENT, TUNISIE** - *Gestion des déchets solides en Tunisie – Composition des déchets solides*, étude réalisée pour le Ministère tunisien de l'environnement et de l'aménagement du territoire par la coopération allemande GTZ, août 1993, 83p.

**(62) [PINEAU, 2002]**

**PINEAU J.L., NAIFAR E.M., KITANE S., et al.** - *La caractérisation et l'échantillonnage des ordures ménagères*. Colloque Marrakech-Maroc, 10-12 mai 2002.

**(63) [PINEAU, 2005]**

**PINEAU J.L., KAMARI N., MENAD N.** – *Representativeness of an automobile shredder residue sample for a verification analysis*. Rev. Waste Management & Research, 2005, 7, pp 737-746.

**(64) [REHI, 1989]**

**REHI R.** - *Caractéristiques des déchets solides de quelques grandes villes algériennes et perspectives de leurs traitements* – Rev. TSM – L'EAU, 1989., n°3, pp193-198.

**(65) [REMECOM, 1998]**

**EUROPEAN MEASUREMENT NETWORK FOR THE CHARACTERISATION OF HOUSEHOLD WASTE** – *How to assess your household waste stream ?* - édité par l'Ademe Centre d'Angers, Juin 2001 - Coll., « Procedures and Tools », 62p.

**(66) [REXCOOP, 1987]**

**Programme interministériel REXCOOP** - Colloque International : *Gestion des déchets ménagers dans les pays en développement* -, Paris : 9, 10, 11 Septembre 1987, - 78p.

**(67) [SABER, 1997]**

**SABER M., ABD-EL-MAKSOUH H., AZAZY M., et al.** - *Characterisation of MSW production and disposal options in Tala, Egypt*. Proceedings Sardinia 97, Sixth International Landfill Symposium – Cagliari, Italy: 13-17 October 1997., pp427 – p433.

**(68) [SCHARFF, 1994]**

**SCHARFF C.hristoph, VOGEL Gerhard** - *A Comparison of collection systems in european cities* – Rev. Waste Management & Research, 1994, 12, pp387-404.

**(69) [SEE, 1999]**

**SECRETARIAT D'ETAT CHARGE DE L'ENVIRONNEMENT, MAROC -**  
*Manuel pratique : de la collecte à l'élimination des déchets solides municipaux*, octobre 1999, 90p.

**(70) [SOULI, 2002]**

**SOULI Salwa**, *Evaluation du traitement des déchets ménagers par compostage à la station pilote de Béja. Analyse granulométrique et étude de la dynamique de la matière organique et du carbone durant la pré-fermentation* – 72p. Projet de Fin d'Etudes de l'Ecole Supérieure d'Ingénieurs d'Equipement Rural, réalisé dans le cadre de l'expertise de la station de Béja par la TBC, Juin 2002.

**(71) [SWA-Tool, 2001]**

**SOLID WASTE ANALYSIS-Tool -** *Development of a methodological tool to enhance the precision & comparability of Solid Waste Analysis data* - European Commission Project, final report - December 2001, 58p.

**(72) [UNIDO, 1995]**

**UNITED NATION INDUSTRIAL DEVELOPMENT ORGANISATION**, *Etude sur les traitements actuels des ordures. Les recommandations pour l'amélioration de ces pratiques et introductions du système de recyclage dans la commune de Matoto, Conakry, République de GUINEE*. Projet ONUDI/PNUD (VC/GUI/95/003), août 1995, 39p.

**(73) [WAVRER, 1997]**

**WAVRER Philippe**. - *Apport à la théorie de l'échantillonnage des soldes hétérogènes. Application à des grandeurs mesurées sur matières premières, secondaires et ultimes*. 211p. Thèse de Doctorat : Ecole Nationale Supérieure de Géologie de Nancy-INPL, Géosciences, 1997,

**(74) [WORLD BANK, 1999]**

**WORLD BANK -** *Plan national d'action pour l'environnement urbain en Guinée*, Projet PADEULAC, rapport n°19084-GUI, mars 1999, 71p.

**(75) [WRAP, 2002]**

**WASTE AND RESOURCES ACTION PROGRAMME**, *Comparison of Compost Standards within the EU, North America and Austria*, June 2002., 109p.

**LISTE DES FIGURES**

<b>Figure 1 :</b>	Composition des principaux flux de déchets urbains produits dans la ville de Tunis .....	39
<b>Figure 2 :</b>	Les constituants physiques des déchets ménagers dans quelques régions géographiques des PED .....	48
<b>Figure 3 :</b>	Démarche méthodologique préalable à la réalisation de(s) campagnes(s) de caractérisation ....	74
<b>Figure 4 :</b>	Erreurs engendrées par les 3 modes de tri sur les putrescibles .....	122
<b>Figure 5 :</b>	Erreurs engendrées par les 3 modes de tri sur les autres catégories .....	123
<b>Figure 6 :</b>	Erreurs engendrées par les 3 modes de tri sur les fractions des « Gros » et des « Moyens » .....	123
<b>Figure 7 :</b>	Les fractions « Fines » engendrées par les 3 modes de tri .....	124
<b>Figure 8 :</b>	Composition officielle des ordures ménagères en Tunisie .....	131
<b>Figure 9 :</b>	Les communes du Grand Tunis .....	134
<b>Figure 10 :</b>	Les divers flux de déchets déversés dans la décharge contrôlée du Grand Tunis .....	137
<b>Figure 11 :</b>	Production annuelle des déchets dits « ménagers et assimilés » dans les 4 Gouvernorats du Grand Tunis .....	138
<b>Figure 12 :</b>	Les productions mensuelles des déchets dits « ménagers et assimilés » dans les 4 Gouvernorats du Grand Tunis .....	139
<b>Figure 13 :</b>	Les ratios de production des déchets dits « ménagers et assimilés » dans 44 communes et arrondissements du Grand Tunis .....	140
<b>Figure 14 :</b>	Disparités dans la variation des ratios de production des déchets entre les Communes et les Gouvernorats .....	140
<b>Figure 15 :</b>	Le découpage du Grand Tunis en 8 secteurs homogènes .....	143
<b>Figure 16 :</b>	Productions moyennes par habitant et par jour résultant de la sectorisation du Grand Tunis ....	144
<b>Figure 17 :</b>	Moyennes de la Pluviométrie et de la Température dans le Grand Tunis de 1987 à 2002 .....	148
<b>Figure 18 :</b>	Schémas de collecte des divers flux de déchets solides générés par la ville de Tunis .....	152
<b>Figure 19 :</b>	Composition des déchets solides générés par la ville de Tunis .....	157
<b>Figure 20 :</b>	Composition des déchets municipaux générés par la ville de Tunis .....	157
<b>Figure 21 :</b>	Identification des déchets solides collectés par la Direction de la Propreté de la ville de Tunis..	157
<b>Figure 22 :</b>	Composition des déchets solides collectés en mélange .....	157
<b>Figure 23 :</b>	Comparaison des ratios de production des déchets ménagers et assimilés .....	158
<b>Figure 24 :</b>	Découpage de la ville de Tunis en 5 secteurs homogènes .....	161
<b>Figure 25 :</b>	Planning d'échantillonnage .....	166
<b>Figure 26 :</b>	Protocole d'échantillonnage du contenu des bennes .....	169
<b>Figure 27 :</b>	Schéma d'échantillonnage .....	174
<b>Figure 28 :</b>	Nomenclature de tri et de criblage des échantillons prélevés .....	175
<b>Figure 29 :</b>	L'ensemble des résultats obtenus par les 4 campagnes de caractérisation des déchets dans le Grand Tunis .....	176
<b>Figure 30 :</b>	Erreurs Fondamentales d'Echantillonnage dans les secteurs d'échantillonnage .....	179
<b>Figure 31 :</b>	Variation sectorielle de la composition des déchets pendant la saison du Printemps .....	186
<b>Figure 32 :</b>	Variation sectorielle de la composition des déchets pendant la saison de l'Eté .....	186
<b>Figure 33 :</b>	Variation sectorielle de la composition des déchets pendant la saison de l'Automne .....	187
<b>Figure 34 :</b>	Variation sectorielle de la composition des déchets pendant la saison de l'Hiver .....	187

<b>Figure 35 :</b> Variation sectorielle de la composition des sous-catégories des Plastiques au Printemps .....	190
<b>Figure 36 :</b> Variation sectorielle de la composition des sous-catégories des Plastiques en Été .....	190
<b>Figure 37 :</b> Variation sectorielle de la composition des sous-catégories des Plastiques en Automne .....	190
<b>Figure 38 :</b> Variation sectorielle de la composition des sous-catégories des Plastiques en Hiver .....	191
<b>Figure 39 :</b> Variation sectorielle de la composition des sous-catégories des métaux au Printemps .....	192
<b>Figure 40 :</b> Variation sectorielle de la composition des sous-catégories des métaux en Été .....	193
<b>Figure 41 :</b> Variation sectorielle de la composition des sous-catégories des métaux en Automne .....	193
<b>Figure 42 :</b> Variation sectorielle de la composition des sous-catégories des métaux en Hiver .....	193
<b>Figure 43 :</b> Composition de la fraction des « Gros » par secteurs .....	196
<b>Figure 44 :</b> Composition de la fraction des « Moyens » par secteurs .....	196
<b>Figure 45 :</b> Composition de la fraction des « Fins » par secteurs .....	197
<b>Figure 46 :</b> Estimation des composants fermentescibles au Printemps .....	200
<b>Figure 47 :</b> Estimation des composants fermentescibles en Été .....	200
<b>Figure 48 :</b> Estimation des composants fermentescibles en Automne .....	200
<b>Figure 49 :</b> Estimation des composants fermentescibles en Hiver .....	200
<b>Figure 50 :</b> Taux de production annuels et saisonniers des déchets fermentescibles dans les secteurs échantillonnés .....	202
<b>Figure 51 :</b> Taux de production des catégories fermentescibles dans les secteurs échantillonnés .....	203
<b>Figure 52 :</b> Variation saisonnière des taux de production des catégories fermentescibles dans le secteur résidentiel à revenu élevé .....	204
<b>Figure 53 :</b> Variation saisonnière des taux de production des catégories fermentescibles dans le secteur résidentiel à revenu moyen .....	204
<b>Figure 54 :</b> Variation saisonnière des taux de production des catégories fermentescibles dans le secteur résidentiel à revenu faible .....	204
<b>Figure 55 :</b> Variation saisonnière des taux de production des catégories fermentescibles dans le secteur commercial à revenu moyen .....	205
<b>Figure 56 :</b> Variation saisonnière des taux de production des catégories fermentescibles dans le secteur commercial à revenu faible .....	205
<b>Figure 57 :</b> Estimation des composants potentiellement recyclables au Printemps .....	208
<b>Figure 58 :</b> Estimation des composants potentiellement recyclables en Été .....	208
<b>Figure 59 :</b> Estimation des composants potentiellement recyclables en Automne .....	208
<b>Figure 60 :</b> Estimation des composants potentiellement recyclables en Hiver .....	208
<b>Figure 61 :</b> Taux de production annuels et saisonniers des déchets potentiellement recyclables dans les secteurs échantillonnés .....	210
<b>Figure 62 :</b> Taux de production des catégories potentiellement recyclables dans les secteurs échantillonnés .....	211
<b>Figure 63 :</b> Taux de production des sous-catégories des plastiques dans les secteurs échantillonnés .....	213
<b>Figure 64 :</b> Taux de production des sous-catégories des métaux dans les secteurs échantillonnés .....	215
<b>Figure 65 :</b> Taux moyens de matières organiques selon les catégories et les granulométries .....	222

<b>Figure 66 :</b> Teneurs moyennes normées en métaux lourds dans les fermentescibles et les fractions très fines .....	230
<b>Figure 67 :</b> Productions moyennes des déchets ménagers et assimilés dans le Grand Tunis et en France .....	233
<b>Figure 68 :</b> Production des déchets dans le secteur résidentiel à revenu élevé .....	234
<b>Figure 69 :</b> Production des déchets dans le secteur résidentiel à revenu moyen .....	235
<b>Figure 70 :</b> Production des déchets dans le secteur résidentiel à revenu faible .....	235
<b>Figure 71 :</b> Production des déchets dans le secteur commercial à revenu moyen .....	236
<b>Figure 72 :</b> Production des déchets dans le secteur commercial à revenu faible .....	236
<b>Figure 73 :</b> Gisement potentiel valorisable par compostage dans le Grand Tunis .....	238
<b>Figure 74 :</b> Répartition des gisements valorisables par compostage selon les secteurs échantillonnés .....	238
<b>Figure 75 :</b> Tonnages des gisements valorisables par compostage dans les communes du Grand Tunis .....	239
<b>Figure 76 :</b> Production moyenne des composants valorisables par compostage .....	241
<b>Figure 77 :</b> Répartition des gisements de déchets putrescibles selon les secteurs échantillonnés .....	241
<b>Figure 78 :</b> Répartition des gisements de papiers-cartons selon les secteurs échantillonnés .....	242
<b>Figure 79 :</b> Granulométries des papiers .....	243
<b>Figure 80 :</b> Granulométries des cartons .....	243
<b>Figure 81 :</b> Granulométries des putrescibles .....	243
<b>Figure 82 :</b> Granulométries des composites .....	244
<b>Figure 83 :</b> Granulométries des textiles .....	244
<b>Figure 84 :</b> Granulométries des textiles Sanitaires .....	244
<b>Figure 85 :</b> Granulométries des plastiques .....	244
<b>Figure 86 :</b> Granulométries des combustibles .....	244
<b>Figure 87 :</b> Granulométries des métaux .....	244
<b>Figure 88 :</b> Granulométries du verre .....	245
<b>Figure 89 :</b> Granulométries des déchets spéciaux .....	245
<b>Figure 90 :</b> Granulométries des incombustibles .....	245
<b>Figure 91 :</b> Comparaison des humidités des composants fermentescibles avec les humidités globales des déchets selon les secteurs échantillonnés .....	247
<b>Figure 92 :</b> Gisement potentiel valorisable par recyclage dans le Grand Tunis .....	252
<b>Figure 93 :</b> Productions moyennes des composants potentiellement valorisables par recyclage .....	253
<b>Figure 94 :</b> Productions moyennes des composants des plastiques .....	254
<b>Figure 95 :</b> Productions moyennes des composants des métaux .....	254
<b>Figure 96 :</b> Répartition des emballages en PEHD selon les secteurs échantillonnés .....	255
<b>Figure 97 :</b> Répartition des emballages en PET selon les secteurs échantillonnés .....	256
<b>Figure 98 :</b> Répartition des emballages Films selon les secteurs échantillonnés .....	257
<b>Figure 99 :</b> Répartition des emballages métalliques en aluminium selon les secteurs échantillonnés .....	257
<b>Figure 100:</b> Tonnages des plastiques ciblés par Eco-Lef dans les communes du Grand Tunis .....	259

**LISTE DES TABLEAUX**

<b>Tableau 1 :</b> Coûts du traitement des déchets selon les principales techniques .....	21
<b>Tableau 2 :</b> Bilan des installations de compostage au Maroc .....	24
<b>Tableau 3 :</b> Identification des divers flux des déchets urbains .....	39
<b>Tableau 4 :</b> Caractéristiques quantitatives et qualitatives des déchets ménagers dans les PED et les PI .....	40
<b>Tableau 5 :</b> Variation saisonnière de la composition des déchets en matières inorganiques à Pékin .....	44
<b>Tableau 6 :</b> Caractéristiques des ordures ménagères dans quelques PED .....	46
<b>Tableau 7 :</b> Composition des déchets ménagers à Conakry (Guinée) .....	50
<b>Tableau 8 :</b> Composition des déchets ménagers et assimilés en Tunisie .....	50
<b>Tableau 9 :</b> Nombre de catégories et de sous-catégories recherchées dans 7 pays européens .....	56
<b>Tableau 10 :</b> Catégories recherchées dans 7 pays européens .....	57
<b>Tableau 11 :</b> Coûts des opérations d'échantillonnage et de tri d'une campagne .....	58
<b>Tableau 12 :</b> Coût prévisionnel d'une campagne de cinq échantillon.....	58
<b>Tableau 13 :</b> Phase préalable à la réalisation des campagnes de caractérisation du Grand Tunis - Envergure et Difficultés rencontrées .....	81
<b>Tableau 14 :</b> Répartition des flux de déchets collectés en mélange .....	87
<b>Tableau 15 :</b> Nomenclature de tri correspondant aux déchets ménagers du Grand Tunis .....	90
<b>Tableau 16 :</b> Les résultats du séchage .....	92
<b>Tableau 17 :</b> Les résultats du criblage .....	92
<b>Tableau 18 :</b> Les résultats du tri .....	93
<b>Tableau 19 :</b> Les masses fragmentaires moyennes .....	93
<b>Tableau 20 :</b> Résultats du test de Shaqpiro-Wilk – Calcul du coefficient W pour un risque de 5%.....	105
<b>Tableau 21 :</b> Résultats du test de Shaqpiro-Wilk – Calcul du coefficient W pour un risque de 1%.....	105
<b>Tableau 22 :</b> Les variances d'échantillonnage .....	107
<b>Tableau 23 :</b> Calcul de m et de n pour un coût optimum .....	108
<b>Tableau 24 :</b> Calcul de m pour n égal à 3 .....	109
<b>Tableau 25 :</b> Erreurs fondamentales calculées pour une masse de 200kg .....	110
<b>Tableau 26 :</b> Inadaptation des modes de tris existants aux contraintes et spécificités des PED .....	113
<b>Tableau 27 :</b> Evaluation des paramètres des tris « sec » et « humide » pour le cas des déchets des PED .....	116
<b>Tableau 28 :</b> Analyse comparative du tri d'un échantillon de 500kg selon les 3 modes de tris .....	116
<b>Tableau 29 :</b> Composition de l'ordure ménagère synthétique .....	118
<b>Tableau 30 :</b> Estimation de la composition de l'ordure ménagère synthétique homogénéisée .....	118
<b>Tableau 31 :</b> Résultats du « tri humide » .....	119
<b>Tableau 32 :</b> Résultats du « tri sec » .....	120
<b>Tableau 33 :</b> Résultats du « tri adapté » .....	120
<b>Tableau 34 :</b> Comparaison des compositions massiques obtenues par les 3 modes de tris avec la composition réelle de l'ordure synthétique homogénéisée .....	121
<b>Tableau 35 :</b> Comparaison des compositions granulométriques obtenues par les 3 modes de tris avec la composition réelle de l'ordure synthétique homogénéisée .....	121
<b>Tableau 36 :</b> Bilan des principaux projets de gestion des déchets municipaux réalisés dans le cadre du PRONAGDES .....	130

<b>Tableau 37</b> :Caractéristiques démographiques des 4 gouvernorats du Grand Tunis .....	133
<b>Tableau 38</b> :Caractéristiques démographiques des 29 communes concernées par la collecte des déchets .....	134
<b>Tableau 39</b> :Caractéristiques démographiques des 25 arrondissements des 3 communes de Tunis, Ariana et Ettadhamen-Mnihla .....	135
<b>Tableau 40</b> :Caractéristiques démographiques des 51 communes et arrondissements concernés par la collecte des déchets dans le Grand Tunis .....	135
<b>Tableau 41</b> :Caractéristiques socio-économiques des communes et des principaux arrondissements (1) .....	135
<b>Tableau 42</b> :Caractéristiques socio-économiques des communes et des principaux arrondissements (2) .....	136
<b>Tableau 43</b> :Déchets dits « ménagers et assimilés » générés en 2002 dans les 4 gouvernorats du Grand Tunis .....	138
<b>Tableau 44</b> :Identification des communes à caractère saisonnier .....	141
<b>Tableau 45</b> :Les critères de sectorisation .....	142
<b>Tableau 46</b> :Regroupement des communes et arrondissements selon les critères de sectorisation .....	142
<b>Tableau 47</b> :Caractéristiques des secteurs identifiés .....	143
<b>Tableau 48</b> :Caractéristiques des 6 secteurs homogènes.....	144
<b>Tableau 49</b> :Caractéristiques des 2 secteurs à caractère saisonnier.....	144
<b>Tableau 50</b> :Identification des communes (C) et des arrondissements (A) selon le mode d'acheminement de leurs déchets vers la décharge .....	145
<b>Tableau 51</b> :Identification des zones potentielles d'échantillonnage selon les critères de sectorisation .....	147
<b>Tableau 52</b> :Caractéristiques des 5 secteurs homogènes du Grand Tunis représentés par les zones d'échantillonnage choisies .....	147
<b>Tableau 53</b> :Description des divers flux de déchets solides générés par la ville de Tunis .....	151
<b>Tableau 54</b> :Evaluation des déchets des marchés générés dans les arrondissements de la ville de Tunis.....	153
<b>Tableau 55</b> :Evaluation des déchets générés par les principaux établissements de soins de la ville de Tunis ...	154
<b>Tableau 56</b> :Evaluation des divers flux générés par la ville de Tunis.....	154
<b>Tableau 57</b> :Evaluation des déchets verts générés dans les arrondissements de la ville de Tunis.....	155
<b>Tableau 58</b> :Evaluation des déchets municipaux générés par la ville de Tunis.....	155
<b>Tableau 59</b> :Evaluation des flux de déchets solides générés par la ville de Tunis.....	156
<b>Tableau 60</b> :Tonnages annuels et ratios de production des déchets ménagers et assimilés.....	158
<b>Tableau 61</b> :Caractéristiques socio-économiques et de production des déchets dans les 5 secteurs .....	162
<b>Tableau 62</b> :Identification des bennes desservant les 16 arrondissements de la ville de Tunis.....	163
<b>Tableau 63</b> :Identification des circuits des 30 bennes retenues pour l'échantillonnage.....	164
<b>Tableau 64</b> :Tirage au sort des circuits à échantillonner.....	165
<b>Tableau 65</b> :Identification des circuits à échantillonner.....	166
<b>Tableau 66</b> :Calendrier d'échantillonnage.....	167
<b>Tableau 67</b> :Précision des mesures dans le secteur résidentiel à revenu élevé.....	179
<b>Tableau 68</b> :Précision des mesures dans le secteur résidentiel à revenu moyen .....	180
<b>Tableau 69</b> :Précision des mesures dans le secteur résidentiel à revenu faible.....	180
<b>Tableau 70</b> :Précision des mesures dans le secteur commercial à revenu moyen.....	180
<b>Tableau 71</b> :Précision des mesures dans le secteur commercial à revenu faible.....	181

<b>Tableau 72</b> :Fourchettes des compositions des déchets dans les secteurs échantillonnés .....	181
<b>Tableau 73</b> :Composition des déchets ménagers et assimilés en catégories selon les saisons et les secteurs échantillonnés.....	185
<b>Tableau 74</b> :Composition des plastiques par secteur et par saison.....	189
<b>Tableau 75</b> :Composition des métaux par secteur et par saison.....	192
<b>Tableau 76</b> :Composition granulométrique globale en % de la masse humide.....	194
<b>Tableau 77</b> :Taux de production de déchets ménagers et assimilés journaliers et annuels dans les divers secteurs échantillonnés .....	201
<b>Tableau 78</b> :Taux de production de déchets ménagers et assimilés et de déchets fermentescibles dans les divers secteurs échantillonnés .....	201
<b>Tableau 79</b> :Taux de production de déchets fermentescibles par catégories dans les divers secteurs échantillonnés .....	202
<b>Tableau 80</b> :Taux de production annuels et saisonniers des déchets fermentescibles par catégories et par secteurs .....	206
<b>Tableau 81</b> :Gisement potentiellement recyclable (en % de la masse humide) .....	207
<b>Tableau 82</b> :Gisements potentiellement recyclables (en % des masses humides et sèches) .....	209
<b>Tableau 83</b> :Taux de production de déchets ménagers et assimilés et de déchets potentiellement recyclables dans les divers secteurs échantillonnés .....	209
<b>Tableau 84</b> :Taux de production de déchets potentiellement recyclables par catégories dans les divers secteurs échantillonnés .....	210
<b>Tableau 85</b> :Taux de production annuels et saisonniers des déchets potentiellement recyclables par catégories et par secteurs .....	212
<b>Tableau 86</b> :Taux de production des plastiques par sous-catégories dans les divers secteurs échantillonnés....	213
<b>Tableau 87</b> :Taux de production annuels et saisonniers des plastiques par sous-catégories et par secteurs .....	214
<b>Tableau 88</b> :Taux de production des métaux par sous-catégories dans les divers secteurs échantillonnés.....	214
<b>Tableau 89</b> :Taux de production annuels et saisonniers des métaux par sous-catégories et par secteurs .....	215
<b>Tableau 90</b> :Humidités globales mesurées et corrigées par secteurs et par saisons .....	217
<b>Tableau 91</b> :Humidités des fractions fermentescibles selon les secteurs et les saisons .....	218
<b>Tableau 92</b> :Humidités des fractions non fermentescibles selon les secteurs et les saisons .....	219
<b>Tableau 93</b> :Humidités des fractions fines selon les secteurs et les saisons .....	219
<b>Tableau 94</b> :Résultats de la calcination des fractions très fines selon les secteurs et les saisons .....	221
<b>Tableau 95</b> :Taux de matières organiques contenues dans les catégories des fractions fermentescibles selon les secteurs et les saisons .....	221
<b>Tableau 96</b> :Teneurs en carbone organique selon les secteurs et les saisons .....	223
<b>Tableau 97</b> :Teneurs en azote total selon les secteurs et les saisons .....	224
<b>Tableau 98</b> :Les ratios C/N moyens des composants fermentescibles .....	224
<b>Tableau 99</b> :Origine des métaux lourds dans les ordures ménagères .....	226
<b>Tableau 100</b> :Teneurs moyennes en ETM dans les ordures ménagères françaises .....	227
<b>Tableau 101</b> :Caractéristiques des principaux métaux lourds .....	228
<b>Tableau 102</b> :Fourchettes de valeurs des ETM dans les fermentescibles et les fractions très fines .....	229

---

<b>Tableau 103:</b> Fourchettes de valeurs des ETM normées à 30% dans les fermentescibles et les fractions très fines .....	229
<b>Tableau 104:</b> Les gisements valorisables par compostage dans les communes du Grand Tunis .....	240
<b>Tableau 105:</b> Fourchettes des humidités dans les composants valorisables par compostage .....	247
<b>Tableau 106:</b> Rapports C/N de mélange selon les secteurs et les saisons .....	248
<b>Tableau 107:</b> Les valeurs limites pour les ETM dans les composts en Europe .....	249
<b>Tableau 108:</b> Teneurs en ETM normées dans les fermentescibles .....	250
<b>Tableau 109:</b> Teneurs en ETM normées dans les fractions très fines .....	251
<b>Tableau 110:</b> Les gisements des plastiques ciblés par Eco-Lef dans les communes du Grand Tunis .....	258
<b>Tableau 111:</b> Les gisements d’emballages en plastiques estimés dans toute la Tunisie .....	261
<b>Tableau 112:</b> Plastiques collectés sur la période 2001-2004 .....	261
<b>Tableau 113:</b> Bilan économique des plastiques collectés sur la période 2001-2004 .....	262

**ANNEXES**  
**PLANCHES PHOTOGRAPHIQUES**

**ANNEXE - 1**

**LA PREPARATION DU SITE D'ECHANTILLONNAGE  
(AVANT ET APRES NETTOYAGE)**



**ANNEXE - 2**

**ILLUSTRATION DES DIFFICULTES RENCONTREES POUR LE TRI DES DECHETS**

**(EX. LA PROTECTION DE L'AIRE DE TRI)**

Aire de tri sur la Décharge



Les cartons constituant l'abri sont envolés par le vent



Tentative de réparation de l'abri

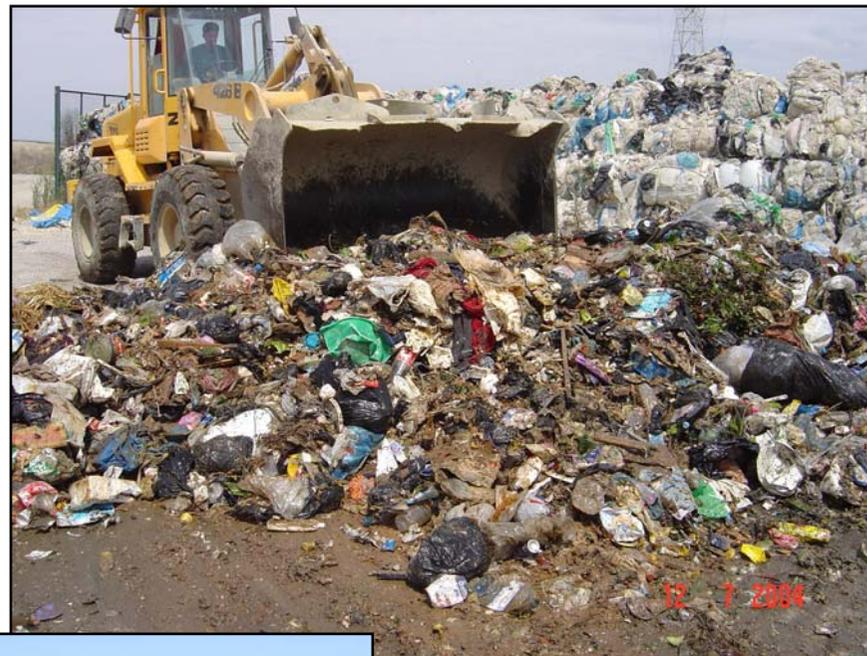
**ANNEXE - 3**

**DEROULEMENT DES CAMPAGNES DE CARACTERISATION**

Déversement du contenu de la benne sur l'aire d'échantillonnage



**Quartage du contenu de la benne à l'aide d'un chargeur**



**Constitution et Pesage des échantillons**



**Le tri préalable des déchets bruts**





Criblage et Tri des « Gros »



Criblage et Tri des « Moyens »



Récupération des « Fines »



Transport des échantillons triés vers le « Hall Déchets »





**Le tri complémentaire des déchets séchés dans le « Hall Déchets »**

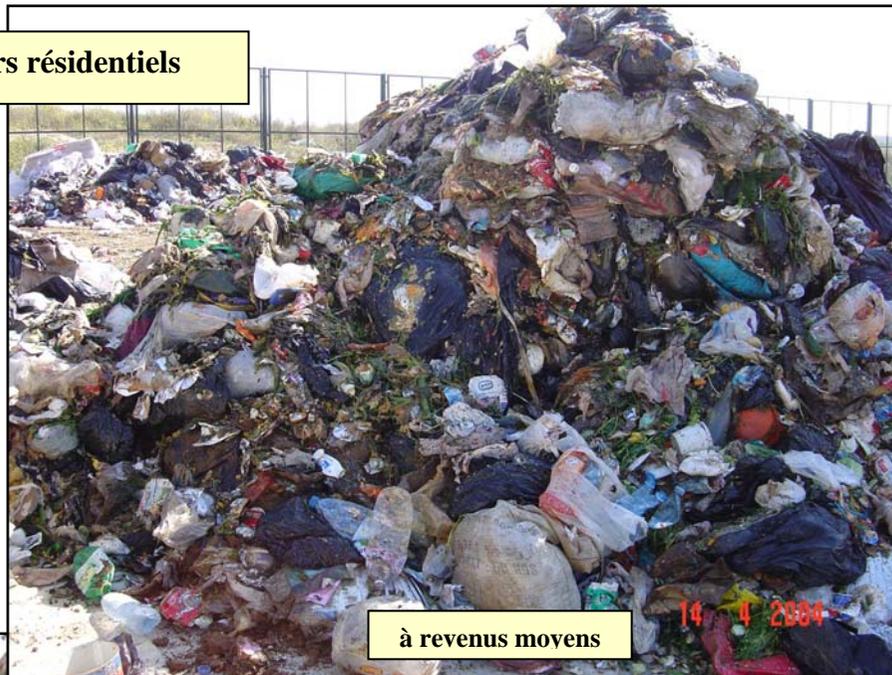


**ANNEXE - 4**  
**TYPOLOGIE DES DECHETS DES CINQ SECTEURS CARACTERISES**  
**DANS LE GRAND TUNIS**

Déchets issus des secteurs résidentiels



à revenus élevés



à revenus moyens



à revenus faibles



**TABLE DES MATIERES**

Sigles et Abréviations .....	11
<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>13</b>

## **1<sup>ère</sup> Partie. SITUATION DES DECHETS DANS LES PAYS EN DEVELOPPEMENT ET ENJEUX DE LEUR CARACTERISATION**

### **Chapitre 1. Situation Générale et Cas Particuliers**

<b>I. Description de la situation des déchets dans les pays en développement .....</b>	<b>19</b>
1. La collecte et le transfert .....	19
2. Le traitement et la valorisation .....	20
2.1. La mise en Décharge Contrôlée .....	21
2.1.1. Problèmes rencontrés à travers le cas de la décharge du Grand Tunis .....	22
2.1.2. Problèmes rencontrés à travers le cas de la décharge de Gaza .....	23
2.2. Le Compostage .....	23
2.2.1. Echec du compostage à travers le cas du Maroc .....	24
2.2.2. Exemple de procédés industriels « clés en mains » à travers le cas de l'offre de Sousse .....	24
2.2.3. Exemple de procédés « dits adaptés » à travers le cas de la station pilote de Béja .....	25
2.3. L'Incinération .....	26
2.3.1. Difficultés et échec de l'incinération à travers le cas de l'usine de Pudong .....	26
2.3.2. Difficultés et échec de l'incinération à travers le cas de l'usine de Sourabaya .....	27
2.4. Les Collectes Sélectives et le Recyclage .....	27
2.4.1. Inefficacité du secteur informel .....	27
2.4.2. Echec du modèle « européen » à travers le cas particulier de la Tunisie .....	28
<b>II. Bilans et analyses des problèmes .....</b>	<b>30</b>
1. Cas de la Collecte des déchets .....	30
2. Cas de la mise en Décharge .....	31
3. Cas du Compostage .....	32
4. Cas de l'Incinération .....	33
5. Cas des Collectes Sélectives et du Recyclage .....	33
<b>III. Nécessité d'une démarche de « Recherche-Développement » pour le choix de traitements adaptés aux contextes des PED .....</b>	<b>34</b>
1. Nécessité d'une démarche expérimentale pour caractériser les systèmes de traitement .....	34
2. Nécessité d'une démarche préalable de caractérisation des déchets .....	35

### **Chapitre 2. le Besoin Préable de la Caractérisation des Déchets**

<b>I. Caractéristiques générales des déchets urbains dans les pays en développement .....</b>	<b>38</b>
1. Identification des flux .....	38
2. Caractéristiques des déchets ménagers et assimilés .....	40
2.1. Les aspects quantitatifs .....	40
2.2. Les aspects qualitatifs .....	41
3. Hétérogénéités et Facteurs de variations .....	43
3.1. Influence des variations saisonnières .....	43
3.2. Influence des situations urbaines et socio-économiques .....	44
<b>II. Faible connaissance des déchets ménagers dans les pays en développement .....</b>	<b>45</b>
1. Revue des données existantes .....	45
2. Divers constats de la faiblesse des données existantes .....	49
2.1. Constat général .....	49
2.2. Cas particuliers .....	49
3. Causes et Conséquences de la méconnaissance des gisements .....	50
3.1. Les causes .....	50
3.2. Les conséquences .....	52

### **Chapitre 3. Besoin de Méthodes de Caractérisation des Déchets Adaptées**

<b>I. Les Enjeux de la caractérisation des déchets .....</b>	<b>54</b>
<b>II. Les Principales méthodes de caractérisation des déchets .....</b>	<b>55</b>
1. Les méthodes et modèles théoriques .....	55
2. Les méthodes d'analyse directe .....	56
2.1. Envergures et coûts des opérations .....	56
2.2. Harmonisation des méthodes européennes .....	59
3. Limites et faiblesses des méthodes de caractérisation des déchets .....	59
3.1. La précision des résultats .....	60
3.2. La représentativité des prélèvements .....	60
3.3. Le manque de fondements statistiques des méthodes existantes .....	60
<b>III. Le Besoin de méthodes de caractérisation rigoureuses, opérationnelles et adaptées pour les PED ...</b>	<b>61</b>
1. Inadaptation des méthodes développées dans les pays industrialisés .....	61
2. Besoin de prise en compte des spécificités des pays en développement .....	62

## 2<sup>ème</sup> PARTIE. MISE AU POINT D'UNE METHODE DE CARACTERISATION DES DECHETS ADAPTEE A LA SITUATION DES PED

### Chapitre 1. Cadre et Approche Méthodologique pour la Caractérisation des Déchets Ménagers dans les pays en développement

<b>I. Cadre institutionnel et pratique de la conception de la méthode de caractérisation des déchets ménagers .....</b>	<b>64</b>
1. Description du programme « Compostage » .....	64
1.1. Les objectifs et les partenariats du programme .....	64
1.2. Les composantes et les résultats attendus du programme .....	65
2. Description de la « Plate-forme Expérimentale sur les Déchets » .....	66
2.1. La structure et l'organisation de la Plate-forme .....	66
2.2. Les objectifs de la Plate-forme .....	67
2.2.1. La Recherche-Développement .....	67
2.2.2. L'Expertise .....	67
2.2.3. La Formation .....	68
2.3. Le recyclage des déchets de la Technopôle .....	68
2.4. Lieux actuels des expérimentations .....	68
<b>II. Approche méthodologique pour le cadrage d'une méthode de caractérisation des déchets ménagers dans les PED .....</b>	<b>69</b>
1. Identification des contraintes des PED .....	69
1.1. Au niveau de la collecte des données .....	69
1.2. Au niveau de la préparation des opérations pratiques .....	70
1.3. Au niveau des protocoles d'échantillonnage et de tri .....	71
1.4. Au niveau de la réalisation des analyses .....	72
2. Intégration des contraintes dans la démarche méthodologique .....	73
2.1. La collecte des données .....	75
2.2. La préparation et l'organisation des opérations d'échantillonnages et de tris .....	76
2.3. L'acquisition des moyens d'analyses physico-chimiques .....	78
2.4. La mise au point des protocoles d'échantillonnage et de tri .....	79
<b>III. Application de la démarche méthodologique dans le cas particulier de la caractérisation des déchets dans le Grand Tunis .....</b>	<b>80</b>
1. Identification des contraintes locales .....	80
1.1. Manque de données complètes et précises .....	80
1.1.1. Absence de données démographiques et socio-économiques au niveau de certaines communes et de certains arrondissements .....	80
1.1.2. Absence de données complètes et précises sur la production des déchets .....	82
1.2. Insuffisance des moyens et difficultés dans la préparation et l'organisation des opérations pratiques .....	84
1.3. Equipements d'analyses non fonctionnels et limités .....	85
2. Conditions de l'intégration des contraintes dans la phase préalable à la caractérisation .....	85
2.1. La recherche, l'analyse et la vérification des données .....	86
2.1.1. Les données démographiques et socio-économiques .....	86
2.1.2. Les données de production des déchets .....	86
2.2. La préparation et l'organisation des opérations pratiques .....	88
2.3. L'acquisition des moyens d'analyses physico-chimiques .....	89
3. La mise au point de la nomenclature et des protocoles d'échantillonnage et de tri .....	89
3.1. Le choix des catégories et des tranches granulométriques .....	89
3.2. La détermination des paramètres d'échantillonnage .....	91
3.2.1. Le déroulement des opérations .....	91
3.2.2. Les résultats de séchage, de tri, de criblage et de dénombrement .....	92
3.3. La détermination d'un mode de tri adapté .....	93

## Chapitre 2. Bases Scientifiques de la Méthode

<b>I. Problématique de l'échantillonnage des déchets ménagers .....</b>	<b>95</b>
1. L'échantillonnage : définition, importance et qualité .....	95
2. L'erreur fondamentale d'échantillonnage et notion de représentativité .....	95
2.1. Définitions .....	95
2.2. Origine de l'erreur d'échantillonnage .....	96
2.3. Calcul de l'erreur fondamentale .....	97
3. L'échantillonnage des déchets à composants majoritaires .....	98
3.1. La théorie de P.Gy étendue aux déchets.....	98
3.2. La représentativité associée à l'aide à la décision .....	100
<b>II. Détermination de la stratégie d'échantillonnage dans le cas du Grand Tunis .....</b>	<b>101</b>
1. Les références de normalisation de l'échantillonnage des déchets ménagers .....	101
1.1. La norme française NF XP X30-411 .....	101
1.2. La future norme européenne pr EN 14899 .....	102
2. Détermination des paramètres d'échantillonnage .....	103
2.1. Détermination de la masse minimale du prélèvement représentatif .....	103
2.1.1. Les méthodes d'étude de la normalité .....	103
2.1.2. L'étude de la normalité de la distribution des grandeurs mesurées à partir des prélèvements de « l'analyse test » .....	104
2.2. Détermination du nombre de prélèvements élémentaires et du nombre d'échantillons à constituer .....	106
2.2.1. Calcul des variances d'échantillonnage .....	106
2.2.2. Choix de m et de n .....	107
3. Détermination de l'erreur fondamentale d'échantillonnage .....	109
<b>III. Mise au point d'un mode opératoire de tri adapté .....</b>	<b>110</b>
1. Description et analyse comparative des modes opératoires existants .....	110
1.1. Description des modes de tri existants .....	110
1.2. Analyse comparative des deux modes de tri « sec » et « humide » .....	111
1.2.1. Inconvénients du tri « sur humide » .....	111
1.2.2. Inconvénients du tri « sur sec » .....	112
2. Inadaptation des modes de tri existants au cas des PED et principes d'un mode de « tri adapté » .....	112
2.1. Inadaptation aux contraintes et spécificités des PED .....	112
2.2. Faible représentativité de la composition réelle des déchets des PED par les tris « sec » et « humide » .....	114
2.3. Les fondements de la procédure de tri « adapté » .....	115
3. Analyse comparative du « tri adapté » par rapport aux tris « sec » et « humide » .....	115
3.1. Analyse comparative de l'efficacité des tris .....	115
3.2. Analyse comparative de la précision des tris .....	117
3.2.1. Description des tests de tris et déroulement des opérations .....	117
3.2.2. Les résultats de tris .....	119
3.2.3. Analyse des résultats et quantification des erreurs de tri engendrées .....	120
4. Bilan comparatif et avantages avérés du « tri adapté » par rapport aux modes de tris existants .....	125

### 3<sup>ème</sup> Partie. VALIDATION DE LA METHODE DE CARACTERISATION

#### Chapitre 1. Contexte Général et Validation de la Méthode dans le Grand Tunis

<b>I. Contexte général et besoin d'une réelle connaissance des déchets ménagers en Tunisie .....</b>	128
1. La stratégie nationale en matière de gestion des déchets solides .....	128
1.1. Bilan des principaux projets réalisés dans le cadre du PRONAGDES et difficultés rencontrées ..	128
1.2. Absence de démarche scientifique opérationnelle dans la mise en place des projets .....	129
2. La composition des déchets ménagers et assimilés en Tunisie .....	131
2.1. Analyse des fondements de la composition officielle .....	131
2.2. Besoin d'une représentation réelle des déchets ménagers .....	132
<b>II. Identification des caractéristiques du Grand Tunis .....</b>	133
1. Caractéristiques urbaines, démographiques et socio-économiques .....	133
1.1. Identification des communes et des arrondissements et évaluation de leurs populations sédentaires .....	133
1.2. Identification des caractéristiques socio-économiques .....	135
2. Evaluation de la production de déchets ménagers et assimilés .....	137
2.1. Recensement des productions annuelles et mensuelles .....	138
2.2. Evaluation des ratios journaliers par habitant .....	139
2.3. Détermination du caractère saisonnier des communes .....	140
<b>III. La sectorisation du Grand Tunis .....</b>	141
1. Les critères de sectorisation .....	141
2. Les résultats de la sectorisation .....	141
<b>IV. Le choix des zones d'échantillonnage .....</b>	145
1. Choix des zones d'échantillonnage selon le mode d'acheminement des déchets vers la décharge .....	145
2. Choix des zones d'échantillonnage selon la disponibilité des données .....	146
2.1. Au niveau des arrondissements .....	146
2.2. Au niveau des communes .....	147
<b>V. Le choix des périodes d'échantillonnage .....</b>	148

#### Chapitre 2. Organisation et Déroulement des Campagnes de Caractérisation dans la Ville de Tunis

<b>I. Evaluation des déchets ménagers et assimilés générés par la ville de Tunis et description de leurs modes de collecte .....</b>	150
1. Description des divers flux de déchets solides et de leurs modes de collecte .....	150
2. Evaluation des divers flux de déchets solides générés par la ville de Tunis .....	152
2.1. Evaluation des déchets ménagers et assimilés .....	153
2.2. Evaluation des déchets municipaux .....	154
2.3. Evaluation des déchets solides .....	156
3. Bilan des divers flux et calcul des ratios de production propres aux déchets ménagers et assimilés .....	156
3.1. Bilan des divers flux et de leurs modes de collectes .....	156
3.2. Evaluation des ratios de production des déchets ménagers et assimilés .....	158
4. Description de la collecte des déchets par la Direction de la Propreté de la ville de Tunis .....	159
4.1. La pré-collecte .....	159
4.2. La collecte .....	159
4.2.1. La fréquence et les horaires .....	159
4.2.2. Les équipements .....	159
4.2.3. Les circuits .....	160
4.3. Le transport à la décharge .....	160
<b>II. Organisation des campagnes de caractérisation .....</b>	161
1. Identification des secteurs d'échantillonnage .....	161
2. Choix des bennes à échantillonner .....	162
2.1. Identification des bennes à échantillonner .....	163
2.2. Identification des circuits à échantillonner .....	164
2.2.1. Identification des circuits transportant majoritairement les déchets des marchés et les déchets de soins .....	165
2.2.2. Tirage au sort des circuits à échantillonner .....	165
3. Planification des opérations d'échantillonnage et de tri .....	166
<b>III. Déroulement des campagnes caractérisation .....</b>	167
1. Déroulement des opérations d'échantillonnages et de tris préalables .....	168
1.1. L'échantillonnage du contenu des bennes .....	168
1.2. Le tri préalable des déchets bruts .....	168
2. Déroulement des opérations de séchage et de tris complémentaires .....	169
2.1. La constitution des échantillons pour le séchage .....	169
2.2. Le séchage des échantillons .....	170
2.3. Le tri complémentaire des déchets séchés .....	170
3. Déroulement des analyses au laboratoire .....	170
3.1. La détermination du taux de Matière Organique .....	170
3.2. Le dosage du Carbone .....	171
3.3. Le dosage de l'Azote .....	171
3.4. La détermination des Métaux Lourds .....	171

## 4<sup>ème</sup> Partie. LA CARACTERISATION DES DECHETS MENAGERS ET ASSIMILES DANS LE GRAND TUNIS : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

### Chapitre 1. Analyse des Résultats et Précision des Mesures

<b>I. Bilan des campagnes d'échantillonnage .....</b>	173
1. Rappel de la stratégie d'échantillonnage .....	173
2. Bilan des opérations d'échantillonnage et de tri .....	173
<b>II. Présentation des résultats et précision des mesures .....</b>	176
1. Calcul de la composition des échantillons triés et présentation des résultats .....	177
2. Précision des mesures .....	178

### Chapitre 2. La Composition des Déchets en Catégories et Sous-Catégories et en Tranches Granulométriques

<b>I. La composition des déchets ménagers et assimilés en catégories et sous-catégories par secteurs et par saisons .....</b>	184
1. La composition des déchets en catégories .....	184
2. La composition des déchets en sous-catégories .....	189
2.1. La composition des plastiques .....	189
2.2. La composition des métaux .....	191
<b>II. La composition des déchets ménagers et assimilés en tranches granulométriques par secteurs et par saisons .....</b>	194
1. La composition granulométrique globale .....	194
2. La composition granulométrique par catégories .....	195
2.1. La distribution des « Gros » .....	195
2.2. La distribution des « Moyens » .....	196
2.3. La distribution des « Fins » .....	197

### Chapitre 3. Estimation des Composants Valorisables par Compostage et par Recyclage

<b>I. Estimation des composants valorisables par compostage .....</b>	199
1. Estimation des composants fermentescibles en pourcentages par secteurs et par saisons .....	199
2. Estimation des composants fermentescibles en taux de production par habitant par secteurs et par saisons .....	199
2.1. Calcul des taux de production du gisement global des fermentescibles .....	201
2.2. Calcul des taux de production du gisement fermentescible par catégories .....	202
<b>II. Estimation des composants potentiellement valorisables par recyclage .....</b>	206
1. Estimation des composants potentiellement recyclables en pourcentages par secteurs et par saisons .....	207
1.1. Estimations en pourcentages par rapport à la masse humide .....	207
1.2. Estimations en pourcentages par rapport à la masse sèche .....	207
2. Estimation des composants potentiellement recyclables en taux de production par habitant par secteurs et par saisons .....	209
2.1. Calcul des taux de production du gisement global .....	209
2.2. Calcul des taux de production du gisement par catégories .....	210
2.3. Calcul des taux de production du gisement par sous-catégories .....	212
2.3.1. Calcul des taux de production des sous-catégories des plastiques .....	212
2.3.2. Calcul des taux de production des sous-catégories des métaux .....	214

## Chapitre 4. Caractéristiques Physico-Chimiques des Composants des Déchets

<b>I. Humidités des déchets par secteurs et par saisons .....</b>	<b>217</b>
1. Détermination de l'humidité globale des échantillons triés .....	217
2. Détermination de l'humidité par catégories et par fractions granulométriques .....	218
2.1. Humidités des fractions fermentescibles .....	218
2.2. Humidités des fractions non-fermentescibles .....	218
2.3. Humidités des fractions fines .....	219
<b>II. Détermination des taux de matières organiques .....</b>	<b>220</b>
1. Objectifs des mesures et bilan analytique .....	220
2. Détermination des taux de matières organiques dans les fractions « très fines » .....	220
3. Détermination des taux de matières organiques dans les fermentescibles .....	221
<b>III. Détermination des teneurs en carbone et en azote .....</b>	<b>222</b>
5. Objectifs des mesures et bilan analytique .....	222
6. Détermination des teneurs en carbone des composants fermentescibles .....	223
7. Détermination des teneurs en azote des composants fermentescibles .....	223
8. Détermination des rapports C/N des composants fermentescibles .....	223
<b>IV. Détermination des éléments traces métalliques .....</b>	<b>225</b>
1. Objectifs des mesures et bilan analytique .....	225
2. Généralités sur les éléments traces métalliques .....	225
2.1. Origine des ETM dans les ordures ménagères .....	225
2.2. Caractéristiques des principaux ETM recherchés .....	228
3. Détermination des teneurs en ETM des échantillons triés .....	228

## Chapitre 5. Bilan des Gisements dans le Grand Tunis et Analyse de leur aptitude à la Valorisation par Compostage et par Recyclage

<b>I. La composition des déchets ménagers et assimilés dans le Grand Tunis .....</b>	<b>232</b>
1. La composition annuelle moyenne par habitant .....	232
2. La composition annuelle par habitant selon les secteurs échantillonnés .....	234
2.1. La composition des déchets dans les secteurs résidentiels .....	234
2.2. La composition des déchets dans les secteurs commerciaux .....	236
<b>IV. Les gisements valorisables par compostage .....</b>	<b>237</b>
1. Les gisements par secteurs et par communes .....	237
1.1. Répartition des gisements par secteurs .....	237
1.2. Répartition des gisements par communes .....	238
2. Les gisements en terme de catégories .....	240
2.1. Le gisement global .....	240
2.2. Répartition du gisement entre les secteurs .....	241
3. Les gisements en terme de granulométries .....	242
3.1. La répartition granulométrique des déchets fermentescibles .....	242
3.2. La répartition granulométrique des composants indésirables .....	243
4. L'aptitude des déchets au compostage en terme de paramètres physico-chimiques .....	246
4.1. L'aptitude des déchets au compostage en terme d'humidités .....	246
4.2. L'aptitude des déchets au compostage en terme d'équilibres nutritionnels .....	248
4.3. L'aptitude des déchets au compostage en terme de pollution métallique .....	249
4.3.1. Les références de normalisation des métaux lourds dans les composts .....	249
4.3.2. Les métaux lourds dans la biomasse fermentescible des déchets échantillonnés .....	250
<b>V. Les gisements potentiellement valorisables par recyclage .....</b>	<b>251</b>
1. Le gisement global en masse humide .....	252
2. Le gisement en terme de catégories et de sous-catégories en masses sèches .....	252
2.1. Le gisement en terme de catégories .....	253
2.2. Le gisement en terme de sous-catégories .....	253
3. Le gisement potentiel des emballages ciblés par le système « Eco-Lef » .....	255
3.1. Répartition des gisements par secteurs .....	255
3.1.1. Répartition des emballages en Polyéthylène Haute Densité (PEHD) .....	255
3.1.2. Répartition des emballages en Polyéthylène Téréphtalate (PET) .....	256
3.1.3. Répartition des emballages en Polypropylènes .....	256
3.1.4. Répartition des emballages métalliques en aluminium .....	257
3.2. Répartition des gisements par communes .....	258
4. Bilan et analyse du système « Eco-Lef » .....	260
4.1. Une évaluation théorique des gisements .....	260
4.2. Une inefficacité technique et économique .....	261
4.3. Interprétation générale, enjeu de la caractérisation et confirmation des paramètres déterminants. .....	262

---

<b>CONCLUSION</b> .....	264
<b>Références Bibliographiques</b> .....	282
<b>Liste des Figures</b> .....	292
<b>Liste des Tableaux</b> .....	296
<b>Annexes : Planches Photographiques</b> .....	301
Annexes 1 : La préparation du site d'échantillonnage (avant et après nettoyage) .....	302
Annexes 2 : Illustration des difficultés rencontrées pour le tri des déchets.....	304
Annexes 3 : Déroulement des campagnes de caractérisation.....	306
Annexes 4 : Typologie des déchets des cinq caractérisés dans le Grand Tunis .....	314
<b>Table des Matières</b> .....	317

AUTORISATION DE SOUTENANCE DE THESE  
DU DOCTORAT DE L'INSTITUT NATIONAL  
POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

o0o

VU LES RAPPORTS ETABLIS PAR :

**Monsieur Manef ABDERRABA, Professeur, Technopôle de Borj Cedria, Tunisie**

**Monsieur Rémy GOURDON, Professeur, INSA de Lyon, Villeurbanne**

Le Président de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, autorise :

**Madame BEN AMMAR Samira**

à soutenir devant un jury de l'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE,  
une thèse intitulée :

**"Les enjeux de la caractérisation des déchets ménagers pour le choix de traitements  
adaptés dans les pays en développement. Résultats de la caractérisation dans le Grand  
Tunis - Mise au point d'une méthode adaptée"**

NANCY BRABOIS  
2, AVENUE DE LA  
FORET-DE-HAYE  
BOITE POSTALE 3  
F - 54501  
VANDŒUVRE CEDEX

en vue de l'obtention du titre de :

DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

Spécialité : « **Géosciences** »

Fait à Vandoeuvre, le 10 octobre 2006

Le Président de l'I.N.P.L.,

L. SCHUFFENECKER

