

DAOULA YAOUNDÉ KUMBA GAROUA BAFANG
NGSAMBA BAFOUSSAM DAOULA YAOUNDÉ
FOUSSAM DAOULA YAOUNDÉ KUMBA GAROUA
BAFANG NKONGSAMBA BAFOUSSAM DAOULA
YAOUNDÉ KUMBA GAROUA BAFANG NKONGSAMBA
BAFOUSSAM DAOULA YAOUNDÉ KUMBA GAROUA

Les villes d'Afrique face à leurs déchets

Emmanuel Ngnikam et Émile Tanawa

Chantiers



LES VILLES D'AFRIQUE FACE À LEURS DÉCHETS

La publication de l'ouvrage a été assurée par Yves-Claude Lequin, UTBM.

© Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2006
ISBN : 978-2-914279-32-1

LES VILLES D'AFRIQUE FACE À LEURS DÉCHETS

EMMANUEL NNGNIKAM ET ÉMILE TANAWA

PRÉSENTATION DES AUTEURS

Emmanuel Ngnikam est ingénieur du génie civil, diplômé de l'École nationale supérieure polytechnique de Yaoundé et titulaire d'un doctorat en sciences et techniques de déchets de l'INSA de Lyon en France. En plus de sa qualité d'enseignant, il est un homme de terrain rompu dans les conduites des projets particulièrement dans le domaine de gestion et traitement des déchets, des infrastructures de développement urbain participatif et d'électrification rurale. Il dispose d'une grande expérience de collaboration avec les institutions locales, notamment les communes et les institutions de développement, les associations de base dont il a contribué à la création d'une vingtaine dans les villes de Yaoundé et Bafoussam. En tant que coordonnateur d'une ONG locale, Dr Ngnikam jouit d'une grande expérience du travail en équipe. Il coordonne au sein de son organisation une équipe de quinze experts et douze travailleurs sous contrat.

Dr Ngnikam est auteur de plusieurs publications scientifiques sur le sujet et a participé à la réalisation de trois ouvrages collectifs. Il est co – auteur de l'ouvrage « L'eau au Cameroun » avec H.B Djeuda et É. Tanawa. Dr Ngnikam et Émile Tanawa ont conduit plusieurs projets de recherche action dans le domaine de gestion des déchets, de l'assainissement et de l'accès à l'eau potable dans les centres urbains et ruraux du Cameroun qui ont permis de publier plusieurs articles et communications dans les colloques nationaux et internationaux.

Émile Tanawa est professeur des universités et directeur régional de l'Agence universitaire de la Francophonie pour la Caraïbe depuis septembre 2004. Il est docteur en aménagement et techniques urbaines de l'INSA de Lyon en France, Il a conduit et encadré plusieurs travaux de recherche, plusieurs projets d'aménagement en rapport avec la gestion des déchets. Il a été pendant plusieurs années expert auprès de quelques organisations nationales internationales (PNUD, PDM, FEICOM, ONUHabitat, etc.) sur les questions urbaines. Il a coordonné une équipe de sept experts chargés d'élaborer la stratégie de lutte contre la pauvreté en milieu urbain au Cameroun. Son expérience et son savoir faire ont été mis à profit pour développer des alternatives en terme d'assainissement et d'accès à l'eau potable en milieu urbain. Émile Tanawa cumule vingt années d'expérience de recherche et de travaux dans le domaine de l'aménagement et de la gestion urbaine. Avec Emmanuel Ngnikam et d'autres collègues il a créé le « Laboratoire environnement et sciences de l'eau de l'École nationale supérieure polytechnique (ENSP) de l'Université de Yaoundé I au Cameroun ».

PRÉFACE

En 1992, l'ENSP mettait en place un enseignement et des recherches appliquées sur la gestion et le traitement des déchets urbains. Le chef traditionnel du quartier de Melen 2 à Yaoundé avait accueilli avec empressement deux élèves ingénieurs de l'établissement qui voulaient réaliser leur mémoire de fin d'études sur cette question dans le quartier dont il avait la charge. C'était aussi le quartier de ces deux étudiants qui, pour accéder à leurs chambres, devaient, surtout en saison pluvieuse, patauger dans un marigot plus ou moins rempli d'ordures ménagères (OM). En effet, le ruisseau où la population se débarrassait de ses déchets quand il pleuvait débordait régulièrement de son lit : matières plastiques, papiers et cartons, épiluchures diverses se répandaient alors dans le bas-fond et dans les jardinets...

Cette description n'a malheureusement pas perdu de son actualité dans beaucoup de quartiers africains actuels! Les deux mémoires de fin d'études ont été soutenus : en plus des aspects théoriques, ils comportaient des réalisations très concrètes comme la mise en place d'une unité de compostage. Ces deux étudiants ont d'abord sensibilisé les habitants aux questions d'hygiène et d'environnement pour que ceux-ci prennent l'habitude de mettre leurs ordures dans des demi-fûts répartis dans le quartier, ou dans des sacs plastiques qu'ils portaient à l'unité de compostage. Les deux jeunes, après avoir obtenu leur diplôme d'ingénieurs polytechniciens, ont poursuivi dans cette discipline qui n'est toujours pas jugée très noble par certains (mais le grand Pasteur n'a-t-il pas travaillé lui aussi sur les déchets au début de sa brillante carrière?). Les deux ingénieurs sont maintenant... docteurs et on peut les classer parmi les meilleurs spécialistes de l'Afrique subsaharienne dans le domaine du traitement des déchets et des eaux. L'un d'eux est un des auteurs de ce livre.

Leur démarche pendant les dix années du doctorat n'a pas consisté à rester enfermé dans leur bureau ou leur laboratoire; ils ont travaillé avec beaucoup de partenaires très divers : les pouvoirs publics, les communautés urbaines de Yaoundé et de Douala, les populations des quartiers non structurés où les camions de ramassage ne pouvaient pas passer, les socié-

tés privées en charge du ramassage et du traitement des OM, des ONG et des associations de jeunes et de femmes, des experts venant d'autres disciplines (sociologie, économie, hydrologie) et aussi d'autres pays comme l'Espagne, la France et des pays africains ; tout cela, vous pourrez le constater à la lecture de ce livre. Si la gestion des déchets ménagers s'améliore dans quelques villes d'Afrique centrale et semble un peu mieux maîtrisée au moins dans l'une d'elles, on le doit en grande partie à leur démarche de recherche appliquée pluridisciplinaire. Celle-ci est en effet indispensable pour adapter et rendre opérationnelles les actions dans ce domaine. Ce qui a « marché » pour une ville dans un pays donné n'est souvent pas applicable à une autre ville du même pays. Par exemple, l'incinération des ordures ménagères est une technique éprouvée et très répandue dans les pays occidentaux. Bien que d'un coût élevé, cette technique a souvent été proposée dans les grandes villes sous climat équatorial ou tropical, où pourtant la saison des pluies rend impossible la combustion des déchets urbains pendant plus de six mois par an. Heureusement, une opposition très claire à ce type de projet... mercantile s'est manifestée au Cameroun ; il n'en a pas été de même pour des villes chinoises notamment qui, face à des urgences, ont fait cet investissement qui n'a pu être utilisé correctement par la suite. Il faut être conscients du fait qu'on n'a pas le droit à l'erreur, car les quantités de matière en jeu sont « monumentales », de l'ordre de 1 000 tonnes par jour pour une ville d'environ un million d'habitants, et donc les investissements sont aussi très élevés.

Examinons rapidement, avec le professeur que je suis, quelques étapes de la filière de gestion des OM et l'importance des questions environnementales liées à cette question :

- la première étape est de réaliser correctement la collecte des déchets avec un taux de récupération satisfaisant : il doit absolument dépasser 50 % si l'on veut sauvegarder l'hygiène de la ville. Ce livre propose pas mal d'actions possibles dans ce domaine.

- l'étape suivante consiste à les transporter sur le site de traitements ; on emploie le pluriel car plusieurs traitements sont possibles : l'incinération et le compostage ont déjà été évoqués mais le traitement le moins cher est appelé « la mise en décharge ». Pour une municipalité ou un exploitant, il est assez aisé de trouver une ancienne carrière ou un petit vallon non habité et non cultivé pour y entasser des OM, sans se soucier des jus qui vont s'écouler en bas de la « montagne de déchets », ni des gaz de fermentation qui vont s'échapper, ni des multiples catégories d'animaux qui vont venir divaguer (rongeurs, chiens, oiseaux, etc.). Ce site ainsi décrit est qualifié de « décharge sauvage » ! L'ensemble des acteurs du secteur « déchets » et les pouvoirs publics ont donc décidé d'agir plus rationnellement en créant des

« centres d'enfouissement techniques », qu'il a été obligatoire de déclarer au même titre qu'une entreprise industrielle pour avoir le droit de l'exploiter. La plupart des pays africains en sont là de la réglementation : elle ne donne pas de normes et les contraintes d'analyse sont faibles. Nous en arrivons à l'appellation actuelle « Centre de stockage des déchets » (CSD), où une bonne dizaine de paramètres doivent être mesurés à intervalles de temps réguliers : c'est le cas de la décharge de Nkolfoulou, à côté de Yaoundé, où le suivi de 14 paramètres vient de commencer.

Pourquoi tant de mesures ? Dans ces centres de stockage des déchets, les jus liquides (« les lixiviats ») doivent non seulement être analysés mais subir un traitement pour éviter qu'ils ne polluent les cours d'eau et les nappes d'eau souterraines. Quant aux gaz de fermentation, ils contiennent du gaz carbonique et du méthane : ce dernier engendre souvent des incendies et l'on a même vu des décharges exploser à cause de lui. Il doit donc être brûlé ou récupéré car de plus il contribue de façon importante à « l'effet de serre ». C'est le réchauffement de notre planète qui est en cause et donc notre avenir à tous.

Il s'agit donc dans ce domaine des déchets, comme dans beaucoup d'autres actuellement, de travailler dans une perspective de développement durable. Pour les pays africains et la plupart des pays du Sud, c'est d'abord le développement qu'il est urgent de promouvoir en maîtrisant de mieux en mieux l'indispensable technologie aussi bien dans l'agriculture, que dans l'enseignement, la santé, l'artisanat et l'industrie, le commerce, les transports... Mais toute activité humaine génère des nuisances ou des déchets : pour pouvoir garder le pays et la planète habitables par nos petits-enfants et les générations futures, il est essentiel d'éviter les pollutions et de préserver « l'environnement ». C'est cette prise de conscience, un peu tardive, qu'ont fait beaucoup de pays occidentaux après avoir produit d'immenses dégâts écologiques : il faut à tout prix éviter ces catastrophes aux pays africains.

La tendance observée en Afrique et dans les pays du Sud, ces dernières années, montre qu'on se mobilise davantage sur la « lutte contre la pauvreté » et donc sur les revenus économiques de la population, dont une bonne partie vit avec environ 1 € par jour et par habitant. C'est la variété des situations vécues dans les différents continents et pays qui fera que les opinions publiques se mobiliseront préférentiellement sur un aspect ou sur un autre. Mais l'essentiel est de travailler ensemble au niveau national et international au développement durable de chaque pays. Retenons que tous les aspects sont importants à prendre en compte : l'environnement pour pouvoir disposer notamment d'une eau et d'un air propres, l'économie pour faire acquérir un niveau de vie correct à l'ensemble de

la population, la gouvernance et la participation active des citoyens dans l'organisation sociale et culturelle... mais aussi dans l'élimination et les traitements de leurs déchets.

Vous trouverez dans ce livre les amorces de cette démarche globale : elle a commencé depuis plus de dix ans à Yaoundé, mais elle est indispensable pour continuer à progresser. Je me plais à souligner la grande quantité de travail qui a été effectuée sur le terrain et dans les quartiers par l'équipe des deux rédacteurs, et ceci en concertation avec les populations. Toutes ces données et toutes ces observations seront utiles dans beaucoup d'autres villes et d'autres pays d'autant plus que la rigueur scientifique est présente à chaque page.

Pr. Paul Vermande

*Professeur émérite à l'INSA de Lyon,
ancien directeur de l'École nationale supérieure
polytechnique (ENSP) de Yaoundé
12 septembre 2005*

INTRODUCTION GÉNÉRALE

PLUS DE QUARANTE ANS APRÈS LES INDÉPENDANCES AFRICAINES, les villes, les institutions, et les États n'ont pas trouvé les solutions appropriées pour collecter, traiter ou éliminer convenablement les déchets solides ménagers (DSM) en milieu urbain en Afrique et dans beaucoup de pays du Sud. Différentes approches ont été préconisées et expérimentées sans qu'elles aient produit les effets escomptés.

À première vue, la gestion des DSM apparaît assez simple, et beaucoup pensent donc avoir trouvé la solution. En réalité, la question des déchets solides est beaucoup plus complexe car les responsables politiques, les chercheurs et experts, les techniciens municipaux et opérateurs privés en charge de cette question n'ont pas toujours trouvé une solution satisfaisante pour la majorité de la population; d'après ces différents acteurs, le manque de ressources financières est la raison principale de cet échec.

Contrairement à cette idée très répandue selon laquelle la gestion des déchets solides ménagers (DSM) dans les villes africaines est une question financière, on est amené, au regard des nombreux investissements faits dans ce secteur ces dernières années, à reconnaître que la question des DSM en Afrique est beaucoup moins un problème financier qu'une question d'organisation ou plutôt de management. C'est le défaut d'une utilisation optimale des potentialités locales, dans un cadre participatif transparent, qui justifie le faible rendement des approches et des pratiques qui ont déjà été expérimentées.

La majorité des villes d'Afrique au sud du Sahara connaissent une forte croissance démographique et spatiale qui conduit à la complexification de la gestion des déchets solides ménagers.

Cette croissance physique n'est pas accompagnée d'une croissance équilibrée des flux économiques et financiers.

La salubrité des villes africaines interpelle la conscience de tous ceux qui, à divers niveaux et à différents titres, ont en charge le devenir de ces cités, c'est-à-dire en définitive des citoyens. Selon que l'on est producteur ou gestionnaire, contribuable ou usager de service, les attentes sont dif-

férentes et parfois inconciliables dans les contextes des villes à croissance démographique et spatiale non maîtrisée.

Les grandes villes africaines en général, et camerounaises en particulier, montrent au visiteur des réalités décevantes comme :

- un développement urbain tentaculaire qui engendre des quartiers entiers exclus des services de base tels que l'approvisionnement en eau potable, l'assainissement et la collecte des ordures ménagères ;
- un paysage urbain marqué par des amoncellements de détritiques et souvent un cadre de vie insalubre.

Face à l'ampleur de ce phénomène, les municipalités gestionnaires sont débordées : de Dakar à Yaoundé, en passant par Conakry, Abidjan, Accra et Douala, le taux de collecte des déchets solides urbains (c'est-à-dire le rapport entre la quantité enlevée et celle qui est produite) ne dépasse pas 60 %, avec une moyenne située entre 30 et 40 % de la production [Tha Thu Thuy, 1998]. Le service est alors concentré dans le centre-ville, excluant d'office les quartiers sous-structurés et les zones périurbaines. À Yaoundé, par exemple, on a enregistré un taux de collecte en dessous de 15 % entre 1991 et 1998. Des efforts sont faits pour résoudre le problème dans les grandes capitales avec les subventions de l'État, mais les petites communes ne bénéficient d'aucun encadrement ni technique ni financier.

La majorité des populations et des responsables municipaux se demandent ce qu'il faut faire et comment le faire. Il ressort des analyses et des travaux déjà effectués que les problèmes liés à la gestion des déchets dans les grandes villes africaines sont multiformes :

- Institutionnel : le cadre réglementaire est inexistant ou obsolète vis-à-vis des besoins. On observe une multiplicité des acteurs institutionnels qui entraîne des conflits de compétence et d'intervention. Les services centraux des ministères détiennent souvent l'essentiel des moyens financiers et humains, alors que les responsables des communes doivent gérer le quotidien. Tout ceci entraîne des pertes de temps dans les prises de décision et le rejet mutuel de la responsabilité du dysfonctionnement.

- Financier : la pratique majoritaire, reconnue par les pouvoirs publics, est la perception d'une taxe d'enlèvement des ordures ménagères et le financement de la gestion des déchets par le budget municipal. Or, cette taxe est d'un rendement fiscal faible (moins de 10 % des besoins dans le cas de Yaoundé). En conséquence, les municipalités n'ont pas les moyens financiers¹ de rendre le service auquel les populations pensent avoir droit.

1 Il faut noter que les communes africaines disposent en moyenne de 2 000 à 3 000 FCFA (3 à 4,5 €) par habitant et par an, les villes les plus importantes, comme Abidjan et Douala, d'environ 10 000 FCFA/habitant/an. La moyenne à Yaoundé est de 3 800 FCFA par habitant et par an.

Le principe « pollueur payeur », même s'il est évoqué lors de certaines réunions d'experts, est loin d'être admis et il est rarement traduit dans un texte réglementaire adéquat.

- Administratif et politique : la gestion municipale est soumise à la décentralisation en cours dans tous les pays africains. Des textes importants sont en préparation concernant l'administration locale² : création de nouvelles entités décentralisées, transfert progressif de compétences du pouvoir central vers les administrations locales. Dans ce contexte, la protection de l'environnement local, et plus particulièrement de la salubrité publique, est une des premières missions reconnues aux élus locaux. Cependant, le cadre permettant de remplir ces missions est rarement explicite. Les moyens humains et financiers tardent à être transférés. Tout ceci fait que, face à leurs responsabilités en matière de gestion des déchets, les maires sont démunis sur le plan technique autant que financier.

- Technique : il y a une absence totale de normes locales en la matière ; les attentes des usagers par rapport aux déchets sont variables :

- Pour les producteurs (les ménages, les entreprises et les industriels), il s'agit de se débarrasser des ordures ménagères et des déchets divers, de les éloigner le plus possible des domiciles et du lieu de travail pour éviter les nuisances,

- Pour les gestionnaires (les collectivités locales), la préoccupation est d'abord d'assurer la propreté des espaces publics, dans le double souci de l'esthétique urbaine et de l'hygiène publique,

- Enfin, les habitants des quartiers ou des villages accueillant les décharges sont de moins en moins tolérants à l'implantation d'une unité de traitements des ordures ménagères dans leur localité. Pour les unités déjà existantes, les riverains sont de plus en plus exigeants sur les traitements à apporter aux déchets en vue de minimiser leurs impacts sur le milieu environnant.

Ce livre est le résultat de dix années de recherche appliquée et d'expériences de terrain effectuées par les auteurs : il souhaite contribuer à relever l'un des défis majeurs, qui est de pouvoir intégrer les différentes attentes exprimées par les acteurs ci-dessus au sein d'un système global de gestion cohérent et pérenne.

Un système de gestion des déchets pour être global doit intégrer toutes les étapes du cycle de vie du déchet, à savoir : la production, la collecte, le transport, le traitement et l'élimination, qui dans ce contexte se résument

2 Au Cameroun par exemple, la nouvelle Constitution de 1996 a créé des collectivités territoriales décentralisées (région, communes) qui devraient jouir d'une grande autonomie de gestion. Le cadre général de fonctionnement de ces nouvelles structures décentralisées a été confié à la Commission nationale de bonne gouvernance qui a remis son rapport au Premier ministre en août 1999.

seulement à la mise en décharge. Pour ce faire, il est nécessaire de disposer d'une connaissance quantifiée, globale, mais aussi différenciée (par catégorie de producteur de déchets, par catégorie spatiale ou socio-économique) concernant les flux physiques et les flux financiers, concernant aussi le cheminement des déchets, de la production à l'élimination, en passant par les traitements et les valorisations.

Chapitre 1

LES FILIÈRES DE TRAITEMENT DES DÉCHETS ET LEUR APPLICATION À LA GESTION DES ORDURES MÉNAGÈRES

AVEC L'ÉVOLUTION ACTUELLE DE LA SOCIÉTÉ DE CONSOMMATION, les produits et les déchets qui résultent de leur utilisation deviennent de plus en plus complexes, de par leur nature et leur composition chimique. Outre cette modification de la structure de la matière composant le déchet, la quantité produite ne fait qu'augmenter à cause de l'accroissement constant de la population et aussi de la modification des habitudes de consommation. Ainsi, en France par exemple, on a enregistré une augmentation moyenne de la production spécifique des ordures ménagères de 0,2 % par an entre 1960 et 1990 [Bertoloni *et al.*, 1996]. Cette augmentation serait beaucoup plus importante pour les déchets industriels. Dans les villes des pays en voie de développement, l'évolution démographique est très élevée et serait le principal facteur d'évolution du flux de déchets.

En plus de cette évolution quantitative, la composition des déchets est hétérogène et évolutive dans le temps et dans l'espace. Ce caractère hétérogène rend difficile la caractérisation moyenne du flux de déchets et la génération d'un choix de filières de traitements à tous les déchets dans un espace géographique important. Il faut alors à chaque fois, prendre en compte les particularités locales. Le caractère dispersé du déchet causé par la multiplicité des producteurs et surtout la probabilité d'y retrouver des substances réputées dangereuses pour l'environnement rendent le problème de choix d'une filière de traitement plus complexe.

Cette partie présente la définition des concepts utilisés dans cet ouvrage, les filières de traitements des déchets et particulièrement celles qui sont applicables au traitement des déchets ménagers, déchets ou banals.

DÉFINITION DES CONCEPTS

Les concepts qui seront le plus utilisés dans cet ouvrage et qui méritent être définis ici sont : le déchet, les déchets ultimes, la valorisation, le transfert de pollution, etc.

Définition du déchet

Sur le plan économique, le déchet est une matière ou un objet dont la valeur économique est nulle ou négative pour son détenteur, à un moment et dans un lieu donnés. Pour s'en débarrasser, le détenteur devrait payer quelqu'un ou le faire lui-même. Selon cette définition, un ballot de vieux papiers pour lequel un acquéreur paie un prix n'est pas un déchet, mais une matière première secondaire.

Sur le plan juridique, on distingue une conception subjective et une conception objective de la définition du déchet [Maystre *et al.*, 1995]. Selon la conception subjective, un bien ne peut devenir un déchet que si son propriétaire a la volonté de s'en débarrasser. Mais tant que ce bien n'a pas quitté la propriété privée vers l'espace public, le propriétaire peut à tout moment changer son avis d'abandonner le droit de propriété sur ce bien. Selon la conception objective par contre, un déchet est un bien dont la gestion doit être contrôlée au profit de la protection de la santé publique et de l'environnement, indépendamment de la volonté de son détenteur et de la valeur économique du bien. Les biens recyclables qui sont des matières premières secondaires entrent dans cette définition objective du déchet. C'est de cette conception que découlent les définitions réglementaires qui sont basées sur une liste d'objets ou de biens devant entrer dans chaque catégorie de déchets. Les définitions réglementaires diffèrent selon les pays.

Sur le plan environnemental, on englobe sous le terme « déchets » tous les déchets solides, liquides et gazeux.

Dans la stratégie de gestion des déchets, il faut considérer l'ensemble des déchets produits sur un territoire municipal. Le tableau n° 1 présente la typologie des déchets qu'on peut rencontrer sur un territoire municipal, cette typologie est inspirée de la définition de la loi du 15 juillet 1975 en France.

Tableau 1 : Typologie des déchets

Catégories de déchets	Sous-catégories	Description sommaire
Déchets ménagers	Déchets ménagers	Déchets produits par les ménages
	Ordures ménagères (OM)	Déchets de l'activité domestique des ménages pris en compte par la collecte régulière
	Encombrants des ménages	Déchets liés à une activité occasionnelle qui, en raison de leur volume et de leur poids, ne peuvent être pris en compte par la collecte régulière des ordures ménagères
	Déchets ménagers spéciaux (DMS)	Déchets présentant un ou plusieurs caractères dommageables pour l'environnement et/ou qui ne peuvent pas être éliminés par les mêmes voies que les ordures ménagères sans créer des risques lors de la collecte
Déchets de la collectivité	<i>Idem</i>	Déchets produits par les services de la collectivité
	Déchets du nettoyage	Déchets liés au nettoyage des rues, des marchés, des plages, ...
	Déchets des espaces verts	Déchets liés à l'entretien des espaces verts : tontes de gazon, tailles, élagages, feuilles mortes, etc.
	Déchets de l'assainissement	Déchets résultant du fonctionnement des dispositifs publics d'épuration et de l'entretien des réseaux d'évacuation des eaux usées, pluviales ou cours d'eau (boues, graisses, déchets de dégrillage, sables de curage, ...)
Déchets des artisans et commerçants, déchets banals des activités économiques et des administrations	<i>Idem</i>	Ces producteurs peuvent confier leurs déchets aux services communaux « à condition qu'ils n'entraînent pas, eu égard à leurs caractéristiques, de sujétions techniques particulières lors de leur élimination ». Les communes acceptent ainsi l'assimilation de ces déchets aux ordures ménagères du fait leur nature similaire
Déchets industriels	Déchets banals	Déchets assimilables, à travers leur nature (ou dangerosité), aux ordures ménagères. Dépassant les volumes et quantités limites fixées par la commune ou regroupement dans le contrat de collecte, leur élimination est alors à la charge du producteur
	Déchets spéciaux	Déchets dont la destination nécessite des précautions particulières vis-à-vis de la protection de l'environnement. Exemple : déchets d'activité de soins, produits phytosanitaires, déchets industriels spéciaux

Suivant ce tableau, les déchets sont classés selon leur provenance, leurs caractères de dangerosité ou d'encombrement et aussi par la méthode utilisée pour leur collecte et leur traitement communs.

Les déchets ultimes

Le déchet ultime est défini comme « un déchet résultant ou non du traitement d'un déchet qui n'est plus susceptible d'être traité dans es conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ». La notion de déchet ultime est évolutive. Elle dépend de l'état des techniques de traitement, des besoins économiques (un déchet considéré comme ultime peut s'avérer valorisable dans le futur) ou de la situation économique (les conditions économiques, géographiques peuvent empêcher ou retarder la mise en œuvre de nouvelles techniques permettant de rendre ultime un déchet).

La valorisation

On appelle valorisation d'un déchet toute action qui permet :

- d'en tirer de l'énergie (considérée comme bien, par extension);
- de trouver un nouvel usage à la matière qui le compose : par exemple fabrication de piquets à partir de films plastiques mélangés;
- de tirer une matière première secondaire utile à la fabrication du même bien : par exemple papier ou verre recyclés;
- de trouver un nouvel usage à l'objet, par exemple utilisation de traverses de voie ferrée pour construire une palissade;
- à un déchet de redevenir utile pour d'autres : brocantes et marchés aux puces fournissent de nombreux exemples de valorisation de déchets.

La valorisation est d'autant plus intéressante que ce qui est valorisé est noble. Le plus noble est la valeur culturelle d'un objet particulier; la valeur de l'objet en général est plus basse : la valeur de la matière dont est constitué l'objet est encore plus faible; enfin, la valeur la plus faible est celle de l'énergie contenue dans la matière dont est composé l'objet.

Cette hiérarchie est associée à une autre hiérarchie qui lui est inverse : la possibilité de vendre ce qui est retiré du déchet est d'autant plus problématique que la valeur en est élevée. Vendre de l'énergie ne pose aucun problème; la possibilité de vendre une matière première secondaire est davantage liée à la demande du secteur de production concerné; vendre des objets est encore moins facile; enfin, vendre un objet particulier peut exiger beaucoup de patience. La valorisation des déchets laisse pratiquement toujours un sous-produit qui est un nouveau déchet.

La récupération correspond à l'ensemble des opérations organisées en vue de la valorisation. Elle s'insère généralement dans une organisation existante dite traditionnelle. Ce schéma traditionnel avait jusqu'alors pour vocation unique d'assurer l'hygiène et la propreté en collectant et en acheminant les déchets au-delà du territoire. La récupération correspond à la suite d'extractions successives et sélectives jusqu'à l'obtention des flux ou matériaux dits ciblés, c'est-à-dire concernés par la valorisation matière. Ainsi, en plus des opérations de tri rendant possibles cette extraction, s'ajoutent des opérations de transport, de stockage, de transformation (conditionnement, broyage, compactage, etc.). Ces opérations se retrouvent à chacune des phases : chez l'utilisateur, aux ramassages des flux par le service de collecte, à un centre de tri ou de transfert, où les matériaux sont pris en charge par les récupérateurs jusqu'au centre de régénération.

La régénération confère aux matériaux extraits les propriétés nécessaires à leur utilisation en remplacement de biens classiques. La régénération correspond à des procédés en général physiques ou chimiques selon l'état du matériau récupéré et la filière de valorisation visée.

Notion de transferts de pollution

Le traitement des déchets entraîne, à cause du principe de la conservation de la matière, une dispersion des déchets issus du processus parmi les différents flux sortants gazeux, liquides, solides et matières valorisées. Cette transformation peut entraîner d'autres formes de pollution, différentes de celles que le système de traitement de déchets pourra maîtriser. Ces transferts de pollution en aval du traitement de déchets peuvent se manifester à deux niveaux :

- Local dès la sortie de l'unité de traitement par les effluents rejetés directement dans l'environnement ;
- De manière différée : des conséquences environnementales peuvent à leur tour apparaître à un moment donné du cycle du déchet valorisé ou lors de traitements ultérieurs. Par exemple, le recyclage du papier qui vise à économiser les matières premières entraîne par ailleurs la production de boues de désencrage toxiques et nécessite une forte consommation d'énergie.

PRÉSENTATION DES VINGT FILIÈRES DE TRAITEMENTS DES DÉCHETS

Quelle que soit la nature du déchet, il peut être traité à travers une ou plusieurs des vingt filières de traitement répertoriées par Navarro (1992). Ces filières visent six grands objectifs :

- La valorisation énergétique, qui vise à tirer profit du contenu énergétique du déchet;
- La valorisation de matière première, dont l'objectif est d'utiliser le déchet comme produit de substitution à la matière première vierge;
- La valorisation en sciences des matériaux, dans laquelle le déchet est utilisé en remplacement du matériau vierge;
- La valorisation en agriculture, ici le déchet est utilisé comme matière de base pour la fabrication des amendements organiques ou minéraux, ou pour l'alimentation animale;
- La valorisation en sciences de l'environnement : dans ces filières, le déchet est utilisé comme sous-produit soit pour l'épuration d'autres déchets, soit pour leur conditionnement;
- Les traitements de dépollution : il s'agit ici des traitements qui visent à limiter l'impact du déchet dans son milieu récepteur.

Tableau 2 : Filières de traitement des déchets [Navarro, 1992]

Objectifs	Numéro	Filière de traitement
Valorisation énergétique	1	Combustion (avec valorisation de la chaleur produite)
	2	Élaboration de combustibles dérivés par des procédés mécaniques (broyage, tri, séchage, etc.)
	3	Élaboration de combustibles dérivés par des procédés thermiques (pyrolyse, gazéification, etc.)
	4	Élaboration de combustibles dérivés par des procédés biologiques (méthanisation, fermentation alcoolique)
Valorisation matière première	5	Matières premières organiques (naturelles et de synthèse)
	6	Matières premières minérales métalliques et non métalliques
	7	Liants hydrauliques et matériaux de structure
Valorisation en sciences des matériaux	8	Verre et céramique
	9	Matières plastiques et caoutchouc
	10	Fibres cellulosiques de récupération
	11	Autres matériaux
Valorisation en agriculture	12	Élaboration d'amendements organiques
	13	Élaboration d'amendements minéraux
	14	Alimentation animale

Valorisation en technique de l'environnement	15	Épuration des effluents liquides et gazeux
	16	Conditionnement de déchets toxiques par d'autres déchets
Traitement de dépollution	17	Incinération et autres procédés thermiques
	18	Traitement biologique (de dépollution)
	19	Traitement physico-chimique et chimique : neutralisation, solidification, oxydation, etc.
	20	Stockage (sur un site d'enfouissement technique)

À partir de cette présentation, on peut classer les filières de traitement de déchets en deux grands groupes :

- Les filières de valorisation (1 à 16) dont l'objectif est d'exploiter le contenu matière et/ou énergie du déchet ;
- Les filières d'élimination ou de dépollution (16 à 20).

Description des filières de valorisation

La valorisation constitue la seule stratégie permettant d'accéder, par le maintien de l'équilibre du cycle de la matière, à une gestion globale de la matière. En effet, cette nouvelle utilisation de la matière retarde le retour ultime de celle-ci vers le milieu naturel, et évite ainsi la génération d'un cycle de matière. Cette valorisation contribuerait alors globalement à réduire le volume de déchet abandonné dans le milieu naturel, les rejets gazeux et liquides et la consommation de matières premières. On parle alors de bénéfice environnemental.

La valorisation ne peut être considérée comme une stratégie unique, mais plutôt comme faisant partie intégrante du traitement global. En effet, une valorisation infinie est utopique du fait même de la dégradation de la matière au fil de son utilisation. Par ailleurs, la valorisation s'adresse uniquement à la fraction utile bien particulière du déchet ; cette fraction utile ne constitue généralement pas la majorité du gisement, la fraction non valorisable reste alors à traiter. La valorisation doit donc être menée judicieusement et être intégrée au sein de la chaîne de traitement de déchets. C'est pour cela que la valorisation et les traitements de dépollution par exemple ne doivent pas être opposés mais se compléter dans le traitement global de la chaîne, on parle ainsi de la gestion intégrée des déchets.

Le tableau n° 2 présente cinq familles de valorisation, chacune de ces familles exploite :

- Soit les potentialités énergétiques du déchet. Le combustible dont on a besoin peut être extrait après une combustion, ou après que le déchet ait subi d'autres traitements intermédiaires par les procédés mécaniques, thermiques ou biologiques. Ce potentiel énergétique peut s'apprécier à

partir du caractère combustible de la matière (pouvoir calorifique) ou de son caractère fermentescible.

➤ Soit les potentialités matières du déchet. L'ensemble des filières exploitant ces potentialités sont souvent qualifiées de valorisation matière. Il regroupe ainsi les filières de valorisation matières premières (5 à 7), les filières de valorisation en sciences des matériaux (8 à 11), les filières de valorisation en agriculture et agroalimentaire (12 à 14), les filières de valorisation en techniques de l'environnement (15, 16).

Les filières de traitement

Le traitement de dépollution doit permettre de rendre éco-compatible des composés chimiques issus des activités humaines avec le milieu naturel, en réduisant le flux sortant vers le milieu extérieur et en stabilisant convenablement la structure moléculaire des substances composant le déchet. Ce traitement devrait normalement permettre à ces composés de se confondre sans conséquences environnementales avec les composés du milieu récepteur.

La mise en décharge (filière 20) est sans doute le procédé le moins coûteux qui existe pour se débarrasser des ordures ménagères. Il faut souligner que seule la mise en décharge prend en compte la totalité des déchets. Les autres filières doivent donc être considérées comme des éléments d'une chaîne de traitements.

Éléments de choix d'un procédé de traitement

Les analyses ci-dessus montrent que les possibilités de traitement sont nombreuses. La construction d'une chaîne de traitements passe par une combinaison des différentes filières et opérations en se posant systématiquement la question de la valorisation et du traitement jusqu'à l'obtention du déchet ultime. La figure n° 1 présente les étapes de choix d'une chaîne de traitement de déchets.

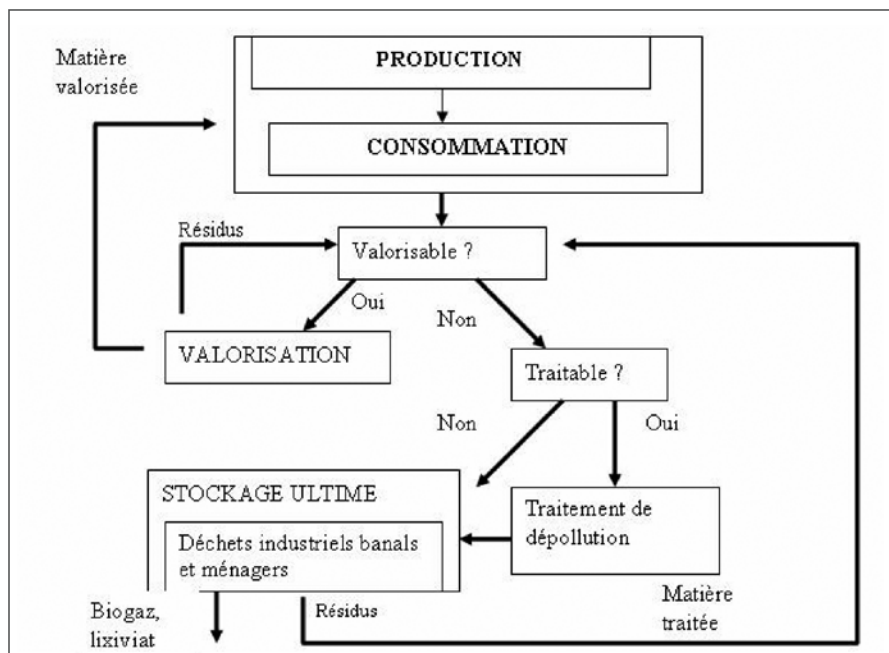


Figure 1 : Organigramme de choix de procédés de traitement des déchets

FILIÈRES DE TRAITEMENT APPLICABLE À LA GESTION DES ORDURES MÉNAGÈRES

Il s’agit ici de voir, à travers 20 filières de traitement des déchets présentées dans le tableau n° 2, celles qui sont applicables aux ordures ménagères. Pour ce faire, il est important de rappeler les principales caractéristiques des ordures ménagères.

Caractéristiques des ordures ménagères

On caractérise les ordures ménagères par un certain nombre de paramètres dont quatre sont essentiels pour le choix d’un mode de gestion. Ces paramètres sont sujets à diverses variations qui sont : la densité, l’humidité, le pouvoir calorifique et le rapport carbone/azote.

La densité

Cette valeur n’a de sens que si l’on définit les conditions dans lesquelles on la détermine. En poubelle sans tassement, la densité est compri-

se entre 0,1 et 0,3 en France [AGHTM, 1988], tandis que, dans les zones équatoriales humides, on peut dépasser une valeur de 0,4 en pleine saison des pluies. La connaissance de la densité est essentielle pour le choix de moyen de collecte des ordures et aussi pour leur traitement.

L'humidité

C'est un paramètre important qui a une influence notable sur le pouvoir calorifique et la décomposition des matières fermentescibles. Il est variable suivant la nature des ordures, le lieu de production, les saisons et suivant les conditions sociales du producteur. En Europe, le taux d'humidité des ordures oscille entre 35 et 45 %, avec un maximum en été et un minimum en hiver. En milieu tropical humide par contre, le taux d'humidité tourne autour de 65 % avec un minimum situé à plus de 50 % en saison sèche [Gillet, 1985; Ngnikam *et al.*, 1998].

Le pouvoir calorifique

On utilise généralement le pouvoir calorifique inférieur (PCI) qui se définit en supposant que toute l'eau du combustible de combustion est sous forme vapeur au stade final. En règle générale, plus la teneur en eau est élevée, plus le PCI est faible. Lorsque les ordures ménagères contiennent plus de 50 % d'humidité, elles sont impropres à l'incinération. Les valeurs généralement admises pour les ordures des pays tempérés sont comprises entre 1 400 et 1 800 thermies par tonne.

Le rapport carbone/azote

Le rapport carbone/azote est un paramètre qui permet d'apprécier l'aptitude des ordures à la biodégradation. Ce paramètre permet aussi, dans le cas du compostage, de mesurer le degré de maturité de compost. Dans les ordures ménagères fraîches, ce rapport se situe généralement entre 20 et 35 [Gillet, 1985].

En dehors de ces quatre principaux paramètres, on peut aussi ajouter un autre facteur caractéristique du déchet, qui est sa composition. De prime abord, il faut dire que ce paramètre évolue beaucoup et la définition des différentes fractions dépend des objectifs poursuivis par l'homme d'étude.

Mais on peut regrouper les constituants des ordures ménagères en trois fractions principales :

- Les matières organiques fermentescibles ;
- Les inertes (verres, métaux, gravats, etc.) ;
- Les combustibles (papiers, plastiques, textiles, bois, etc.).

Suivant les régions et les saisons, l'importance relative de chacune des trois fractions ci-dessus peut beaucoup varier (tableau n° 3).

Tableau 3 : Composition (en trois grandes classes) des ordures ménagères de quelques villes sous différents tropiques

[Ngnikam et al., 1998; Tha Thu Thuy, 1998; Rajaomanana, 1996; Gillet, 1985]

Villes	Fraction fermentescible	Fraction inerte (verre, métaux, etc.)	Fraction combustible	Autres (fines, etc.)	Total
Moyenne 14 villes algériennes	77,3 %	5,4 %	15,7 %	1,6 %	100 %
Antanarivo (Madagascar)	15 %	5,9 %	11,4 %	67,7 %	100 %
Douala (Cameroun)	78,7 %	9 %	11 %	1,3 %	100 %
Garoua (Cameroun)	42,8 %	3,6 %	11,2 %	41,9 %	100 %
Dakar (Sénégal)	41 %	5 %	19 %	26 %	100 %
France	25 %	18 %	42 %	15 %	100 %

À ces trois fractions principales peut s'ajouter une quatrième fraction, en très faible pourcentage, mais plus nocive pour l'environnement. Ce sont des métaux lourds et d'autres produits toxiques en quantités dispersées (plomb, mercure, médicaments, solvants, produits phytosanitaires, etc.).

Application des filières de traitement à la gestion des ordures ménagères

Au regard des principaux paramètres caractéristiques définis ci-dessus, on peut dire que treize des vingt filières présentées au tableau n° 2 peuvent être appliquées à des degrés plus ou moins variés au traitement des ordures ménagères suivant l'importance de l'une des trois grandes fractions (tableau n° 4).

Tableau 4 : Application des filières de traitement sur la gestion des ordures ménagères

N°	Filière de traitement	Fractions concernées			Niveau d'évolution technique
		Matières organiques fermentescibles	Inertes (métaux, verre...)	Combustibles (plastiques, textiles, papiers, etc.)	
1	Combustion	oui	non	oui	Procédé déjà éprouvé à l'échelle industrielle
2	Combustibles dérivés (procédés mécaniques)	oui	non	oui	Procédés techniquement élaborés, mais non encore éprouvés
3	Combustibles dérivés (procédés thermiques)	oui	non	oui	Procédé existant seulement à l'échelle pilote ³
4	Combustibles dérivés (procédés biologiques)	oui	non	non	Procédé déjà éprouvé à l'échelle industrielle
5	Matières premières organiques	oui	non	oui	Filière faisant objet de recherche expérimentale
6	Matières premières minérales	non	oui	non	Procédé déjà éprouvé à l'échelle industrielle
7	Liants hydrauliques et matériaux de structure	non	non	non	Filière faisant objet de recherche à caractère expérimental
8	Verre et céramique	non	oui	non	Procédé déjà éprouvé à l'échelle industrielle
9	Matières plastiques et caoutchouc	non	non	oui	Procédé déjà éprouvé à l'échelle industrielle ⁴
10	Fibres cellulosiques de récupération	non	non	oui	Procédé déjà éprouvé à l'échelle industrielle
11	Autres matériaux	non	non	non	Filière faisant objet de recherche expérimentale
12	Amendements organiques	oui	non	non	Procédé déjà éprouvé à l'échelle industrielle
13	Amendements minéraux	non	non	non	Procédé développé à une échelle pilote
14	Alimentation animale	oui	non	non	Procédé développé à une échelle pilote
15	Épuration des effluents liquides et gazeux	non	non	non	Filière faisant objet de recherche expérimentale

.../...

3 NAVARRO et REVIN, 1989, signalent l'existence d'une unité de taille industrielle qui n'a pas donné de résultats satisfaisants.

4 Mais le procédé bute aux contraintes de collecte et surtout de tri des plastiques.

16	Conditionnement de déchets toxiques	non	oui	non	Procédé techniquement éprouvé, mais le champ d'application est très réduit
17	Incinération et autres procédés thermiques	oui	non	oui	Procédé déjà éprouvé à l'échelle industrielle
18	Traitement biologique (de dépollution)	non	non	non	Procédé déjà à l'échelle industrielle, mais champ d'application réduit
19	Traitements physico- chimiques	non	non	non	Procédé déjà éprouvé, mais le champ d'application est très réduit
20	Mise en décharge	oui	oui	oui	Procédé déjà éprouvé à l'échelle industrielle

Seulement neuf des vingt filières de traitement des déchets sont à l'heure actuelle éprouvées à l'échelle industrielle, c'est-à-dire qu'il existe dans le monde des unités industrielles traitant les ordures ménagères suivant ce procédé. Parmi ces filières, cinq sont applicables pour le traitement de la fraction fermentescible des ordures ménagères, cinq pour le traitement de la fraction combustible et quatre pour le traitement de la fraction inerte. Les filières déjà éprouvées et applicables au traitement de la fraction fermentescible des ordures ménagères sont :

- La combustion (incinération avec récupération de l'énergie) qui ne peut être appliquée que dans le cas où cette fraction a un faible taux d'humidité (moins de 40 %);
- L'élaboration des combustibles dérivés par le procédé biologique. Seule la méthanisation est appliquée à l'échelle industrielle et artisanale dans le cas des ordures ménagères. La fermentation alcoolique ne s'adressant qu'aux déchets fermentescibles riches en sucres;
- La fabrication des amendements organiques (compostage). Ce procédé est le plus sollicité et le plus ancien : il est utilisé pour le traitement de la fraction organique des ordures ménagères;
- L'incinération sans récupération d'énergie, qui doit dans ce cas permettre de réduire le volume des déchets pour augmenter la durée de vie de la décharge;
- La mise en décharge.

À cause de sa forte teneur en humidité, les ordures ménagères des zones tropicales humides sont moins aptes à l'incinération. Les trois filières de traitement devant être explorées sont alors le compostage, la méthanisation et la mise en décharge. L'examen détaillé de ces trois filières fait l'objet du chapitre suivant.

Présentation de la valorisation énergétique

D'un point de vue économique, la valorisation énergétique consiste à attribuer une valeur économique à l'énergie thermique libérée suite au traitement des déchets. D'un point de vue environnemental, la valorisation énergétique permet d'éviter les charges environnementales associées aux étapes d'extraction, de transformation, et de production de l'énergie équivalente qui serait produite par des filières classiques. En fonction des opportunités locales, la valorisation énergétique concerne différents débouchés :

- Vente directe de chaleur à des clients : industries utilisant de la chaleur, de la vapeur industrielle, hôpitaux, piscines ;
- Vente de chaleur à un réseau de chaleur pour assurer le chauffage ou l'eau chaude sanitaire ;
- Production et vente d'électricité en réseau ou aux clients isolés ;
- Production et vente de biocarburants (alcools, biogaz, etc.).

La récupération de la chaleur est constituée par une chaudière dans laquelle sont refroidies les fumées. Elle permet d'assurer le refroidissement indispensable pour le traitement des fumées lors de l'incinération des déchets. Ce refroidissement est assuré par un échange de chaleur entre les fumées et un fluide caloporteur :

- Eau surchauffée : elle permet l'alimentation du réseau de chaleur en eau surchauffée ou en eau chaude. Mais elle interdit la production d'électricité.
- Vapeur surchauffée ou saturée : elle permet d'alimenter un réseau de chaleur en vapeur, en eau chaude ou eau surchauffée et de produire de l'électricité par le biais d'une turbine contre-pression ou à condensation.

Ce fluide pour l'alimentation d'un réseau de chauffage alimente en vapeur les échangeurs des sous-stations du chauffage des immeubles. Ces échangeurs alimentent à leur tour en eau chaude basse pression d'une température de 90 à 100°C le circuit secondaire du chauffage des immeubles. Les pertes sont fonction de la longueur du réseau. La production de chaleur nécessite un réseau de chaleur de proximité. Cette contrainte peut alors se révéler un obstacle si l'installation n'est pas acceptée au préalable par les populations riveraines.

Pour une production d'électricité seule, la vapeur sert à entraîner une turbine à condensation qui produit ainsi de l'électricité par l'intermédiaire d'un alternateur. L'énergie de la vapeur qui sort de la turbine n'est plus utilisable, cette vapeur est condensée à l'air par le biais d'un aérocondenseur.

Pour la production mixte d'électricité et de chaleur (cogénération), on peut utiliser une turbine à contre-pression ou à condensation avec soutirage. La vapeur en sortie de chaudière a des caractéristiques en température et en pression supérieures aux conditions du réseau, elle peut être

détendue par une turbine à contre-pression ou prélevée dans une turbine à condensation à l'étage correspondant à la pression du réseau.

En résumé, la valorisation énergétique est ainsi soumise aux exigences plus ou moins fortes des débouchés, qui ne coïncident pas nécessairement avec la variabilité du déchet. Ainsi, parmi les différentes possibilités de valorisation, la cogénération apparaît comme une voie intéressante où 80 % de l'énergie primaire produite seraient valorisés contre 70 % pour la production de chaleur seule et 30 % pour la production d'électricité seule.

En ce qui concerne l'élaboration de combustibles par les procédés mécaniques, il s'agit d'extraire les fractions combustibles de déchets qui sont intéressantes pour la valorisation énergétique. Dans ce cas, on met en œuvre des procédés mécaniques ou physiques destinés à séparer la fraction intéressante du reste du déchet. On peut citer par exemple : le tri (des ordures ménagères), le broyage (pneumatique), le séchage, la filtration (solvants usées), etc.

Pour l'élaboration de combustibles dérivés par le procédé biologique, deux techniques sont utilisées : la méthanisation et la fermentation alcoolique.

La méthanisation s'applique, de préférence, à des déchets organiques très humides : déjections animales, effluents d'élevage, d'industries agroalimentaires et d'abattoirs, boues de stations d'épuration ou de fosses septiques. Dans le processus de méthanisation, seuls les micro-organismes anaérobies strictes ou facultatives interviennent. Le processus de méthanisation se réalise en quatre phases :

- Hydrolyse : cette étape, qui s'effectue à l'extérieur des cellules microbiennes, est souvent l'étape cinétiquement limitante ;
- L'acidocétose : cette étape conduit à la formation d'acides gras volatils (AGV), mais aussi d'alcools, de CO₂ et d'hydrogène. Cette étape, qui est plus rapide que la précédente, acidifie le milieu ;
- L'acétogénèse : dans cette étape, les bactéries concernées sont encore mal connues et ont des temps de génération longs (6 à 8 jours à 30°C). Ce groupe de bactéries est la charnière principale de l'équilibre des populations ;
- La méthanogénèse : les bactéries concernées sont des anaérobies strictes capables de n'utiliser qu'un nombre réduit de composés carbonés possédant un faible nombre d'atomes de carbone.

Plusieurs paramètres permettent le contrôle du processus de méthanisation :

- température optimale pour le développement des micro-organismes se situant entre 30° et 35°C ;
- le pH optimal est entre 6,5 et 8 ;

- la charge organique entrante : pour les déchets très fermentescibles, il faut éviter les surcharges qui risquent d'acidifier le milieu (production d'acides gras volatils);
- l'agitation : il faut éviter la production de croûtes et la décantation de particules denses. On utilise l'agitation mécanique, par agitation du milieu ou par injection de biogaz sous pression.

Le processus se déroule le plus souvent dans les digesteurs fermés de forme cylindrique. Le produit de ce traitement est le biogaz, mélange de gaz carbonique et de méthane qui est combustible. Ce gaz peut être brûlé ou utilisé comme combustible dans les moteurs après épuration de gaz indésirable comme le sulfure d'hydrogène (H_2S).

La fermentation alcoolique concerne les déchets à forte teneur en glucides (amidon, sucres libres). C'est le cas par exemple des résidus végétaux de l'industrie sucrière (mélasse). Les excédents céréaliers peuvent aussi constituer d'excellents substrats pour la fermentation alcoolique. Dans le cas des déchets ligneux, il faut un traitement préalable par hydrolyse alcaline pour éliminer la lignine.

La fermentation alcoolique se réalise en trois étapes :

1. L'hydrolyse : on réalise une hydrolyse enzymatique par macération dans les enzymes hydrolytiques (50 à 80°C en milieu acide). L'hydrolyse conduit à un sirop de sucre prêt à fermenter;
2. La fermentation : on opère en général en discontinu, dans un réacteur, avec inoculation d'une culture de levures. On opère à 30 - 40°C en veillant à ne pas dépasser le seuil d'inhibition de la fermentation par une concentration trop élevée en alcool;
3. La distillation : opération classique de récupération de l'alcool produit.

Le processus permet d'obtenir de l'alcool éthylique, valorisable comme carburant de substitution ou comme produit de base pour l'industrie chimique; il reste un résidu solide.

Présentation de la valorisation matière

Ce groupe recense deux grandes filières :

- les matières premières organiques naturelles et synthétiques;
- la matière première minérale.

Ces deux filières ont pour objectif de valoriser uniquement le contenu matière du déchet après un traitement physique, thermique, physico-chimique et biologique. Le débouché visé ici, c'est la réutilisation de tout ou d'une partie des déchets dans les industries chimiques ou agroalimen-

taires. Une large gamme de déchets peut être utilisée comme source de matière organique. Il s'agit :

Des déchets de la biomasse au sens large : déchets végétaux et animaux, résidus de sous-produits des industries agroalimentaires, déchets des industries des corps gras, de la papeterie. À titre d'exemple, les amidons peuvent servir de matières premières pour la fabrication d'adhésifs et de colles. Certains fabricants de plastiques incorporent de l'amidon et dérivés dans la production de matières plastiques. C'est le cas particulier de plastiques dits « biodégradables ».

Des déchets de la chimie organique : sous-produits de synthèse, solvants, huiles, plastiques, caoutchouc, etc. Par exemple, les « huiles de moteur » usagées peuvent être régénérées par traitement à l'acide sulfurique concentré suivi d'une filtration sur terre activité, ou par des traitements plus sophistiqués mettant notamment en œuvre des étapes d'ultrafiltration.

Présentation des filières de valorisation en sciences des matériaux

La valorisation des déchets en sciences des matériaux est un secteur important dans la mesure où les produits que l'on souhaite obtenir ne sont pas soumis à des critères de qualité trop rigoureux. Il faut noter que, même dans ce secteur, les exigences de qualité sont croissantes (verre, plastiques, liants...), ce qui a une influence sur la viabilité des stratégies de recyclage. Trois filières sont recensées dans ce groupe :

- Liants hydrauliques et matériaux de structure : cette filière n'est pas applicable aux ordures ménagères et ne sera pas développée;
- Verre et céramiques;
- Matières plastiques et caoutchouc;
- Fibres cellululosiques de récupération;
- Autres matériaux.

Verre et céramique

Le verre est fabriqué à partir de trois types de matériaux : les vitrifiants (silice) qui est la matière de base (71 à 73 % en masse), les fondants (13 à 15 %) dont le rôle consiste à diminuer la température de fusion, les stabilisants (13 à 15 %) qui augmentent la résistance chimique et la résistance à l'attaque par l'eau. La production d'une tonne de verre exige une consommation énergétique de 1 700 kWh. Le verre en tant que déchet, aussi bien à la production et qu'après l'utilisation par le consommateur, peut prendre quatre circuits différents :

- la mise en décharge;
- la consigne;
- le recyclage dans la filière verrière;

- les autres voies de recyclage : matériaux ou matière première pour diverses constructions.

Le bilan énergétique au niveau du procédé de fabrication de verre joue en faveur de la consigne. En effet, le verre consigné réalise 60 % d'économie sur l'ensemble du circuit énergétique alors que le recyclage du verre conduit à une économie de 12 % d'énergie seulement. Au plan financier, les opérations de collecte, de lavage et de transport annulent généralement le bénéfice réalisé sur le plan énergétique.

Le recyclage sous forme de calcin présente d'autres avantages, notamment : le rôle fondant du calcin permet de baisser la température de fusion de la silice nécessaire pour la production de verre vierge et entraîne une économie d'énergie de 18 % lorsque la quantité de calcin dans le mélange (calcin, silice) passe de 5 à 60 %. Au total, chaque tonne de calcin enfournée se traduit par une économie de 100 kg de fuel. Pour faciliter son traitement ultérieur, le verre collecté doit répondre aux spécificités suivantes [Navarro, 1992] :

- Pourcentage maximal de 5 % dans la tranche granulométrique inférieure à 10 mm et un maximum de 50 % dans la tranche supérieure à 40 mm ;
- Ne pas contenir plus de 2 % d'impuretés totales étrangères à l'emballage verre (dont plus de 0,5 % de matériaux infusibles) ;
- Ne pas contenir de gravillon de dimension inférieure à 6 mm.

Matières plastiques

En fonction des possibilités de valorisation, les matières plastiques peuvent être classées en deux grandes familles :

- Les polymères thermoplastiques qui sont fusibles, c'est cette classe de plastique qui est recyclable. Dans cette famille on retrouve : les thermoplastiques de grande diffusion (polyéthylène de basse et haute densité, chlorure de polyvinyle (PVC), polystyrène (PS), les thermoplastiques de spécialité (polyesters insaturés (UP), polycarbonates, polyuréthanes (PUR)) ;

- Les polymères thermodurcissables qui ne peuvent plus fondre, qui sont donc non recyclables.

La filière de recyclage peut se résumer à deux voies principales pour les thermoplastiques :

- La filière mono-matériau qui concerne les déchets constitués d'un seul type de plastique. Les produits régénérés sont le plus souvent mis sur le marché soit sous forme de granulés prêts à être transformés, soit sous formes de produits finis (tuyaux, sceaux, etc.) ;

- La filière multi-matériaux qui concerne les déchets de composition complexe. La difficulté réside ici dans l'obtention de produits à perfor-

mances acceptables; compte tenu des impuretés et surtout du fait que les plastiques sont incompatibles entre eux.

Si les déchets plastiques issus de l'industrie sont très convenablement recyclés à cause de la disponibilité du gisement, il n'en va pas de même des déchets ménagers où une très faible fraction de plastiques est recyclée.

En ce qui concerne les caoutchoucs, les pneus usagés constituent la principale source de déchets valorisables. Les méthodes de recyclage les plus développées sont :

- Le rechapage des pneus. Le rechapage est une source d'économie de matières premières (3 à 4 fois moins que pour un pneu neuf) et d'énergie (14 kg de pétrole par pneu);

- La réalisation de poudrette de caoutchouc qui est essentiellement obtenue par râpage des carcasses de pneus usagers ou par broyage de vieux pneus.

Il est présenté dans l'encadré n° 1 une expérience de recyclage de plastiques au Bénin. Mais il faut souligner que les activités de récupération et de vente des objets en plastiques aux industriels sont très fréquentes dans les villes de la région. Ces opérations sont généralement organisées par les PME ou les ONG. À Yaoundé, le projet « cité propre » organisé par le CIPRE, une ONG nationale, a pour objectif de récupérer les plastiques et de les vendre dans les entreprises à Douala.

Encadré n° 1 : Recyclage du déchet plastique à Cotonou : expérience de l'ONG DCAM Bethesda

Développement Communautaire et Assainissement du Milieu (DCAM) est une direction autonome de l'ONG Bethesda créé en 1990 par le Conseil interconfessionnel protestant du Bénin dans le quartier Sainte-Rita à Cotonou. Le premier projet conçu et mise en œuvre par le DCAM a été le projet PrAPE (Programme Assainissement et Protection de l'Environnement) financé par la coopération française en 1994. Le PrAPE s'est concentré sur le ramassage et le transport des ordures ménagères vers un site de traitement où les déchets étaient triés en plusieurs composantes, à savoir : les non biodégradables (ferrailles, verres, plastiques, os, etc.) et les matières biodégradables. Pendant que les biodégradables étaient transformés en compost, les non biodégradables étaient stockés sur le site de traitement. C'est pour trouver un débouché à ces matières stockées que l'ONG s'est penchée sur la filière de recyclage du plastique qui était la composante la plus nuisible en terme d'encombrement. Un centre de recyclage du plastique dénommé Agriplas a alors vu le jour en 2000 avec les activités suivantes :

- La récupération des déchets plastiques;
- Le recyclage proprement dit;
- La commercialisation des produits obtenus.

.../...

La récupération de plastique se fait dans les décharges à travers les récupérateurs indépendants, le réseau de collecte de plastique des associations de précollecte opérant dans la ville, la collecte domiciliaire organisée dans 410 concessions du quartier Sainte-Rita où un système de tri à la source est organisé. L’approvisionnement du centre emploie trois personnes à temps plein (un chargé d’approvisionnement, un conducteur de camion, un conducteur de tracteur).

La production consiste à la transformation des déchets plastiques en granulés suivant une technologie légère. Le centre dispose d’un broyeur pour traiter les plastiques rigides et d’un agglomérateur pour le traitement de plastiques souples. Le traitement du plastique suivant la méthode Agriplas s’effectue en cinq étapes quelle que soit la nature du plastique :

Étapes de traitement de plastique suivant la méthode Agriplas

Plastiques durs	Plastiques souples
Séparation de plastique par type et par couleur	Tri des sachets plastiques
Découpage manuel à l’aide de machette	Lavage des sachets pour enlever le sable
Broyage et obtention de copeaux de plastique	Séchage
Conditionnement : ensachage du plastique broyé	Passage à l’agglomérateur : découpage mécanique et solidification en granulé sous l’effet de chaleur
Commercialisation (70 à 100 FCFA/kg)	Conditionnement et commercialisation (70 à 100 FCFA/kg)

- Difficultés rencontrées : faible par rapport aux capacités de traitement du centre : l’approvisionnement n’est que de 3 tonnes par mois pour une capacité de traitement de 30 tonnes par mois;
- Difficultés de lavage des sachets et baisse de tension électrique freinant la production de granulés de plastique durs; prix de cession du granulé trop bas.

Les fibres cellulosiques de récupération

Les caractéristiques fondamentales du papier varient en fonction de l’origine des fibres (résineux, feuillus, fibres de récupération, etc.), de l’élaboration de sa pâte et des traitements complémentaires. Dans les pâtes recyclées de vieux papiers, les fibres sont simplement séparées par brassage en milieux aqueux. Une des opérations essentielles est celle du désencrage au cours duquel les pigments sont séparés par action de produits comme les savons, les détersifs et les dispersants, puis éliminés par lavage ou par flottation. Pour certains usages, la pâte doit subir une opération de blanchiment par le peroxyde d’hydrogène ou des produits à base de chlore.

Les vieux papiers ou fibres cellulosiques de récupération représentent la deuxième source de matière première pour la production de papier et

carton (44 % environ en France) [Navarro, 1992]. La récupération de papiers et cartons présente deux intérêts principaux :

- Économie sur l'élimination des déchets ;
- Économie sur les ressources naturelles au niveau des matières premières et de l'énergie. En effet, il est admis que la fabrication de papier recyclé requiert moins d'énergie (40 %) et moins d'eau (58 %) que celle des papiers vierges. Elle engendre moins de pollution de l'eau (35 %) et de l'air (74 %). Elle ne nécessite par ailleurs que 10 % des agents de blanchissement utilisés pour les papiers non recyclés [Navarro, 1992].

À partir de 100 tonnes de vieux papiers, on peut obtenir 90 tonnes de pâtes recyclées. Il faut toutefois signaler que le papier ne peut être recyclé un nombre illimité de fois car la résistance des fibres est atténuée à chaque cycle. Les filières de valorisation en agriculture et agroalimentaires sont développées dans le deuxième chapitre.

La mise en décharge des déchets

La mise en décharge est définie par certains auteurs comme « la réinsertion » dans le milieu naturel, et ce dans les meilleures conditions possibles, des déchets n'ayant pas fait l'objet d'autres traitements de valorisation ou d'élimination [Brula et al., 1995]. Mais la définition de la décharge comme un lieu où l'on peut déposer les décombres, les immondices, les déchets semblent plus adaptée au contexte des villes des pays en développement telles celles étudiées dans cet ouvrage. Les décharges contrôlées constituent le maillon ultime et indispensable de toute filière de traitement des déchets urbains. En Afrique, il est utilisé comme la seule filière d'élimination. La circulaire du 22 janvier 1980 en France distingue trois catégories de décharge au regard de la protection des eaux souterraines.

Les décharges de classe III, dont le substrat géologique peut être perméable. Ces sites ne peuvent être utilisés que pour stocker les matériaux inertes : gravats, déchets issus des activités extractives, déblais de chantiers des travaux publics.

Les décharges de classe II sont essentiellement réservées aux déchets urbains (ordures ménagères et assimilés). Ces sites réputés semi-perméables autorisent la migration à faible débit des lixiviats produits, de sorte que le processus naturel de dégradation des éléments polluants entraînés par ces lixiviats puisse avoir lieu avant que ces polluants n'atteignent la nappe souterraine. Dans ce cas, le coefficient de perméabilité verticale k est compris entre les 2 valeurs suivantes : $10^{-9} < k < 10^{-6}$ m/s sur une épaisseur supérieure à 5 m. Des sols en grès ou les milieux sablo-argileux conviennent à ce type de site.



Photo 1 : Un casier d'une décharge traditionnelle en cours d'exploitation

Les décharges de classe I, qui sont des sites réputés imperméables. Ils sont prévus pour accueillir les déchets industriels spéciaux. Le caractère imperméable correspond à un coefficient de perméabilité $k < 10^{-9}$ m/s sur une épaisseur supérieure à 5 m.

Les sols en grès non fissurés, schistes argileux ou marnes vérifient généralement ces conditions.

Dans les villes des pays en développement, on rencontre deux types de décharge de classe II : la décharge contrôlée est un lieu où il est admis ou toléré de déposer des déchets. La décharge sauvage est une décharge qui est créée sans aucune autorisation de l'administration.



Photo 2 : Dépôt sauvage de déchets dans un quartier

Contrairement à une décharge sauvage, une décharge contrôlée est implantée sur un site approprié après autorisation de l'administration. Cette autorisation ne doit être accordée qu'après une étude approfondie de son impact sur l'environnement et en particulier de tous les dangers de pollution pouvant en résulter.

Le principe de mise en décharge de déchets ménagers et assimilés consiste à épandre les ordures ménagères en couches successives ayant une épaisseur appropriées (environ 2 m), à les régaler avec un engin de génie civil, et à les limiter par des talus réglés, peu inclinés, dont la largeur est en rapport avec le tonnage journalier traité. Les déchets sont recouverts d'une couche d'un matériau inerte ayant une épaisseur de 10 à 20 cm. D'une manière générale, la proportion des matériaux de couverture à prévoir pour les décharges contrôlées traditionnelles est de 20 à 25 % du tonnage des OM à traiter [Gillet, 1985]. Cette méthode vise à obtenir une fermentation anaérobie de la matière organique, tout en réduisant son impact sur le milieu naturel.

La densité des ordures après leur mise en décharge est voisine de 0,7 dans les conditions des villes des pays du Nord. Les mesures effectuées sur la décharge de Yaoundé ont une densité moyenne de 1,3 après compactage.

En fonction de la topographie du site devant accueillir la décharge, deux modes d'exploitation sont envisagés : lorsque le site est plat, l'espace disponible est divisé en un certain nombre de parcelles rectangulaires semblables de 3 000 m² à plus d'un hectare. Ces parcelles constituent alors de petites décharges indépendantes appelées casiers ou alvéoles. Pour réaliser ces aires, soit on creuse des tranchées dans le sol (méthode des tranchées), soit on construit les digues sur le terrain (méthode des monticules, figure n° 2) [Gillet, 1985].

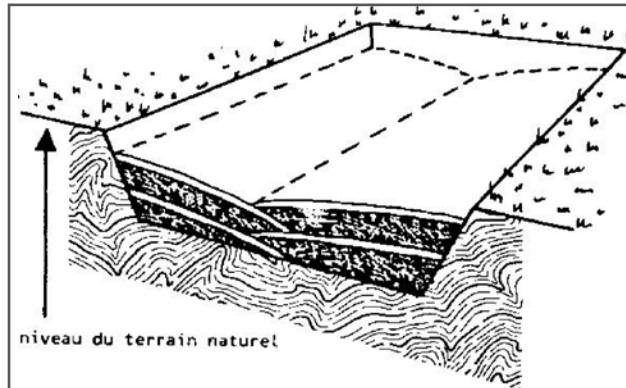


Figure 2 : Méthode d'exploitation en casier en terrain plat, décharge en terrain plat

➤ En terrain accidenté, deux situations sont à considérer : terrain en cuvette ou en dépression, terrain en relief.

- Dans le premier cas, on procède à l'enfouissement par couches successives légèrement inclinées que l'on recouvre d'un matériau de couverture jusqu'au remplissage de la dépression ;

- Dans le cas des terrains en relief, le matériau de couverture est directement prélevé sur les flancs du site d'exploitation, ce qui limite les coûts d'exploitation (figure n° 3) [Gillet, 1985].

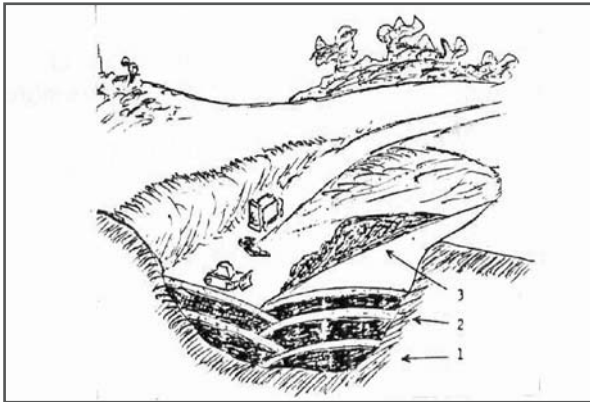


Figure 3 : Schéma d'une décharge en terrain accidenté

En général, les sites de décharges dans les villes d'Afrique au sud du Sahara sont choisis de manière à ne pas susciter d'aménagements importants. C'est pour cette raison qu'on y rencontre plus de décharges en terrain accidenté.

Dans les régions équatoriales, la forte présence des matières organiques dans les déchets entraîne une densité en décharge après compactage de 1,3 à 1,4. Le tassement s'opérant lentement, il faut compter qu'il s'écoulera entre 4 à 5 années avant que leur volume ait diminué de moitié. Dans les pays équatoriaux, le phénomène de tassement des déchets en décharge n'est pas encore élucidé. Après la mise en décharge, on assiste d'abord à un gonflement des déchets en bordure des alvéoles les trois premiers mois, puis à un tassement lent pendant les premières années [Djeutcheu, 2005]. Les tassements s'effectuent plus rapidement au point que le volume occupé par les déchets aura diminué de moitié au bout de 14 à 18 mois (au lieu de 4 à 5 ans pour la décharge traditionnelle). Il en résulte un gain immédiat d'espace par rapport à la décharge contrôlée traditionnelle qui est de 25 à 30 %. Après 20 mois environ, la stabilité de la décharge est alors pratiquement acquise [Gillet, 1985]. Ce mode d'exploitation est recommandé pour les villes de plus de 150 000 habitants.

La mise en décharge est l'étape de traitement qui met le déchet directement en contact avec le milieu naturel. Il est important, en fonction des modes d'exploitation existants, d'analyser les échanges pouvant s'établir à ce moment entre le déchet et son milieu environnant. C'est l'objet des paragraphes suivants.

Chapitre 2

PRATIQUES ACTUELLES DE GESTION DES ORDURES MÉNAGÈRES DANS LES VILLES DES PAYS EN DÉVELOPPEMENT

LA GESTION DES DÉCHETS SOLIDES MUNICIPAUX figure parmi les principaux défis à relever par les autorités municipales des villes des pays en développement.

Ce chapitre a pour objectif l'exploration des moyens déjà utilisés dans les villes des pays en développement pour maîtriser la gestion des déchets tout en accordant une attention particulière aux sources potentielles de pollutions. Il présente la collecte traditionnelle et les filières de traitement qui sont déjà appliquées dans les villes des pays en développement. Le système de collecte traditionnelle est le plus courant dans ces villes et il a pour principale particularité l'utilisation de matériels rudimentaires qui ont une influence non seulement sur le rendement du service mais aussi sur la nature des pollutions générées par les déchets.

LA COLLECTE TRADITIONNELLE

Telle que pratiquée sur le terrain, la collecte traditionnelle vise essentiellement à enlever les ordures ménagères déposés par les ménages dans les espaces publics (rues, places publiques, marchés, etc.). Elle intègre alors trois étapes (figure n° 4) : la précollecte, la collecte et le transport, la mise en décharge.

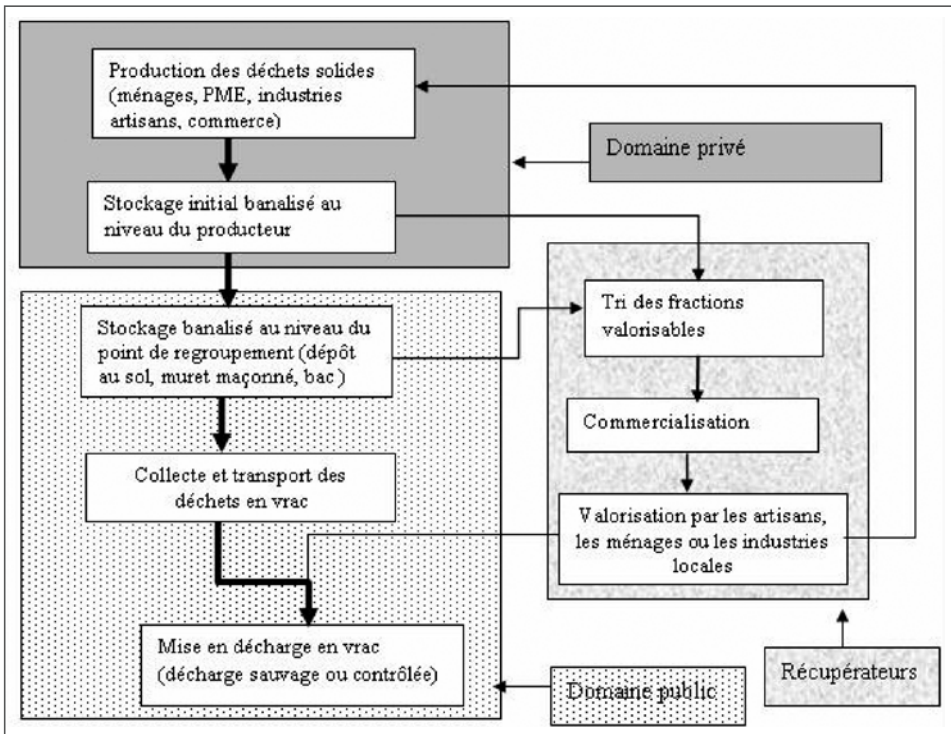


Figure 4 : Cheminement des déchets municipaux dans les villes des pays en développement

La collecte traditionnelle concerne uniquement les étapes de la chaîne de traitement des déchets solides qui se réalisent dans le domaine public. C'est uniquement cette opération qui est actuellement prise en charge par les municipalités. Les autres opérations sont à la charge des ménages ou des opérateurs privés (artisans, récupérateurs, entreprises, etc.).

La précollecte

La précollecte est l'ensemble des opérations par lesquelles les habitants d'une maison, d'un immeuble ou d'une cité d'habitat collectif recueillent, rassemblent et stockent leurs déchets, puis les présentent à l'extérieur aux fins d'évacuation. (La précollecte est l'ensemble des opérations nécessaires à l'évacuation des ordures ménagères, depuis le logement jusqu'au lieu de collecte par le service attitré.

L'une des caractéristiques majeures des villes traitées dans ce chapitre est l'insuffisance des voies de circulation ou alors le cas échéant leur mauvais état, rendant impossible l'accès par camion dans les quartiers.



Photo 3 : Stockage des déchets à domicile à Melen IV à Yaoundé (Cameroun)

La précollecte est une étape destinée à évacuer les déchets des habitations. On distingue la précollecte par apport volontaire et la précollecte de porte à porte généralement assurée par le secteur informel.

La précollecte par apport volontaire des producteurs

La population achemine elle-même ses déchets à l'aide de poubelles faites de paniers, de seaux de récupération, de brouettes ou de tout autre contenant vers un conteneur ou un espace de regroupement situé non loin des habitations, (à une distance maximale de 250 mètres). Cet espace est défini comme étant le point de regroupement des déchets. L'apport volontaire contribue à la diminution du coût de collecte et il est bien adapté aux quartiers dont l'accès est difficile aux véhicules à quatre roues. En fonction de l'importance des moyens que la ville consacre à la gestion des déchets, et de l'importance du quartier, les équipements des points de regroupement diffèrent.

Les dépôts à même le sol : c'est une méthode peu recommandable qui consiste à déverser les déchets solides sur le sol, en des lieux précis sans aucune précaution préalable. Ces dépôts sont observés dans les quartiers à habitat spontané, les zones périurbaines et même dans des quartiers à habitat planifié. Le ramassage des tas d'ordures ainsi formés se fait soit par un chargeur sur pneus (généralement appelé trax) ou avec un camion muni de grue pour son chargement, soit manuellement. Cette méthode est souvent relayée par la collecte en porte à porte le long des rues accessibles aux camions. Les dépôts à même le sol sont nombreux lorsque les distances entre les bacs sont très importantes (plus de 300 mètres). Ils présentent de nombreux inconvénients dont d'importantes pertes de temps lors de la collecte.



Photo 4 : Un dépôt à même le sol à Foumban (Cameroun)

L'utilisation des fûts de 200 litres : ces récipients sont utilisés pour le stockage des déchets dans certains quartiers à habitat spontané ou dans les centres-villes. Ces fûts sont de faible capacité et l'on observe qu'ils sont souvent pleins quelques heures seulement après leur mise en place. Ils permettent l'enlèvement des déchets par les bennes-tasseuses moyennant un chargement manuel.

Les conteneurs échangeables : ces conteneurs sont en plastique ou en acier. Les conteneurs en plastique sont de moins en moins utilisés à cause du mauvais comportement des usagers qui y déversent des cendres contenant du charbon de bois encore brûlant, ce qui occasionne l'incinération des déchets contenus dans le bac et la destruction de celui-ci. Les conteneurs les plus utilisés sont en acier galvanisé et ont une capacité de 1 000 litres. Ils sont chargés par le système de lève-conteneur des bennes-tasseuses. Ce type de récipient est généralement utilisé pour desservir le centre-ville et les quartiers de haut standing.

Les bacs en acier de capacité variable (4 à 30 m³) : les bacs utilisés pour la collecte des déchets ménagers ont une capacité qui varie entre 4 et 20 m³, les bacs de plus de 20 m³ sont généralement utilisés pour la collecte des déchets industriels. Les bacs de 4 à 10 m³ sont enlevés par des multi-bennes porte-coffres généralement appelé « PC ». Les bacs de 12 à 16 m³ sont enlevés par les amplirolls. Ce type de récipient est généralement utilisé dans les marchés et dans les entrées des quartiers à habitat spontané où il y a une forte concentration des déchets. Ces bacs sont destinés à recueillir les apports volontaires des producteurs privés (ménages, opérateurs des activités diffuses) et publics (marchés, gares routières, etc.), ainsi que la collecte des déchets issus du nettoyage des rues, des marchés et des places.



Photo 5 : Déversement des déchets dans un bac de 6 m³ à Yaoundé

Les bacs, par rapport aux autres systèmes offrent l'avantage de la rapidité d'enlèvement et le maintien de la salubrité du site. Par contre, à cause de leur volume important, ils sont encombrants lorsque les rues sont étroites. Ils présentent aussi les inconvénients suivants :

- hauteur de la benne supérieure à la taille des enfants en charge de vider les poubelles ;
- impossibilité d'accéder aux bennes avec les brouettes utilisées pour le transport des ordures de la maison jusqu'au point de dépôt.

Ces inconvénients entraînent souvent le dépôt des ordures à côté des bacs et des pertes de temps lors du ramassage.



Photo 6 : Dépôt d'ordures à côté du bac à Foumban (Cameroun)

De plus, les bacs sont souvent mal acceptés par les résidents. Personne ne souhaite qu'un bac à ordures soit entreposé dans le voisinage de sa maison, d'où de vives protestations parfois accompagnées de la destruction des bacs à ordures. Ceci pose un réel problème d'aménagement urbain et de mise en cohérence des espaces urbains avec le service de la propreté ur-

baine. Certaines autorités soutiennent que ce système est contraire à l'image d'une ville moderne, et que de ce fait il ne peut constituer qu'une solution transitoire en attendant un système idéal qui serait le « porte à porte ».

Les systèmes de précollecte tels que définis ici ne permettent de drainer que 30 à 50 % du gisement des déchets ménagers dans les villes en développement. Pour améliorer le système de collecte dans les villes, des systèmes plus organisés de précollecte se développent ici et là. Ces systèmes, qui sont organisés par des associations ou des petites entreprises de jeunes, permettent de rendre service directement au ménage producteur moyennant une rémunération pour faire fonctionner l'entreprise. En Afrique de l'Ouest par exemple, de véritables petites entreprises de services de précollecte de déchets se sont organisées avec le soutien des communes ou de certaines organisations non gouvernementales (ONGs) internationales comme l'OXFAM Québec à Cotonou (encadré n° 2). Au Cameroun, les initiatives en matière de précollecte sont encore embryonnaires et se sont développées dans les villes de Yaoundé et Bamenda avec l'appui d'ONGs nationales comme ERA - Cameroun (encadré n° 3). Contrairement aux expériences des villes de l'Afrique de l'Ouest, l'implication des communes reste encore faible. Seule la détermination des ménages bénéficiaires permet aux petits opérateurs de précollecte de survivre.

La précollecte organisée par des tiers

Cette précollecte organisée fait appel à de petites organisations (Groupements d'intérêt économique (GIE), petites entreprises, associations, comités de quartier, etc.) qui assurent la collecte en porte à porte au moyen de systèmes de transport simples, tels que des pousse-pousse, des charrettes à motricité humaine ou à traction animale. De tels systèmes permettent de créer des emplois et d'assurer la collecte dans les secteurs urbains de faible densité et d'accès difficile où les tracteurs et les camions passent difficilement [Hebette, 1994]. L'émergence de cette classe d'opérateurs est favorisée par la défaillance des services municipaux d'enlèvement des ordures ménagères avec des situations insoutenables d'insalubrité et de pollution. Dans la plupart des cas, ces systèmes ont permis d'améliorer le niveau de salubrité urbaine, même si beaucoup reste à faire pour les confirmer dans un schéma organisationnel efficace de gestion des déchets solides.

Les premières expériences d'implication des populations dans la gestion des déchets ont commencé avec des opérations de précollecte puis des projets de précollecte, soutenues à la base pour la plupart par des programmes internationaux. Mais ces projets sont souvent isolés, sans réelle prise en compte des expériences passées et des contextes locaux. Ils se heurtent donc à des écueils qui pourraient pourtant et sûrement être évi-

tés compte tenu des nombreuses expériences de précollecte, réussies ou avortées, qui ont lieu de par le monde.

En s'appuyant sur une étude du retour d'expérience consistant à identifier des opérations de précollecte et à les analyser, on constate que les résultats réels sont très difficiles à appréhender à cause du manque de communication sur les détails de l'organisation sociale, technique et financière. Il a donc été utile de mettre en évidence quelques éléments de réussite et d'échec et de proposer une grille d'analyse indiquant les informations qu'il faudrait recueillir pour que ces analyses soient complètes et utiles pour l'avenir. Ce travail a fait l'objet d'un mémoire de DEA [Fouad Zahrani, 2002], dont la synthèse est présentée ci-dessous.

Les informations pratiques que l'on peut en retirer sont présentées dans le tableau n° 5.

Tableau 5 : Synthèse des expériences de précollecte des ordures ménagères dans les PED

[Fouad Zahrani, 2002]

Ville/Pays	Période concernée	Mode de collecte	Nombre de ménages concernés	Coût mensuel par ménage
Khulna, Bangladesh	Début : mars 1997 Fin : décembre 2000	Pousse-pousse Charrettes Tricycles	Presque 13 000	Entre 2 et 20 takas (0,037-0,37euro)
Lucknow, Inde	Pas indiquée	Pousse-pousse Charrettes Tricycles	environ 500	10 à 25 roupies (0,2 et 0,5 euro)
Yaoundé, Cameroun	Début : 1997 Fin : en cours	Porte-tout Brouettes	En 2000 : 400 En 2001 : 250	500 à 1 000 FCFA
Bamako, Mali	Début : 1992 Fin : pas indiquée	Charrettes à traction animale	450 ménages	750 FCFA (1,125 euro)
Mopti, Mali	Début : 1994 Fin : pas indiquée	Charrettes à traction animale	635 ménages	750 FCFA (1,125 euro)
Conakry, Guinée	Début : octobre 1996 Fin : pas indiquée	Charrettes à traction humaine	En 1997 : 400 ménages	3 000 F guinéen (2,5 euros)
Niamey, Niger	Début : 1994 Fin : octobre 1995	Pousse-pousse Charrettes à traction humaine	Pas indiqué	Pas indiqué
Ouagadougou, Burkina Faso	Début : 1993 Fin : pas indiquée	Charrettes à traction animale	Pas indiqué	500 FCFA (0,75 euro)

.../...

Ville/Pays	Période concernée	Mode de collecte	Nombre de ménages concernés	Coût mensuel par ménage
Bamako, Mali	Début : février 1992 Fin : pas indiquée	Charrettes à traction animale	1 500 ménages	750 FCFA (1,125 euro)
Bamako, Mali	Début : sept. 1992 Fin : pas indiquée	Charrettes à traction animale	475 ménages	environ 700 FCFA (1,05 euro)
Bamako, Mali	Début : avril 1993 Fin : pas indiquée	Charrettes à traction animale et pousse-pousse	1 025 ménages	750 FCFA (1,125 euro)
Rufisque, Sénégal	Début : 1990 Fin : pas indiquée	Charrettes à traction animale	3 500 ménages	450 FCFA (0,675 euro)
Thiès, Sénégal	Début : juin 1995 Fin : pas indiquée	Charrettes à traction animale	392 ménages	300 FCFA (0,45 euro)

La population a un rôle déterminant dans la réussite des projets de pré-collecte. La sensibilisation et l'information pour la convaincre de l'utilité de telles initiatives sont indispensables pour la durabilité et le financement des opérations, en particulier pour garantir le paiement régulier des prestations de ramassage.

Les leaders d'opinion ont un rôle important dans la réussite des actions ; leur prestige et leur image de respectabilité pour les habitants les aident à arbitrer et régler les problèmes qui peuvent exister entre les habitants et les structures communautaires.

Au Sénégal et au Mali, les sages jouent régulièrement un rôle d'intermédiation entre les GIE et les ménages, notamment en contribuant au règlement des problèmes dus au non-paiement des taxes par les ménages.

À Bamako, le GIE Faso-Kanu a divisé le quartier en 7 secteurs. Dans chaque secteur, il y a un comité de 6 à 7 membres dont le responsable est souvent le chef de secteur. Ces comités de sages ont joué un grand rôle d'intermédiaire entre le GIE et les habitants.

Les GIE et les associations de quartier sont souvent constitués de jeunes sans emploi et disponibles pour les actions bénévoles et volontaires ; ces jeunes sont les moteurs des projets. Très motivés, ils sont très efficaces dans les tâches d'animation et de communication avec les habitants. La plupart de ces jeunes habitent dans les quartiers d'intervention, d'où l'efficacité de leurs activités dans ces quartiers.

Les femmes constituent la catégorie de la population la plus sensible aux problèmes d'insalubrité, du fait de l'accumulation des déchets dans les maisons, des maladies infectieuses et infantiles. Elles ont un sens civi-

que prononcé et une volonté pour l'amélioration des conditions de vie de leur famille.

À Bamako, on note la présence de nombreuses structures féminines qui pratiquent la précollecte et le nettoyage des rues telles que la COFEPE et la COFESFA.

Les ONGs ont un rôle très important dans le déroulement des actions. On remarque la présence de deux types d'ONG : locales et internationales.

Du fait de leur localisation dans le pays ou dans la ville de l'action, les ONGs locales sont conscientes des problèmes de la population. Elles apportent un soutien technique et matériel à la structure responsable.

Les ONGs internationales ont une bonne réputation au regard des grands bailleurs de fonds qu'elles peuvent mobiliser. Leur rôle est de rechercher le financement auprès des bailleurs de fonds et de gérer le budget en fonction de la nature des actions.

On note aussi l'apport technique et l'expérience de ces ONGs au profit des structures responsables.

- ENDA-TM est impliquée dans plusieurs actions dans les PED et surtout dans les pays d'Afrique de l'Ouest;

- WASTE a réussi à lancer le programme UWEP concernant la gestion des déchets solides, en impliquant des structures locales des PED.

Les municipalités et les districts apportent l'appui technique et parfois financier aux GIE.

L'organisation technique du service de précollecte

La précollecte se fait généralement manuellement en porte à porte par des charretiers. Cette pratique facilite la tâche pour les habitants : il suffit de sortir les poubelles devant les maisons à l'heure de passage convenue.

Les charretiers sont répartis dans des zones géographiques définies ou non avec la municipalité.

Les responsables des structures communautaires ont parfois mis en place dans les quartiers d'intervention des superviseurs et des contrôleurs qui jouent un rôle de médiation entre les habitants et les charretiers en cas de conflit.

Les recettes collectées constituent l'autofinancement des structures responsables de la collecte. Seul l'équilibre financier permet la durabilité et la continuité du service. Le niveau de recouvrement des cotisations auprès des ménages varie généralement de 50 à 70 % du nombre total d'abonnés [Bulle, 1999].

- À Lucknow (Inde), l'ONG MJS a mis en place un système d'abonnement très encourageant pour les habitants. Les adhérents ne paient les frais de service qu'à partir du troisième mois d'abonnement et le prix d'abonnement varie en fonction des revenus des ménages entre 10 et 25 roupies.

- À Bamako, le GIE Faso Kanu accepte le paiement par trimestre; dans le cas des familles très pauvres, le GIE accepte de prendre un montant inférieur au tarif officiel fixé (750 FCFA/mois).

Vu l'inaccessibilité des zones périurbaines non loties, les structures responsables du service de collecte utilisent des techniques simples : des charrettes à traction animale ou à traction humaine, des tricycles et des pousse-pousse. Ces modes de transport ont montré leurs avantages (coût, maintenance, adaptation au terrain) en dépit de la voirie dégradée qui pose de réels problèmes fonctionnels.

- À Conakry (Guinée), une ONG locale et le CREPA (Centre régional pour l'eau potable et l'assainissement à faible coût) ont utilisé des charrettes métalliques, avec deux ouvertures munies d'un couvercle (une en haut pour faire entrer les ordures, une frontale pour les évacuer). Il s'agit de charrettes à traction humaine qui disposent de deux roues gonflables.

- À Khulna (Bangladesh) et Lucknow (Inde), les charrettes utilisées sont des charrettes tricycles.

D'autres GIE proposent des poubelles à couvercles à prix raisonnable pour s'assurer un revenu complémentaire et pour faciliter le travail des charretiers lors de l'enlèvement des poubelles.

Les causes d'échec et les problèmes rencontrés

Le problème de participation : la population joue un rôle très important dans la réussite des actions. L'échec de nombreuses expériences semble souvent lié à une sous-estimation de ce facteur.

Normalement, et avant que le projet ne commence, la structure responsable prend contact avec la population pour l'informer et la sensibiliser de l'intérêt de l'action. L'expérience a montré qu'une grande partie des habitants est marginalisée (castes inférieures, personnes âgées, handicapés, analphabètes).

D'autres obstacles empêchent la participation et la mobilisation des habitants, au stade du démarrage d'une action [Bulle, 1999] :

- Une certaine méfiance de la population par rapport aux initiatives collectives suite à un précédent échec;
- Des tensions ethniques qui empêchent le regroupement et les actions de solidarité.

À Mopti au Mali, la tradition liée au non-enlèvement des ordures était très ancrée dans les mentalités des habitants, ce qui a causé de grandes difficultés au GIE LAABAL.

Les difficultés de coopération avec les autorités locales : les communes ont des pouvoirs très importants, qui peuvent aider au bon fonctionnement de l'opération de précollecte. Mais le manque de moyens techniques

et financiers les empêche souvent d'être des partenaires actifs dans l'appui aux initiatives de base.

Les analyses montrent qu'une absence ou une mauvaise articulation entre la précollecte des déchets par les GIE et l'évacuation de ces ordures par les services municipaux peut être une cause d'échec. Les services de collecte municipale ne respectent pas les horaires et le temps de passage pour transporter les ordures des dépôts intermédiaires aux décharges finales. Les GIE ne disposent pas de terrains réservés par les municipalités pour le dépôt des déchets ; ils sont donc obligés de les mettre sur des terrains intermédiaires. Les centres de transit accordés par les municipalités sont parfois mal répartis, ce qui oblige les charretiers à faire de longs trajets, fatigant pour l'homme et/ou l'animal et générant une perte de temps.

Le non-paiement des redevances par la population : Le taux de recouvrement des frais de service de la précollecte varie souvent entre 50 et 70 %, ce qui peut s'expliquer par le fait que :

- Les habitants de ces quartiers défavorisés sont souvent pauvres, leurs situations financières les empêchant de payer dans les délais et même de poursuivre les contrats ;
- Certaines traditions empêchent les populations de comprendre l'intérêt et l'impact du service.

La capacité et la disponibilité des habitants défavorisés peuvent être mesurées par les enquêtes qui précèdent le début des projets.

À Luknow (Inde), l'ONG Mustang Joyti Samiti a fait une série d'enquêtes avant de commencer le projet pour tester la capacité des ménages à adhérer au service. Les résultats ont montré que 80 % des ménages sont prêts à payer le service.

Difficultés d'autogestion et d'autofinancement : les micro-entreprises et les GIE chargés de la précollecte sont souvent des entreprises sans capital qui se financent avec l'abonnement des habitants. Les expériences de précollecte de Cotonou et Yaoundé encadrées par ERA-Cameroun illustrent bien cette situation. Ce sont par exemple des groupements de jeunes diplômés chômeurs qui ont comme priorité la recherche de travail, et n'ont pas de compétence en matière de gestion des déchets. Ceci déséquilibre le fonctionnement du service, et met en cause l'autofinancement, la rentabilité et la durabilité de ces structures.

À Cotonou, dès 1989 et dans un contexte de laisser-faire total, on a vu d'abord l'émergence des opérateurs privés et communautaires fournissant des services de proximité aux populations. Ensuite, on a assisté à une forme de structuration de la filière par la contractualisation des relations entre la municipalité et ces opérateurs privés, notamment les entreprises de transport des déchets. La situation à Cotonou illustre parfaitement les

hésitations observées dans les villes des PED pour mettre en place un système de gestion cohérente et de financement durable de la filière de gestion des déchets. Le partenariat public et privé associatif dans la gestion de la précollecte des ordures ménagères et même de son financement a été une solution qui a permis à la commune de Cotonou d'améliorer durablement la précollecte des ordures ménagères dans la ville, grâce à une contribution directe des usagers et à la reconnaissance officielle du service rendu par les structures non gouvernementales par la commune (encadré n° 2).

Encadré n° 2 : Partenariat public et privé associatif pour la précollecte des ordures ménagères à Cotonou

Jusqu'à la fin des années quatre-vingt, l'enlèvement des déchets de la ville de Cotonou était le domaine exclusif du Service de la voirie de la circonscription urbaine. Ce service était exécuté en régie directe. L'essentiel des déchets était collecté à la fois sur les marchés et le long des grands axes où les riverains déposaient leurs poubelles, puis les déchets étaient convoyés dans les bas-fonds des quartiers périphériques.

Malgré sa couverture spatiale limitée, ce système a cumulé de très mauvais résultats imputables aux lourdeurs administratives, à un personnel pléthorique et à l'incapacité financière de la ville à assurer le renouvellement des équipements coûteux.

Progressivement, la qualité du service minimal fourni s'est détériorée et celui-ci n'a plus été assuré que sporadiquement. Cette situation a conduit à la fin des années quatre-vingt à l'émergence des initiatives de délégation de service à des structures privées nationales.

Dès 1989 et dans un contexte de laisser-faire total, on a vu d'abord l'émergence des opérateurs privés et communautaires fournissant des services de proximité aux populations. Ensuite, on a assisté à une forme de structuration de la filière par la contractualisation des relations entre la municipalité et ces opérateurs privés, notamment les entreprises de transport des déchets.

L'évaluation de l'expérience n'a pas été concluante pour toutes les parties qui se sont accusées mutuellement : les entreprises ne couvrent pas correctement leur zone d'attribution et les DSM collectés ne sont pas amenés à la décharge indiquée conformément aux cahiers de charges mais déversés dans les bas-fonds et marécages en ville ; les populations ne respectent pas les horaires de passage des camions ou déversent les ordures hors conteneurs ; la municipalité n'honore pas, à terme, ses engagements financiers.

La recherche d'une forme de gestion plus consensuelle et plus efficace a conduit à une organisation plus rationnelle de la filière depuis la fin des années quatre-vingt-dix.

Le processus de restructuration en cours d'expérimentation dans la filière des DSM laissait croire à un désengagement municipal de la collecte des déchets.

Il se nourrit des leçons tirées des expériences précédentes et de la dynamique des principaux acteurs opérationnels.

C'est donc pour pallier les insuffisances des deux précédents systèmes qu'un marché de collecte dite « collecte domiciliaire », s'est considérablement développé autour de micro-entreprises, sur la base de contrats privés. Ces contrats privés lient un ménage ou un groupe de ménages à un prestataire de service qui effectue une collecte bi- ou tri-hebdomadaire à domicile. Ces prestataires sont de deux catégories :

.../...

- les structures non gouvernementales (SNG) qui rassemblent les micro-entreprises aux statuts divers (associations à but non lucratif, coopératives, entreprises commerciales) ou groupements informels, faiblement équipées, fondées sur l'initiative privée ou communautaire, et qui offrent un service de précollecte. En 1998, on dénombrait 51 SNG. En 2002, elles étaient au nombre de 71 répertoriées et intégrées dans le système organisationnel mis en place;

- les sociétés commerciales spécialisées dans la collecte et le traitement des déchets qui assurent la collecte porte à porte, le transport à la décharge et la valorisation des déchets. Leur nombre est également en évolution. En 1998, elles étaient 6 entreprises qui se disputaient le marché. Aujourd'hui, elles sont au nombre de 12 retenues dans le cadre de la structuration de la filière.

Le service de précollecte est assuré à Cotonou par les structures non gouvernementales (SNG), et consiste à enlever les DSM au domicile des abonnés et à les convoier vers des points de regroupement identifiés.

En 2002, 71 SNG ont été identifiées et réparties dans les zones de concession définies d'un commun accord avec tous les acteurs de la filière. Cette nouvelle organisation, qui met presque chaque SNG en situation de monopole dans sa zone, a permis un accroissement du nombre d'abonnés au service de précollecte.

Le nombre des abonnés est passé de 1 046 en 1995 à 19 059 en 2002, avec un taux de croissance moyen de 5,5 % par an sur huit ans. Quant aux SNG, leur nombre est passé de 6 en 1993 à 71 en 2002.

Cet accroissement du nombre des abonnés montre l'intérêt et la volonté des populations de se débarrasser de leurs déchets.

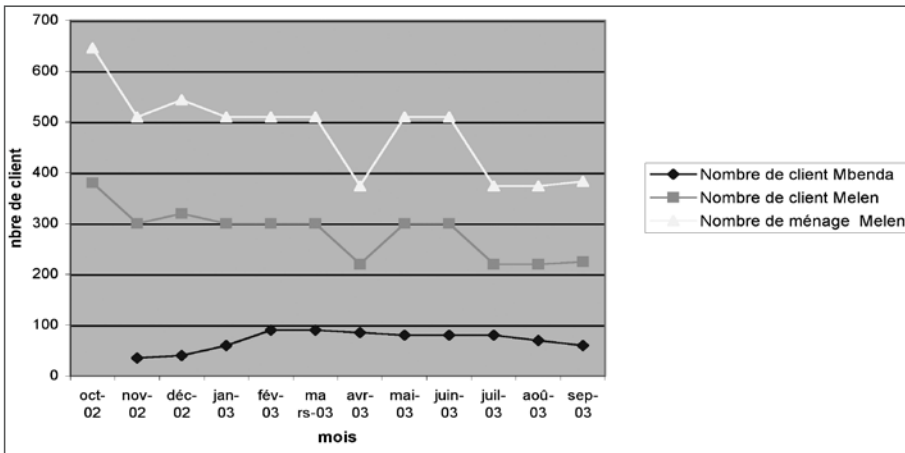
À Yaoundé par contre, la ville a connu une période d'hésitation entre 1991 et 1998 liée à l'arrêt de la subvention du service de collecte des ordures par l'État. L'entreprise privée qui assurait alors la collecte et la mise en décharge des déchets dans la ville a arrêté son service, laissant une situation de vide total. En 1998, le service de ramassage de déchets a repris grâce toujours à une subvention de l'État et à la contribution financière de la communauté urbaine de Yaoundé. Dans ce contexte, une opération pilote de précollecte des ordures ménagères dans cinq quartiers d'habitat spontané a été initiée par l'ONG ERA - Cameroun et exécutée sur le terrain par deux petits opérateurs privés (Tam Tam Mobile et GIC Jevolec). La participation de la commune et de la communauté urbaine de Yaoundé dans cette opération a été très timide. La société privée qui assure l'enlèvement des déchets dans la ville, bien qu'elle reconnaisse que la précollecte lui a permis d'augmenter les quantités collectées, donc son chiffre d'affaires, soutient l'opération au strict minimum en permettant l'accès à ses bacs par les opérateurs de précollecte pour y déposer les déchets enlevés chez les ménages. Le système, même s'il est reconnu utile par les autorités municipales, ne survit que grâce à la participation volontaire des ménages des quartiers retenus, d'où la difficulté d'autogestion de l'opération (encadré n° 3).

Encadré n° 3 : Les leçons tirées des opérations de précollecte encadrées à Yaoundé par ERA - Cameroun

Les quartiers Melen 3 et 4 sont deux quartiers à habitat spontané de Yaoundé. Seuls les ménages situés en bordure des voies carrossables bénéficient du service de collecte des ordures ménagères. C'est pour remédier à cette situation que l'association ERA - Cameroun a lancé, grâce à l'appui financier du ministère français des Affaires étrangères, dans le cadre du programme « Gestion durable des déchets et de l'assainissement urbain », un projet d'appui à la mise en place de la précollecte des déchets ménagers dans ces deux quartiers. L'association Tam Tam Mobile a été retenue après une enquête réalisée auprès d'une vingtaine de petits opérateurs dans la ville. Le financement de départ a été apporté par le ministère français des Affaires étrangères, tandis que les populations bénéficiaires participent à hauteur de 500 à 1 000 FCFA par mois pour le fonctionnement de l'opération.

Le bilan annuel du compte d'exploitation de l'opération de précollecte des déchets solides dans les quartiers Melen 3 et 4 à Yaoundé est négatif. Cette opération présente un déficit de 408 140 FCFA. Ce déficit serait plus élevé si le prestataire n'avait pas réduit son personnel. À court terme, le projet est appelé à « mourir ». Un appui extérieur à l'effort de participation des habitants de la zone d'action est indispensable pour la suite.

On constate qu'il y a une variation du nombre de clients qui suit le rythme des vacances scolaires dans la zone de Melen, tandis qu'à Mbenda l'évolution de la clientèle est un peu stable (figure n° 1). Le nombre moyen de clients dans la zone de Melen est bien en dessous du nombre de ménages desservis dans la mesure où plusieurs ménages se réunissent pour prendre un seul abonnement.



Évolution du nombre de clients au cours de la première année

Cette figure, ainsi que le compte d'exploitation montrent bien la précarité de cette activité de précollecte. Cette précarité a déjà été mise en exergue dans les études préliminaires. On se rend bien compte que l'activité ne peut pas être rentable avec la seule participation financière des ménages. Le taux de couverture réalisé dans la zone de Melen est de 48 %, tandis qu'à Mbenda, qui est un quartier périphérique, le taux .../...

de couverture de 18 % est très faible, malgré le fait que le niveau de vie des habitants soit plus élevé qu'à Melen.

Cette action a montré que la précollecte, une activité « artisanale » et mobilisatrice de main d'oeuvre, a sa place dans la filière de gestion des déchets d'une grande ville et qu'elle peut permettre, à terme et sur une base de nouveaux mécanismes de financement, d'augmenter considérablement le taux de couverture du service de collecte des déchets. Les différents acteurs poursuivent l'action pour étendre la précollecte à d'autres quartiers et insérer le dispositif dans la stratégie globale de gestion des déchets de la ville de Yaoundé.

Les résultats d'exploitation des deux années qui suivent (septembre 2003 à août 2005) confirment la tendance déjà observée à la fin de la première période dans la mesure où le nombre de clients se maintient aux environs de 222 ménages payants. On observe toujours la même variation saisonnière liée aux vacances scolaires qui occasionne la libération des enfants pour effectuer la tâche d'enlèvement des ordures ménagères dans le ménage. C'est ce qui justifie que les mois de juillet, août et septembre soient les plus difficiles et où l'on enregistre le plus faible taux de participation au projet. Certains événements cycliques comme les fêtes et la rentrée scolaire influencent le niveau de participation des habitants à ce type de projet. On enregistre par exemple que le nombre de clients de la précollecte baisse jusqu'à atteindre un minimum pendant les mois de février et d'octobre. Au Cameroun, en effet, l'État a l'habitude de payer les salaires de janvier au mois de décembre, ce qui fait qu'à la fin du mois de janvier certains ménages payants n'ont pas la possibilité financière de régler leur facture de précollecte, d'où leur suspension du service au mois de février. En septembre par contre, c'est le mois de la rentrée scolaire au Cameroun. Bien que les enfants soient déjà retournés à l'école, les parents ont consenti des sacrifices financiers pour couvrir les dépenses de la scolarité et des fournitures, ce qui justifie le non-paiement de la facture de précollecte et la baisse des abonnements au mois d'octobre (figure n° 5).

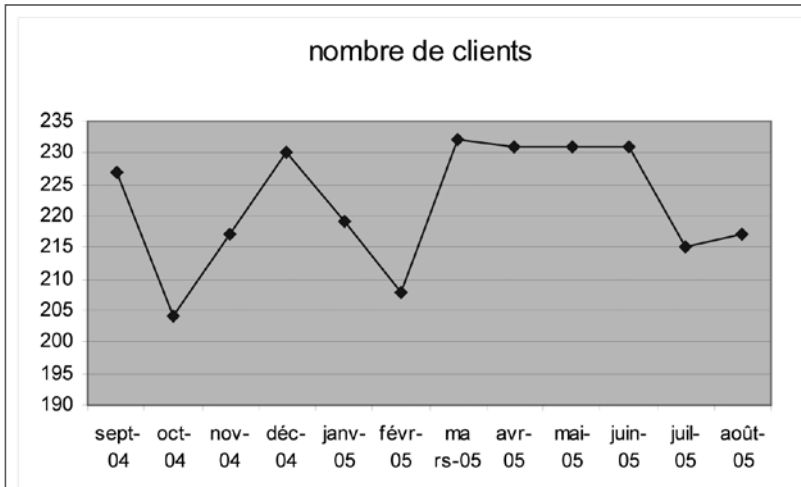


Figure 5 : Variation du nombre de ménages payant le service de précollecte des déchets à Melen III et IV (année 2004-2005)

Sur le plan financier, l'équilibre financier de l'opération de précollecte est resté précaire pendant toute la période. Suite au retrait du bailleur de fonds, seules les populations bénéficiaires ont continué à payer pour maintenir le service dans leur quartier. Le résultat positif d'amélioration des conditions d'hygiène et de salubrité dans la zone d'action constitue le seul facteur de motivation des habitants. Ce dynamisme s'est appuyé fortement sur la volonté et l'engagement des membres de l'association Tam Tam Mobile qui conduit l'opération sur le terrain. Le projet qui employait au départ 13 personnes, dont 12 éboueurs et 1 superviseur a réduit son effectif à 7 personnes. Pour s'adapter à la précarité des recettes financières, l'association a réduit le nombre de personne à 7, le superviseur travaillant à mi-temps et de façon bénévole. Les aides ponctuelles de ERA - Cameroun en matière de petit équipement (bottes) permettent quand elles arrivent de relever la trésorerie de l'opération. Les charges de renouvellement de matériels de travail pèsent lourd (par exemple 107 000 FCFA de déficit de trésorerie en octobre 2004 (figure n° 6), suite au renouvellement des tenues de travail, des sacs de transport et d'autres petits matériels). Selon le président de Tam Tam Mobile, « l'association supporte les charges excédentaires en prélevant dans les bénéfices réalisés dans ses activités connexes, par solidarité avec les membres qui travaillent dans le projet et surtout aussi par souci des populations qui ont déjà acquis les bons réflexes et des comportements favorables ».

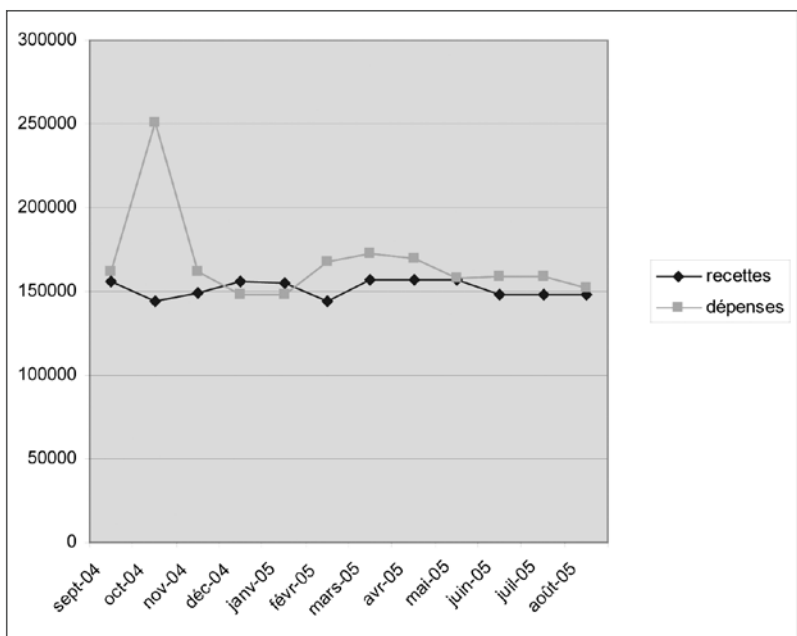


Figure 6 : Évolution des recettes et dépenses du projet entre 2004 et 2005 (FCFA)

Sur l'ensemble de la période de septembre 2004 à août 2005, l'opération de précollecte a cumulé un déficit de 192 280 FCFA, le mois le plus déficitaire étant octobre 2004. Ce déficit est dû à l'achat de tenues pour les éboueurs et au renouvellement des sacs qui servent pour le stockage des déchets avant le transport. Les mois de décembre 2004 et janvier 2005, grâce à l'appui en petit matériel apporté par le laboratoire Environnement et Science de l'eau (achat de bottes et de petits matériels de travail), ont vu une petite amélioration dans la trésorerie du projet.

Cette action montre que la précollecte, une activité « artisanale » et mobilisatrice de main-d'œuvre, a sa place dans la filière de gestion des déchets d'une grande ville et qu'elle peut permettre, à terme et sur la base de nouveaux mécanismes de financement, d'augmenter considérablement le taux de couverture du service de collecte des déchets. On constate que l'état de salubrité des quartiers qui ont bénéficié de cette opération est nettement amélioré par rapport aux autres quartiers du bassin. Malgré les faiblesses enregistrées sur le plan financier, nous pensons que ce projet est une initiative à généraliser et à pérenniser dans le bassin. En effet, parmi les conditions ayant contribué à la baisse de la participation des habitants

au projet, nous avons recensé les facteurs internes et externes aux quartiers. Parmi les facteurs externes au quartier on peut citer :

➤ La frontière -couverte par le projet : la limite entre deux quartiers du bassin n'est pas matérialisée, le fait que les habitants situés en dehors de la zone de projet continuent à jeter leur déchets dans les rigoles réduit les efforts de ceux qui participent à l'opération. Ce problème de frontière est très perceptible le long des rigoles situées à la limite des quartiers couverts et du cours d'eau Mingoa qui est la limite naturelle entre les quartiers Melen III et IV et les quartiers Elig Effa situés sur l'autre versant. La prise en compte du bassin versant comme limite territoriale d'une telle opération peut contribuer à réduire les écarts entre les quartiers et encourager l'ensemble des habitants à participer au projet.

➤ Le manque d'appui institutionnel au niveau local et de la commune : si le rôle de la communauté urbaine et de la commune urbaine de Yaoundé VI a été bien défini et accepté au début de l'opération, on a constaté que ces acteurs ne montrent aucun engouement pour appuyer ce type d'opération. L'une des raisons évoquées par la communauté urbaine, c'est qu'en cas de généralisation de la précollecte dans la ville, elle serait incapable de payer la facture à Hysacam suite à l'augmentation du tonnage des déchets enlevés. D'où le comportement laxiste de laisser l'opération se dérouler par ses propres moyens et mourir si nécessaire. Ce manque d'engouement des autorités pose aussi le problème d'équité dans l'accès aux services publics. Les ménages riches situés dans les quartiers structurés et en bordure des routes goudronnées du bassin voient ainsi leurs déchets enlevés sans aucune contrepartie financière, tandis que les ménages pauvres situés dans les zones de mi-pente et les bas-fonds ne bénéficient d'aucune assistance, même dans le cas où ils sont disposés à payer les charges afférentes à l'enlèvement de leurs déchets jusqu'aux bacs situés sur les voies goudronnées accessibles aux camions. L'appui demandé aux communes est de loin financier. Il était prévu que la commune joue son rôle régalién de contrôle d'hygiène pour persuader les ménages qui refusent d'adhérer au projet d'aller jeter leurs ordures dans les bacs. D'après le président de l'association Tam Tam mobile, « l'habitant ne sait à qui s'adresser en cas de dérive du voisin. Nous recevons des plaintes et nous limitons à la sensibilisation ». Les chefferies traditionnelles et les CAD aussi ne veulent pas s'impliquer dans la sensibilisation des habitants, ils préfèrent ne rien dire en cas de mauvais comportement des habitants à cause des susceptibilités des voisins. Chacun préfère ne pas avoir de conflit inutile avec son voisinage à cause de la saleté. Néanmoins, les chefs de quartiers et les CAD interviennent lorsqu'il se rendent compte que le comportement d'un habitant peut porter atteinte à la survie du projet. À Melen IV par exem-

ple, un habitant qui avait accusé un éboueur d'avoir volé son téléphone portable a été condamné par l'assemblée de quartier à payer une amende de 50 000 FCFA à l'éboueur faussement accusé pour diffamation. Un avertissement a été adressé à l'habitant par la communauté pour avoir voulu perturber un projet communautaire dans le quartier. La communauté pendant l'assemblée de quartier réunie à cette occasion comme tribunal populaire en a profité pour adresser ses félicitations à l'association et lui signifier l'importance de ce projet qui assure la propreté des quartiers.

Les difficultés de gestion des points de transit : les dépôts de transit ou les centres de transfert sont des interfaces entre la précollecte assurée par les micro-entreprises ou les GIE et le transport des déchets par les services formels ou municipaux. Ces centres sont souvent des terrains à ciel ouvert et ne sont pas gardiennés.

Les problèmes liés à ces dépôts sont multiples. Les structures communautaires ont des difficultés à avoir leurs propres centres. Ces dépôts ne sont pas toujours couverts et leur emplacement est loin pour les charretiers qui sont obligés de faire un long trajet. Les exemples de Conakry et Niamey se retrouvent dans la plupart des villes de la région :

- à Conakry, l'AGPSP se plaint du manque d'espace pour ces centres, ce qui provoque une accumulation de déchets. Par ailleurs, le fait que les dépôts ne soient pas couverts pose des problèmes pour le transport des déchets ;

- à Niamey, la municipalité n'a pas respecté son engagement de placer 10 conteneurs dans le quartier d'intervention de la SAPHTA ; elle a mis seulement un conteneur, ce qui est insuffisant pour les déchets du quartier.

À Ouagadougou par exemple, la municipalité a aménagé des points de transfert pour permettre aux petits opérateurs de déposer les déchets collectés dans les bacs de grand volume avant leur transfert sur la décharge par des camions des entreprises agréées. À Cotonou, cinq entreprises se partagent le marché de transport des déchets à partir des points de transfert aménagés par la commune (encadré n° 4).

Le découpage en zones est basé sur :

- les critères administratifs : le découpage administratif permet d'avoir les statistiques fiables et facilite les estimations et autres éléments d'appréciation ;

- le critère de standing : il est vrai qu'il est pratiquement impossible d'avoir une homogénéité des zones à Cotonou, mais il est possible de se baser sur les caractéristiques d'ensemble permettant d'opter pour une technologie et d'appliquer un système de péréquation ;

- le critère de technicité, qui prend en compte la voirie (l'état des routes et leur praticabilité selon les saisons), la possibilité de disposer de points de regroupement et des postes de transfert ;
- la présence de acteurs opérationnels et leur occupation de l'espace ;
- le critère de rentabilité des entreprises concessionnaires.

Le zonage à adopter va se greffer sur ce découpage administratif. La loi sur la réforme territoriale a institué 13 arrondissements pour la commune de Cotonou. Mais si l'on considère le dernier critère, celui de la rentabilité des entreprises concessionnaires, il sera nécessaire d'avoir des zones plus larges, donc moins d'unités administratives par zone. Ainsi, Cotonou a été découpée en 7 zones répondant aux critères retenus.

Élaboré en 2001, la mise en œuvre expérimentale de ce plan a commencé par la concession de 6 zones aux secteurs privé, associatif et communautaire, à partir d'un appel d'offres. La direction des Services techniques municipaux s'est d'abord réservé le ramassage des DSM le long des principales artères de la ville et dans la zone 1 avant de se raviser et de les mettre à concurrence.

D'une situation de concurrence et de relation conflictuelle entre secteurs public et privé, la relation est aujourd'hui établie sur une base partenariale : le secteur privé (SNG) assure en concession la précollecte des DSM jusqu'aux points de regroupements et la mairie de Cotonou doit assurer, à travers les contrats de marché public avec les entreprises, le transport et l'élimination des DSM.

Mais en réalité, en l'absence d'une décharge municipale contrôlée, les DSM collectés auprès des ménages se retrouvent soit dans des décharges sauvages à l'intérieur de la ville, soit utilisés comme matériau de remblai des bas-fonds et des zones marécageuses de la ville.

Encadré n° 4 : Cotonou, le concept de gestion partagée entre le secteur public et les acteurs privés de la précollecte

L'état de l'assainissement de la ville de Cotonou à travers la gestion des déchets solides ménagers était très préoccupant. En effet, contrairement aux années antérieures où l'État avait le monopole de la gestion de ce service, en 2002, trois groupes d'acteurs interviennent dans la précollecte des déchets : les sociétés privées, les services techniques municipaux de Cotonou et les structures non gouvernementale (SNG). Cinq entreprises concessionnaires effectuent, sous contrat avec la municipalité, la collecte et le transport jusqu'à une décharge finale.

Forces et faiblesse du système

Force : des associations de précollecte dynamiques et relativement organisées autour d'un collectif : le COGEDA, qui comptait 70 membres en 2001 dont 55 réellement actifs.

- > Un cahier des charges de la prestation existe et chaque association se voit confier une zone prédéfinie par la commune de Cotonou;
- > Il y a un échange permanent entre la ville et le collectif des associations;
- > Chaque association est rémunérée directement par le ménage bénéficiaire entre 1 000 et 3 000 FCFA par mois. Sur un coût global estimatif d'environ 1 milliard de FCFA pour une gestion efficiente des déchets de la ville de Cotonou, les associations de précollecte permettent de mobiliser environ 200 millions, ce qui est un allègement de la pression sur le budget municipal;
- > Il y a eu, grâce à l'appui de OXFAM Québec, une opération de zonage de la ville et la signature de contrats de précollecte entre la municipalité de Cotonou et les 74 associations qui se partagent 93 secteurs;
- > Un suivi technique et financier de l'opération de précollecte est assuré par OXFAM Québec.

Il est mis en place un système de suivi et d'alerte (numéro vert, SIG,...) pour apprécier la satisfaction des usagers

Faiblesse :

- > Fragilité des associations de précollecte dont la pérennité repose sur les individus;
- > L'activité de précollecte n'est pas rentable tant que la couverture n'est pas totale ou que le taux de recouvrement n'est pas élevé;
- > Statut inapproprié des associations qui n'ont pas accès aux marchés publics de la ville;
- > Structure de coordination très fragile (pas de programme d'activités, cotisation des membres insuffisante pour soutenir le fonctionnement du collectif);
- > La mauvaise exécution du marché entre la municipalité de Cotonou et les entreprises de collecte est peu suivie, notamment en ce qui concerne le transport des ordures des bacs de transfert jusqu'en décharge; l'intervention de la police environnementale et sanitaire pour éviter l'émergence des dépôts sauvages;
- > L'absence d'une décharge municipale contrôlée : les DSM collectés auprès des ménages se retrouvent soit dans des décharges sauvages à l'intérieur de la ville, soit utilisés comme matériau de remblai des bas-fonds et des zones marécageuses.

La collecte

La collecte désigne l'ensemble des opérations au cours desquelles le contenu des récipients est déversé dans les bennes de ramassage pour l'évacuation vers le lieu de traitement ou d'élimination. Elle se déroule en deux phases :

- Le ramassage, à savoir le regroupement des récipients et leur déversement dans la benne de collecte ;
- Le « haut de pied », qui désigne le déplacement des véhicules et du personnel entre le premier et le dernier récipient ramassé.

Plusieurs types de matériels sont simultanément utilisés pour la collecte des déchets dans les villes des pays en développement. On distingue ainsi des matériels dits « traditionnels » à traction animale ou humaine, des véhicules à traction mécanique spécialisés ou non.

Matériels à traction humaine ou animale

Dans cette catégorie, l'agent moteur est essentiellement l'âne, le bœuf, le mulet de bât. Ces animaux effectuent le service porte à porte et leur travail est le plus apprécié partout où les rues sont à fortes pentes ou lorsqu'elles sont en escaliers. Le mode de collecte consiste en l'utilisation d'une charrette à 2 roues attelée à l'animal.

L'utilisation de ce type de matériel est souvent nécessaire pour la collecte des déchets des quartiers enclavés des grandes villes. Souvent de fabrication locale, ces matériels ont une durée de vie très courte (six mois à trois ans) et leur coût d'acquisition reste faible. Leur capacité de transport ne dépasse pas 1,5 à 2 m³ (cas de chariots tractés à l'âne en Égypte). Les distances de transport dépassent rarement 1,5 km pour les véhicules à traction humaine et 3 km pour les véhicules à traction animale. On trouve parmi les véhicules à traction humaine ou animale :

- Les charrettes à deux roues attelées à un âne : la charrette à âne est utilisée pour le transport courant dans les villes du Sahel et du Maghreb. On les rencontre notamment dans les villes marocaines, mauritaniennes, burkinabées, maliennes entre autres, mais ce type de transport se retrouve peu ou pas dans les villes proches de l'équateur où l'élevage des ânes n'est pas développé. La collecte effectuée avec ce moyen de transport reste tout de même trop chère pour être pérenne, compte tenu de la courte durée de vie des ânes et de la concurrence des charretiers [PSEAU, PDM, 2004].



**Photo 7 : Charrette à traction animale (Nouakchott)
(photo Temniya)**

- Les véhicules à deux roues tirés ou poussés par un homme tel que les pousse-pousse (capacité de 0,2 à 0,5 m³) : dans presque toutes les villes des pays en développement, la charrette à traction humaine est utilisée pour le transport de marchandises diverses dans les marchés et certains quartiers. Elle est utilisée aussi pour la précollecte des ordures ménagères par les petits opérateurs.



Photo 8 : Charrette à traction humaine (pousse-pousse à Yaoundé, Cameroun)

- Des chariots permettant de transporter 8 poubelles en plastiques de 70 litres chacune, utilisés pour la première fois à Jakarta en Indonésie en 1980 [Gillet, 1987];

- Des tricycles dont le coffre est remplacé par une caisse grillagée d'une contenance de 1 à 1,5 m³, très courant dans les villes d'Asie du Sud-Est [Gillet, 1987].

Bien qu'avec ce type de matériel le rendement de collecte soit faible (5 à 20 m³ d'ordures par jour) [Gillet, 1985], ce système a l'avantage de permettre d'accéder facilement aux voies étroites et accidentées et ne consomme pas de combustibles fossiles. Mais il ne peut être envisagé qu'en complémentarité avec la collecte motorisée.

Les véhicules à traction mécanique

On distingue ici deux types de véhicules : les véhicules spécialisés et les véhicules non spécialisés. Les véhicules non spécialisés sont les matériels de chantiers des travaux publics qui sont souvent utilisés pour la collecte des ordures ménagères. On distingue alors les bennes et les chargeurs à pneus communément appelés « Trax ». Ces premiers types de véhicules sont utilisés pour la collecte des déchets stockés à même le sol ou dans les murets maçonnés. Leur inconvénient est l'éparpillement des déchets lors du chargement et le faible volume qui réduit le rendement de transport. Parmi les véhicules à traction mécanique non spécialisés, on peut citer :

- Les triporteurs motorisés ou à pédales qui sont très utilisés dans certains pays du Moyen- et de l'Extrême-Orient mais faiblement utilisés dans les villes africaines.

- Les tracteurs agricoles avec remorque : les tracteurs agricoles à roues sont très utilisés car ils sont assez pratiques pour effectuer le service de la collecte dans les petites municipalités de 20 000 à 50 000 habitants.



Photo 9 : Un tracteur agricole en action à Ouagadougou (Burkina Faso) (photo Temniya)

Le tracteur agricole de type standard présente les avantages suivants :

- Faible prix d'achat par rapport à celui d'un camion ;
- Équipement d'une prise de force permettant d'actionner le système hydraulique de basculement de la benne en remorque. Ce système n'est utilisé que marginalement pour la collecte des ordures ménagères, car il est trop lent pour pouvoir assurer le transport des ordures sur une longue distance (plus de 5 km). Jusqu'en 2000, les tracteurs agricoles étaient encore utilisés dans les villes de Ouagadougou (31 tracteurs) au Burkina Faso et Rabat (17 tracteurs) au Maroc [AFD, 2001].

Les camionnettes pick-up de 1,5 m₃ (bâchée ou non) sont utilisées par les petits opérateurs pour le transport des ordures ménagères dans villes d'Afrique au sud du Sahara et dans certaines villes du Maghreb, mais leur utilisation reste marginale en raison de leur coût d'exploitation élevé.

Les camions plateaux à ridelle : de tonnage variés, les plus courants sont de 8 à 12 tonnes qu'on rencontre souvent dans le BTP (bâtiment et travaux publics). Ils sont utilisés pour le transport des ordures dans les villes moyennes d'Afrique ou d'Asie. Les ridelles sont souvent rehaussées par un châssis grillagé ou en bois monté de chaque côté. Ce type de véhicule est adapté pour le ramassage des déchets d'élagage. Ils permettent d'enlever les tas à même le sol sur les trottoirs où ces déchets sont chargés à la trax ou à la main. Le chargement nécessite alors une main-d'œuvre abondante (6 à 8 hommes munis de fourches et de pelles pendant 3 à 4 heures). Dans la même catégorie de véhicule, on peut citer les bennes ville de Paris recyclées dans certaines villes africaines comme Yaoundé et Douala au Cameroun. Elles sont pourvues d'un couvercle qui permet leur fermeture pendant le transport. Elles ont une capacité de 8 m₃ et, en mode manuel, leur chargement dure environ 3 heures et demie par une équipe de 6 personnes. Ce type de véhicule est aussi utilisé pour l'enlèvement des ordures à même le sol.

Photo 10 : Une benne ville de Paris sur le pont bascule à la décharge de Yaoundé (photo Djeutcheu K.B.S.)



Très répandu, peu sophistiqué et bien maîtrisé par les mécaniciens locaux, le camion benne est bien adapté pour la modernisation progressive des systèmes de gestion des déchets dans les villes des pays en développement. À Dakar et à Accra par exemple, les véhicules spécialisés ont été introduits progressivement, au fur et à mesure de la spécialisation et de la professionnalisation des entreprises concessionnaires du service d'enlèvement des déchets solides.

Les bennes grues : ce sont des véhicules munis d'un système à godets qui permet leur chargement. Elles sont destinées au ramassage des tas d'ordures au sol ou dans les murets maçonnés. Leur chargement peut durer environ 1 heure à 1 heure et demie en fonction de la capacité de la benne du camion. Pendant la collecte, les déchets sont légèrement compactés par les godets, ce qui améliore leur densité pendant le transport. Ce type de véhicule est encore utilisé dans les villes de Douala et Yaoundé au Cameroun [Ngnikam, 2000].

Photo 11 : Une benne grue sur la décharge de Yaoundé (Photo Djeutcheu K.B.S.)



Quant aux véhicules spécialisés, les plus courants, à savoir les multi-bennes et les bennes compacteuses, sont présentées ci-dessous.

Les multi-bennes porte coffre (PC) et les amplirolls : ce sont des véhicules qui opèrent par échange de conteneurs. L'amenée, le transport et la reprise de ces récipients s'effectuent à l'aide d'un système de bras de

levage monté sur le camion et actionné par un système hydraulique. Le chargement d'un conteneur avec ce système dure environ 10 mn. Il est très adapté lorsque les distances de transport sont courtes (moins de 15 km).



Photo 12 : Benne porte coffre



Photo 13 : Benne amplirolle

Les bennes tasseuses : ce type de véhicule est le plus utilisé pour la collecte des ordures ménagères dans les grandes artères et souvent dans les quartiers chics. Son caisson est muni d'un système de compaction qui permet d'augmenter la capacité de collecte du véhicule. Les organes mécaniques d'alimentation, de transfert et de compression sont réunis au niveau de la porte arrière du camion. La benne tasseuse est composée de deux parties : le châssis cabine et la benne tasseuse proprement dite. Sa capacité d'enlèvement dépend à la fois du volume du caisson et du coefficient de tassement. La capacité de caisson varie entre 6 et 24 m³. Le coefficient de tassement varie en fonction de la densité des déchets. Il peut atteindre 3 pour les déchets moins denses (notamment en saison sèche), mais ne dépasse pas généralement 1,5 pour les déchets denses et humides.



Photo 14 : Benne à compaction

Ces véhicules sont utilisés de façon optimale lorsqu'ils sont munis d'un système de lève-conteneurs en bon état de fonctionnement, ce qui n'est pas souvent le cas dans nos villes. Lorsqu'il est chargé manuellement, il

faudrait compter environ 4 heures pour faire le plein du caisson alors que ce temps est réduit en 1 heure, lorsque le camion est muni d'un système de lève-conteneurs et que les récipients de collecte utilisés sont adaptés.

Les entreprises concessionnaires du service de gestion des déchets dans les villes africaines sont de plus en plus conscientes de l'intérêt de ce type de véhicule en terme de volume transporté par km parcouru. Elles en importent aujourd'hui, neufs ou d'occasion, des pays européens ou américains

La collecte par multi-benne a l'avantage d'être rapide, car les déchets sont déjà dans la benne lors de l'enlèvement. Par contre, l'absence de compactage pénalise ce système lorsque la densité des déchets à transporter est faible, dans ce cas l'utilisation de la benne compacteuse est plus efficace. Dans la plupart des cas, les véhicules de collecte sont utilisés en même temps pour le transport. Ce qui fait que, dans la pratique, les gestionnaires de service cumulent l'étape de transport et celui de la collecte.

Le transport des ordures ménagères

C'est la phase au cours de laquelle les ordures sont acheminées vers une destination appropriée : décharge, usine de traitement, etc. En fonction du volume des véhicules ayant servi pour la collecte, il est souvent recommandé, pour rester dans des conditions économiques acceptables, de recourir à un poste de rupture de charge. Mais son implantation ne devient nécessaire que lorsque :

- la destination finale ne pourrait pas être atteinte directement par les mêmes véhicules qui auront collecté les déchets dans des conditions opérationnelles ou économiques acceptables;
- les véhicules sont trop lents ou de faible capacité;
- la destination finale est trop éloignée des zones de collecte;
- la collecte se déroule dans une zone d'habitat clairsemé ou inaccessible aux véhicules non motorisés.

Pour les bennes compacteuses par exemple, la distance maximale de transport doit être inférieure à 15 km [Gillet, 1985].

La collecte des ordures ménagères représente une part importante du budget alloué pour la gestion des ordures ménagères dans les villes des pays en voie de développement. À Yaoundé et à Douala au Cameroun, elle représente environ 40 à 50 % du coût global de gestion des déchets. Plusieurs types de matériels peuvent être utilisés pour la collecte. Le choix de ces matériels dépend beaucoup des caractéristiques de l'agglomération desservie, du type de précollecte et des ressources financières de la municipalité.

La mise en décharge

Toutes les grandes villes (plus de 500 000 habitants) des pays en développement sont généralement dotées d'une décharge officielle. Dans la plupart des villes, la maîtrise d'ouvrage des décharges est assurée par la même entreprise qui assure la collecte. La ville de Douala a tenté une expérience entre 1992 et 1995 où la mise en décharge était assurée par une entreprise différente des entreprises de collecte. Cette expérience a été malheureuse du fait de la mauvaise articulation des opérations complémentaires ou de la mauvaise coordination des actions. La conséquence en a été de nombreuses files d'attente des camions et une mauvaise exploitation du site. Dans les villes des pays en développement, la plupart des décharges ne sont pas gérées dans les règles de l'art. Le recouvrement régulier des déchets est rare. Le service comprend, au plus, le régilage et le tassement des ordures, le compactage, le recueil des lixiviats avec décantage et suivi dans le temps.



Photo 15 : Un casier en cours de construction à la décharge de Yaoundé

Dans la plupart des villes, les sites de décharges sont utilisés au-delà de la période d'exploitation normale. Ces décharges, à l'instar de celles de Douala, Libreville, Ouagadougou, sont saturées. Par ailleurs, la réhabilitation des sites des décharges fermées ne semble pas être prise en compte dans les politiques d'exploitation des entreprises concessionnaires ou même dans les préoccupations des communes. Pourtant, les impacts potentiels de ces sites sur l'environnement et la santé sont considérables au regard du bilan des entrées et sorties d'une décharge contrôlée.

La décharge peut être définie comme un réacteur complexe à multi-compartiments (hydraulique, biologique, physico-chimique) qui sont en permanence en contact les uns avec les autres et qui réagissent de façon interactive simultanément ou non [Maes, 1988].

Les différentes entrées sont l'eau et les déchets, les sorties sont constituées des gaz (biogaz, vapeur d'eau, etc.) ainsi que du lixiviat (figure n° 7).

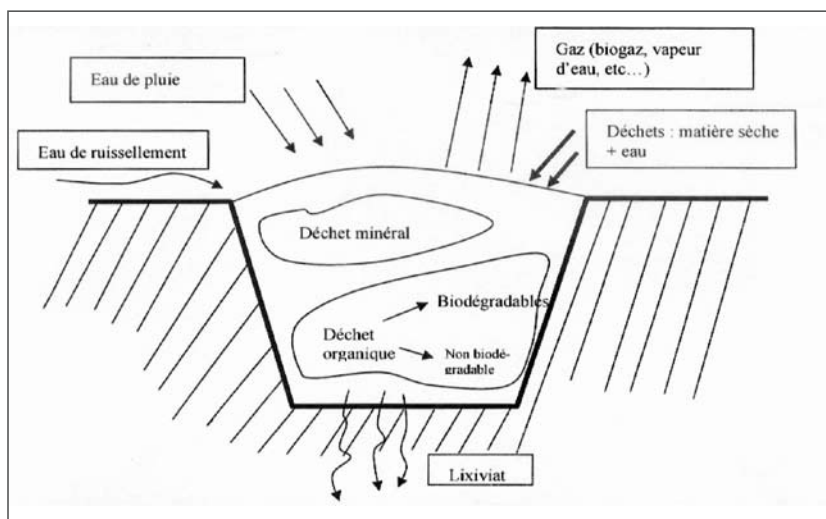


Figure 7 : Les différentes entrées/sorties d'une décharge contrôlée

L'eau est le principal vecteur d'évolution d'une décharge. Elle favorise la transformation biochimique et physico-chimique des déchets, et entraîne sous forme de lixiviat toute la charge polluante des sous-produits minéraux et organiques qui en résulte.

Le biogaz est un mélange de gaz carbonique et de méthane en proportions diverses. La production de méthane dans une décharge est fonction de la nature des déchets et surtout du taux de dégradation de la matière organique fermentescible. Certains auteurs ont étudié la dégradation des ordures ménagères dans les digesteurs anaérobies, et ils semblent s'accorder sur le fait que le taux de dégradation de la fraction organique des déchets est compris entre 40 et 60 % de la matière sèche [Diaz *et al.*, 1981 ; Mc Carthy, 1976]. Le taux de dégradation des déchets alimentaires et de jardin (80 % de cellulose) serait de 78,5 % et ceux de papiers kraft (97 % de cellulose) et journal (88 % de cellulose) seraient respectivement de 94 % et de 45 % [Ehring, 1998].

Plusieurs méthodes sont utilisées pour évaluer la production théorique de méthane des décharges d'ordures ménagères. Ces méthodes s'appuient toutes sur la fraction de carbone biodégradable qui est obtenue à partir de la composition pondérale des déchets. Bingemer et Crutzen (1991) ont collecté des données sur la fraction de matière organique biodégradable qui est de 0,19 pour les pays de l'OCDE en général et 0,22 pour les pays d'Amérique du Nord.

La quantité de méthane dégagée est alors donnée par la relation :

$$Q_{\text{CH}_4} = 1,868 \times C_o \times (0,14 \times T + 0,28).$$

- C_o est la teneur en carbone organique des déchets (kg/tonne de déchets).
- Q_{CH_4} est la quantité totale de biogaz produite (m^3 /tonne de déchets).
- T est la température en degrés Celcius qui règne à l'intérieur de la décharge.

En dehors des paramètres principaux cités dans la relation ci-dessus, plusieurs autres facteurs peuvent avoir une influence sur la production de méthane des décharges. Les plus significatifs sont :

- Le système de traitement des déchets ;
- Les propriétés physiques du déchet.

La gestion du biogaz de décharge représente une source d'énergie valorisable dans des conditions techniques et économiques connues si le diagnostic préliminaire sur le gisement est effectué et si la conception et l'exploitation du réseau de collecte le rendent pérenne.

Le pourcentage de récupération du biogaz peut varier de 50 à 70 % par rapport à la production théorique, et il dépend des conditions physico-chimiques existantes au sein de la décharge. La récupération de biogaz de décharge vise essentiellement un double objectif : un objectif écologique, car le méthane est un gaz à effet de serre dont le potentiel de réchauffement est 21 fois supérieur à celui du gaz carbonique, et un objectif économique dans la mesure où ce biogaz peut être valorisé comme combustible pour la production de chaleur ou d'électricité.

Il n'existe pas d'expérience connue de décharge avec récupération de méthane en Afrique au sud du Sahara de nos jours. En 1987, on dénombrait 150 sites de décharge valorisant de façon significative le biogaz seulement aux États-Unis, en Allemagne et en Grande-Bretagne. Cette tendance est en nette évolution puisque, en 1990, on a dénombré 130 sites qui valorisaient le biogaz dans la seule Communauté européenne [Solagro, 1993]. En France, la ressource énergétique potentiellement récupérable entre 1993 et 2030 sur les 141 sites parmi les plus importants serait de 15 millions de tonnes équivalent pétrole (tep) [Solagro, 1993 ; CLIP, 1996]. Tandis qu'en 1993 le potentiel effectivement valorisé était seulement de 19 000 tep par an réparti sur cinq sites [Solargo, 1993].

Les lixiviats des décharges des ordures ménagères : de manière générale, la formation des lixiviats à partir des déchets met en jeu une grande

diversité de phénomènes qui sont les résultats de trois catégories de facteurs : l'eau, les mécanismes physico-chimiques, le processus biologique [Brula et al., 1995].

La composition physico-chimique des lixiviats de décharge est très variable pour les raisons évoquées ci-dessus, de plus, elle évolue dans le temps pour un même site. Le tableau n° 6 ci-dessous donne la composition moyenne de quelques lixiviats de décharge ainsi que le résultat de l'analyse d'un prélèvement effectué au bas de la décharge de Tsinga Olinga à Yaoundé [Tchangang, 1994].

Tableau 6 : Composition (en mg/l) des lixiviats de décharges d'ordures ménagères mixtes (OM et déchets industriels banals)

[Brula et al., 1995 ; Tchangang, 1994]

Métaux	Décharge de Tsinga Olinga à Yaoundé	Suivant les analyses de Polden* (1982-1994)	Robinson et Maris 1979**	Garland et Mosher 1975***	Normes de rejet
pH	9,3	6 à 8,4	6,2 à 7,6	3,7 à 8,5	7
Conductivité	13 305 μ s/cm	984 - 25 800	-	-	18
DCO	588,3	375 - 36 315	66 - 11 600	40 - 89 520	36
DBO5	119,3	110 - 16 996	2 - 8 000	9 - 54 610	35
COT	428,8	121 - 2 340	21 - 4 400	-	7
Phénols	-	0,03 - 0,9	-	-	6
Na+	-	72 - 2 540	43 - 2 500	0 - 7 700	5
K+	-	148 - 1 640	20 - 650	2,8 - 3 770	5
Ca++	105,5	23 -134	165 - 1 150	5 - 4 080	6
Cl-	-	29,5 - 3 084	70 - 2 777	34 - 2 800	34

* Les données de Polden proviennent de 11 centres d'enfouissement technique de classe II en France.

** Lixiviats de 23 sites en Grande-Bretagne.

*** Lixiviats provenant de plusieurs sites aux États-Unis.

Les lixiviats de décharge d'ordures ménagères véhiculent plusieurs types de pollution, dont la plus redoutée est celle par les métaux lourds. On observe une grande variation de la composition des lixiviats du fait de la nature des déchets entreposés; cette composition évolue avec le temps et donc avec l'âge de la décharge.

LES FILIÈRES DE TRAITEMENT APPLIQUÉ DANS LES VILLES DES PAYS EN DÉVELOPPEMENT

En plus de la collecte traditionnelle, on observe d'une manière dispersée des expériences de valorisation des ordures ménagères dans les villes des pays en développement. Parmi ces expériences, on peut citer : la récupération et le recyclage, la méthanisation (filière 4) et le compostage (filière 12).

La récupération et le recyclage

La récupération est la séparation d'un ou de plusieurs composants d'un déchet à des fins de commercialisation ou de réutilisation. La finalité ici c'est la vente des produits récupérés à des tiers pour une transformation ultérieure. Le recyclage quant à lui consiste à l'introduction d'un composant récupéré dans un cycle de production où il se substitue partiellement ou intégralement à une matière première vierge.

Les produits et les matériaux les plus intéressants quant à leur valeur économique sont traditionnellement récupérés à la source, c'est-à-dire au niveau du producteur. La récupération de cette fraction intéressante s'accompagne éventuellement d'un paiement au détenteur du déchet. Au niveau des ménages, les gisements les plus convoités sont les résidus des commerces et des quartiers riches. Les activités de récupération sont souvent le fait de minorités ethniques ou d'autres communautés plus ciblées (cas des Intouchables en Inde et des chrétiens coptes au Caire) [Bertolini, 1996]. Mais aujourd'hui, la forte demande de matières premières induite par la croissance dans les pays d'Asie du Sud a produit l'émergence de nouveaux récupérateurs qui se retrouvent notamment parmi les « pauvres urbains ».

Dans la plupart des cas, la récupération se déroule au niveau du producteur de déchets (ménage, entreprise, commerce), mais aussi aux points de regroupement des déchets pendant la collecte et enfin lors de la mise en décharge. Dans certains cas, les produits récupérés empruntent un circuit assez long avec l'existence d'intermédiaires chargés de placer le produit auprès des acheteurs potentiels. La récupération à petite échelle telle que pratiquée maintenant ne permet de sortir qu'une petite proportion des déchets à mettre en décharge. Trois facteurs essentiels favorisent la récupération dans le contexte des pays en développement [Bertolini, 1996] :

- Une main-d'œuvre bon marché et pléthorique ;
- Des normes sanitaires et environnementales lâches et non appliquées ;
- La rareté du capital et les difficultés de maintenance.

Les produits récupérés sont généralement vendus aux entreprises locales, aux ménages pour le réemploi et aux artisans. Le prix de vente est souvent élevé à cause de l'existence d'une cascade d'intermédiaires dans la chaîne. Bien que le coût de la mise en décharge soit faible, la récupération est assez développée dans les villes en développement, car il constitue une activité de survie pour certaines catégories de population.

Le système informel de récupération, qui ne draine qu'une faible partie du flux des déchets ménagers de la mise en décharge, est souvent complété par les systèmes de traitement comme le compostage et éventuellement la méthanisation, permettant de valoriser la fraction fermentescible des ordures ménagères.

La pratique du compostage des ordures ménagères dans les pays en développement

Avant de passer en revue les différentes expériences de compostage qui ont fonctionné dans les villes des pays en développement, il est important de donner quelques fondements théoriques de ce procédé de traitement.

Aspects théoriques du compostage

L'analyse du processus de dégradation aérobie de la matière organique, des paramètres pouvant influencer le processus de compostage et la présentation des caractéristiques des différents rejets permettent de préciser les aspects théoriques du processus de compostage.

Processus de dégradation aérobie de la matière organique

Plusieurs auteurs donnent une définition plus ou moins complémentaire du compostage. En effet, selon Mustin (1987), le compostage peut être défini comme un procédé biologique contrôlé, de conversion et de valorisation des substrats organiques (sous-produits de la biomasse, déchets organiques d'origine biologique, etc.) en un produit stabilisé, « hygiénisé », semblable à un terreau et riche en composés humiques.

R. T. Haug (1980), cité par Mustin (1987), définit le compostage comme la décomposition biologique et la stabilisation des substrats organiques dans les conditions « thermophiles » : on constate une élévation de la température ; ceci est le résultat de l'activité de très nombreux micro-organismes pour aboutir à un produit final suffisamment stable (stockage possible et utilisation sur les sols sans impact négatif sur l'environnement). Le compostage donc, pour cet auteur, est avant tout une technique de stabilisation et de traitement des déchets organiques. On peut aussi le définir comme un processus biologique assurant la décomposition partielle des constituants organiques de sous-produits et de déchets en un produit

organique stable, riche en composés humiques, le compost. Cette définition est présentée schématiquement dans la figure n° 8.

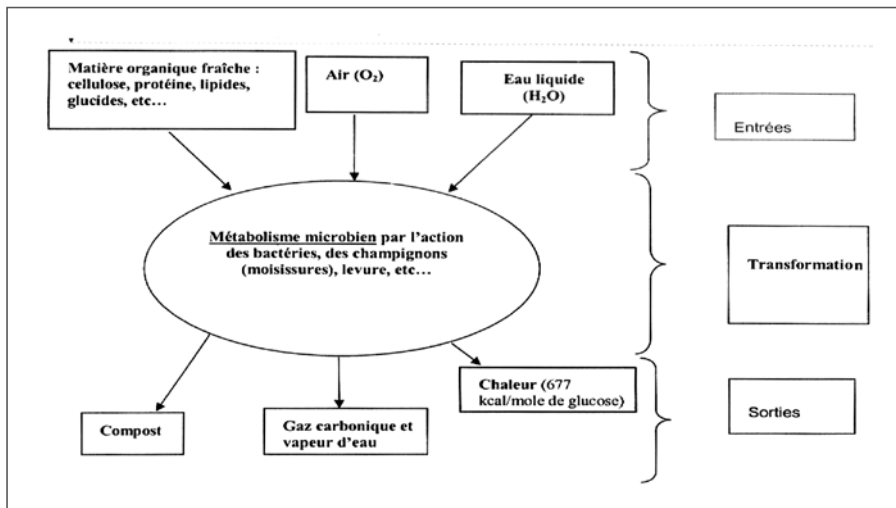


Figure 8 : Processus de compostage [Potvin et al., 1989]

La dégradation aérobie de la matière organique fraîche engendre une consommation d'oxygène, une production de gaz carbonique et de chaleur qui témoignent de l'activité microbienne de respiration.

Le processus de compostage est complexe et met en œuvre une microflore très variée : les bactéries, les actinomycètes, les cyanophycées, les champignons, les algues, les rhizoflagellés, les ciliés ou infusoires, etc. aptes à humifier ou à minéraliser la matière organique fraîche grâce à des fonctions enzymatiques diverses : cellulolyse, amylolyse, pectinolyse, lignilolyse, protéolyse, ammonification, etc. On connaît à l'heure actuelle environ un millier d'enzymes, dont plusieurs centaines sont actives lors du compostage [Brula et al., 1995].

Ce processus est souvent influencé par des paramètres extérieurs comme le taux d'oxygène lacunaire, la température, l'humidité, etc.

Les paramètres pouvant influencer le processus de compostage

Les paramètres pouvant influencer le processus de compostage sont : le taux d'oxygène lacunaire, la teneur en eau, la température, la qualité du substrat et le pH. Le tableau n° 7 présente les paramètres fondamentaux de compostage.

Tableau 7 : Paramètres pouvant influencer le processus de compostage

Paramètres	Présentation	Valeurs maximales	Valeurs minimales
Taux d'oxygène lacunaire [Mustin, 1987]	C'est le pourcentage d'oxygène dans les « vides » de la matière en fermentation	1 m ³ d'air par tonne de matière sèche par minute au début	0,1 m ³ d'air par tonne de matière sèche par minute à la fin du processus
Teneur en eau [Dadlzell et al., 1987; Kaiser, 1981].	Rapport de la différence du poids sec et du poids humide sur le poids humide	60 % (si > 70 % le processus est ralenti)	50 % (le processus s'arrête si <10 %)
Température [Pescod, 1993]	Elle varie en fonction de la composition des déchets	75°C	30°C
Rapport C/N [Kaiser, 1981; Mustin, 1987]	Mesure la vitesse de décomposition du substrat au cours du compostage	Entre 25 et 35 au début du compostage	Entre 15 et 20 à la fin du compostage
pH [Sikora et Sowers, 1983]	Permet de contrôler le processus biochimique du compostage		Compris entre 6 et 8 pour le compost mûr

Caractéristiques du compost

Les principaux rejets du processus de compostage sont solides et gazeux (figure n° 8). Lorsque le substrat à composter est constitué d'ordures ménagères, le processus génère, lors du tri, des refus constitués des fractions non fermentescibles.

Le compost issu du traitement des ordures ménagères peut poser un certain nombre de problèmes environnementaux et sanitaires lors de son utilisation. Mais ses caractéristiques physico-chimiques font de ce produit un excellent amendement organique.

Le compost mûr a l'aspect et l'odeur d'un terreau de couleur brune ou grisâtre, il est plus ou moins granuleux et pigmenté par les éléments inertes qu'il contient. Sa densité varie entre 0,7 et 0,8 pour une humidité voisine de 40 %. La matière sèche renferme entre 35 et 45 % de matière organique, dont 15 à 25 % de carbone [Gillet, 1985; De Lauzanne, 1986].

Le tableau n° 8 ci-dessous présente la composition moyenne de divers composts urbains. On peut observer dans ce tableau une homogénéité relativement grande des teneurs moyennes. Toutefois, certains facteurs peuvent être à l'origine d'une variabilité importante de leur composition. Parmi ces facteurs, on peut citer : la nature du substrat (diversité des ordures ménagères, collecte sélective ou non) et les techniques de traitement (fermentation, tri, broyage, affinage, etc.).

Tableau 8 : Composition moyenne de compost d'ordures ménagères

Composant	Unité	Compost de France ⁵	Compost d'Italie ⁶	Compost de Vienne ⁷	Compost de Yaoundé ⁸	Compost de Bafoussam ⁹	Compost de Cotonou ¹⁰
pH		6,9	8,1	7,3	-	-	-
Humidité	%	40,1	29,2	41	27	30	30
MO totale	%ms	48,5	39,8	41	17,7	-	16
MO synthétique	%ms	45,1	-	-	-	-	-
Carbone organique	%ms	26,3	23,2	23	13,6	8,24	8,4
Azote total	%ms	0,96	1,42	1,4	0,85	0,63	0,3
Rapport C/N		26,4	16,8	18	16	13	25
Aluminium	%ms	1,04	-	-	-	-	-
P ₂ O ₅	%ms	0,668	0,76	0,67	0,15	0,014	0,07
K ₂ O	%ms	0,74	0,72	1,06	1,5	0,66	0,2
Na ₂ O	%ms	-	--	-	1,3	-	0,07
CaO	%ms	6,1	8,64	6,89	0,16	0,63	0,12
MgO	%ms	0,667	1,26	1,78	0,23	0,12	-
Cuivre	mg/g	0,445	0,405	0,066	0,058		0,02
Manganèse	mg/g	0,722	-	-	0,878		-
Zinc	mg/g	1,179	0,855	0,259	0,314		0,157
Plomb	mg/g	0,394	0,751	0,087	0,165		0,092
Nickel	mg/g	0,059	0,085	0,028	0,03		0,005
Chrome	mg/g	0,072	0,231	0,04	0,149		0,011
Cadmium	mg/g	0,0043	< 0,005	0,0005	0,001		0,0003
Mercure	mg/g	0,004	-	0,0005	-		-
Fer	mg/g	-	-	-	54,63		

5 Composition moyenne de compost d'ordures ménagères à partir de 37 usines en France [Brula et al., 1995].

6 Composition moyenne d'un compost urbain italien [Brula et al., 1995].

7 Composition d'un compost issu de la collecte sélective des déchets de Vienne en Autriche [Brula et al., 1995].

8 Composition moyenne de compost produit sur 15 compostières artisanales de Yaoundé [Ngnikam et al., 1995].

9 Composition de compost produit sur 5 sites de compostage artisanal à Bafoussam (Cameroun) [CIPCRE, 1996].

10 Composition moyenne de compost issu d'une compostière artisanale à Cotonou [Wass et al., 1996].

On remarque une nette diminution de métaux lourds dans le compost de Vienne provenant d'une collecte sélective et les composts de Yaoundé, Bafoussam et Cotonou où un tri manuel des déchets a été effectué avant la mise en dégradation des déchets organiques. Le tri de ces métaux avant la dégradation doit être à l'origine de cette baisse du taux en métaux lourds; d'où la nécessité d'effectuer un tri efficace à l'amont du processus de compostage des ordures ménagères.

Les éléments fertilisants (azote, phosphore, potassium et les oligo-éléments) sont présents dans le compost. L'azote est présent sous forme organique dont non lessivable. Il participe dans le rapport C/N à la définition de la maturité du compost. Un rapport C/N de 15 à 20 est généralement retenu par les agronomes comme étant la meilleure valeur sur le plan de l'équilibre microbiologique [Segura, 1984]. La proportion d'azote disponible la première année est de 5 à 20 % [Mustin, 1987].

Le taux de phosphore est beaucoup plus bas dans le compost des villes des pays en développement (environ 0,1 % sur la matière sèche contre 0,7 % dans le compost des pays européens). Ce composé est plus disponible pour les plantes que l'azote (50 à 60 % dès la première année) [Van de Kerkhove, 1990]. Il peut cependant être insolubilisé selon les caractéristiques du sol.

Le potassium (0,2 à 1,5 % de matière sèche) et le magnésium (0,2 à 1,8 % de matière sèche), bien qu'en faible quantité, sont considérés comme une bonne source de nutriments.

Aspects hygiéniques et environnementaux du compostage

D'après Gotaas (1956), Boutin et Moline (1987), Bertoldi et *al.* (1987), Zucconi et Bertoldi (1987), Peel (1976), Pescod (1993) et Bertoldi et *al.* (1983), l'utilisation de compost et le compostage posent des risques potentiels directs ou indirects pour la santé des ouvriers travaillant sur le site de compostage, les habitants résidant à proximité d'une unité de compostage et le grand public consommant des produits cultivés sur les sols enrichis de compost.

Toutefois, les plantes et les légumes cultivés sur le compost thermophile produit et appliqué correctement ne posent pas de problème épidémiologiques et peuvent en général être consommés sans restriction [Cross et Strauss, 1985]. Un problème hygiénique apparaît lorsque le compost produit de manière non contrôlée est utilisé. En effet, la destruction des agents pathogènes est un aspect important du compostage contrôlé d'ordures ménagères. Les facteurs déterminants pour la destruction des agents pathogènes dans le compost sont la chaleur et les réactions aboutissant à la production d'antibiotiques [Golueke, 1972]. Des expériences montrent que la destruction des germes pathogènes est efficace si une température

de 70°C est maintenue pendant 30 minutes dans l'ensemble du tas ou 65°C pendant plusieurs heures [Bertoldi *et al.*, 1983]. Sur le terrain, une phase de température thermophile dépassant 65°C durant 7 jours est recommandée pour le compostage en tas ouvert [Bertoldi *et al.*, 1987].

Sur le plan environnemental, Flintoff (1976), Howard (1948) et Pescod (1993) considèrent le compostage d'ordures ménagères comme une méthode judicieuse de traitement et de stockage définitif des déchets solides. Néanmoins, la contamination potentielle du sol agricole par le compost d'ordures ménagères brutes insuffisamment triées contenant des concentrations élevées de micro-polluants toxiques, en particulier des sels de métaux lourds à base de mercure, de cadmium, de cuivre, de zinc et de bore, constitue un problème fondamental de pollution irréversible de l'environnement à long terme [Pescot, 1993; Linières, 1988].

Le zinc, le cuivre, le bore et dans une moindre mesure le plomb s'accumulent dans les végétaux et présentent une certaine biodisponibilité, souvent parallèle à leur mobilité dans le sol. Le mercure donne lieu à une accumulation spécifique dans les champignons comestibles. En revanche, une relative incertitude existe pour l'accumulation du cadmium, du nickel et du chrome [Linières, 1988].

Les expériences de compostage des ordures ménagères dans les pays en développement

Dans les technologies de compostage, il est important de distinguer le compostage à petite échelle (méthode artisanale) qui utilise des matériels légers avec une forte intensité de main-d'œuvre. Cette technologie est limitée, car elle ne permet pas de traiter une quantité importante de déchets, la capacité maximale d'un site de compostage utilisant cette technique étant limité à 20 tonnes par jour [Gillet, 1985]. Ce sont ces expériences qui ont été plus développées dans les pays en développement.

Le compostage industriel par contre, utilisé dans les grandes villes pour le traitement des déchets municipaux, requiert un degré de mécanisation plus élevé et utilise moins de main-d'œuvre par rapport à la méthode précédente.

Dans le contexte actuel, on rencontre des installations artisanales, semi-industrielles et industrielles.

Les expériences de compostage à petite échelle ou compostage artisanal

Plusieurs techniques de compostage à petite échelle ont été utilisées surtout dans les villes des pays en voie de développement. Ces méthodes peuvent être classées en fonction des caractéristiques des installations,

ainsi que sur la base des observations pratiques de leur mise en œuvre. Les critères principaux utilisés pour cette classification sont les suivants :

- le degré de sophistication technique;
- les coûts d'investissement et les besoins d'installation;
- la capacité de production;
- les besoins d'amendement dans les terrains agricoles.

Le caractère commun à toutes les méthodes de compostage à petite échelle est l'absence de réacteur [Rabbani *et al.*, 1983]. Cinq méthodes principales sont identifiées et classées selon les techniques de fermentation utilisées. Le tableau n° 9 donne les caractéristiques de ces méthodes et quelques lieux où elles ont été utilisées.

Tableau 9 : Caractéristique des méthodes artisanales de compostage et les lieux où elles ont été utilisées [Ngnikam, 2000]

Nom de la méthode	Caractéristiques	Points faibles	Lieux d'application
Récupération de terreau de décharge	Tri par tamisage manuel de la matière organique stabilisée ou encore en décomposition	Pas de tri préalable des déchets Risque de contamination par les métaux lourds	Bamako (Mali) Niamey (Niger) Cotonou (Bénin) Kinshasa (Congo)
Compostage en tas	Tri manuel des fractions non fermentescibles Formation de tas successifs de 1 à 5 m ³ avec retournement périodique	N'est pas adapté pour la production à grande échelle Requiert plus d'espace	Jakara (Indonésie) Lima (Pérou) Olinda et Peixinhos (Brésil)
Compostage en andains ouverts	Tri de la fraction non fermentescible Formation des andains (2 à 3,5 m de large, 1 à 1,8 m de hauteur) Retournement périodique	Nécessite un retournement plus fréquent et une main-d'œuvre plus importante	Porto Novo et Tohoué (Bénin) Accra (Ghana) Yaoundé (Cameroun) Ouagadougou (Burkina Faso)
Compostage en lits	Ouverture d'une fosse ou construction d'une structure murale sur le sol Tri des déchets et introduction de la fraction fermentescible dans la fosse	Requiert plus d'investissement que la méthode en andain	Louga (Sénégal) Kano (Nigéria) Ficksburg (Afrique du Sud) Guatemala City

Quelle que soit la méthode utilisée, les unités de compostage artisanal utilisent exclusivement des matériels légers (brouette, pelle, fourche, machette, etc.), ce qui réduit les besoins en maintenance : cet aspect est l'un des facteurs d'échec les plus fréquents des unités industrielles ou semi-industrielles. Par ailleurs, la faible productivité de ces systèmes ne peut permettre de traiter que des quantités limitées de déchets. Le compostage en andain retourné semble être plus adapté pour le traitement des ordures ménagères à cause des contraintes d'espace souvent rencontrées en milieu urbain.

Les installations semi-industrielles

Ces installations sont des adaptations des procédés artisanaux. Ce sont en réalité des installations semi-mécanisées qui ont une capacité de traitement plus importante que des unités artisanales. En effet, avec ce procédé, on peut atteindre une capacité de traitement de 50 tonnes d'ordures ménagères par jour. Lorsque les déchets non fermentescibles récupérés peuvent trouver des débouchés sur le marché local, ces installations servent aussi comme centres de tri. G. Bertolini *et al.* (1996) ont étudié 8 centres de tri de compostage au Brésil, dont 6 sont semi-industriels.

Ces installations sont souvent caractérisées par :

- la mécanisation des postes de réception et de transport interne des déchets (manutention par les chargeurs sur pneus ou par des grappins, puis transport par overband);
- le tri manuel des déchets non fermentescibles;
- la fermentation en andain retourné soit manuellement ou par des chargeurs sur pneus. Le criblage du compost final se fait à l'aide d'un crible manuel ou électrique.

L'autre caractéristique de ces installations, c'est l'utilisation d'une main d'oeuvre importante, surtout au poste de tri qui emploie en général plus des deux tiers du personnel de l'usine [Bertolini, 1996]. Ce système ne peut donc être envisagé que là où la main-d'oeuvre est bon marché.

Le compostage industriel

Il existe différentes chaînes de traitement industriel de compostage qui varient souvent la position du tri et de broyage des ordures ménagères. Avant de décrire les expériences de compostage industriel dans les villes des pays en développement, il est utile de donner d'abord un aperçu des chaînes de traitement.

D'une manière générale, on distingue deux grandes catégories d'installation de compostage suivant la technique de « fermentation » utilisée :

- La « fermentation » lente qui s'effectue en andains successifs sur une surface plane le plus souvent à l'abri de la pluie et du vent. Dans ce sys-

tème, l'apport de l'air est fait par retournements successifs de la masse ou par aération forcée [Mustin, 1987 ; Gillet, 1985].

- La « fermentation » en système fermé ou « fermentation » accélérée. Ici la « fermentation » s'effectue dans une enceinte fermée où il est possible de contrôler les paramètres comme le débit d'air, l'humidité, etc. Les retournements sont remplacés par un brassage permanent ou intermittent des déchets.

Les usines de compostage qui sont en fonctionnement actuellement dans les pays développés et qui ont été installées dans les villes africaines utilisent l'un des quatre procédés ci-dessous (figure n° 9), mais avec quelques variantes.

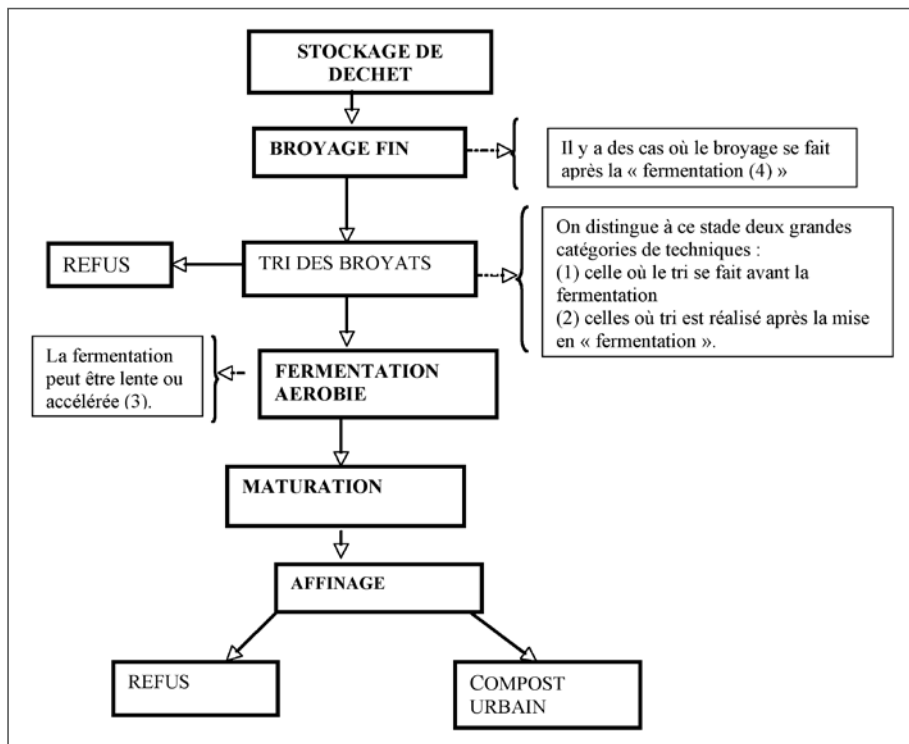


Figure 9 : Étapes de compostage industriel des ordures ménagères.
 Source : Mustin, 1987 et notre analyse propre

Trois filières de compostage industriel parmi les quatre qui sont représentées sur la figure n° 9 mettent le broyage presque au début de la chaîne de traitement. Ces techniques présentent l'inconvénient majeur que les

éléments indésirables peuvent être broyés et dispersés dans la masse des déchets, ce qui rend leur tri très difficile après cette opération. Bien plus, il y a un risque de diffusion des métaux lourds dans la matière organique à composter, notamment après l'éclatement des piles et des batteries.

Ces procédés de traitement ne sont pas adaptés à la nature des déchets des villes africaines très humides ou très riches en sable comme c'est le cas des villes sahéliennes et côtières. En effet, plusieurs auteurs s'accordent sur le fait que les usines de compostage installées dans les villes africaines n'ont pas fonctionné plus de 6 ans après leur mise en place. Ce bilan négatif du fonctionnement des usines de compostage des ordures ménagères en Afrique est attribuable en premier lieu à une inadéquation des procédés aux spécificités des ordures ménagères et en second lieu à l'absence d'études de marchés préalables du compost. Enfin, la maintenance et le suivi technique sont insuffisants [Rajaomanana, 1996; Wass *et al.*, 1996; Gillet, 1985].

- quelques réalisations des villes des pays en développement

Beaucoup d'installations industrielles de compostage ont été réalisées dans les villes en développement, principalement au Brésil et dans les pays du Moyen-Orient. C'est en Afrique du Nord qu'on a enregistré le plus d'usines ayant fonctionné sur une période non négligeable.

Au Maroc par exemple, une usine pilote d'une capacité de 50 tonnes/jour a été construite à Rabat en 1962. Cette ville bénéficie de la présence de maraîchages dans sa banlieue (1 350 ha de maraîchages irrigués, 3 470 ha non irrigués et 2 400 ha d'orangers). L'ensemble se situant dans un rayon de moins de 40 km. Dans ce contexte, il existait un marché local pour le compost. La capacité de cette usine a été portée à 200 tonnes/jour en 1971. Trois autres usines de même type que celle de Rabat ont été installées au Maroc entre 1964 et 1980, notamment celle de Tétouan (50 tonnes/jour), Marrakech (140 tonnes/jour) et Meknès (230 tonnes/jour) [Benani, 1987]. En 1987, ces usines étaient toutes en fonctionnement intermittent et généralement en deçà de leurs capacités nominales. D'après Benani (1987), cette situation est causée en grande partie par la méthode de gestion de ces unités qui est la régie directe, ce qui entraîne des problèmes de renouvellement des équipements et d'écoulement du compost, malgré l'existence d'un marché potentiel. L'usine de Casablanca (700 tonnes/jour), installée en 1976 n'a pas fonctionné plus de 3 mois à cause de l'inadaptation du procédé utilisé à la nature des ordures de la place.

Au vu des insuffisances relevées ci-dessus, en association avec la municipalité de Meknès au Maroc, l'ANRED avait commencé à mener depuis 1988 des recherches pour proposer des modes de traitement des déchets compatibles avec la qualité des ordures ménagères de ce pays [Anonyme, 1995]. Ces études ont conduit à la mise au point d'une filière simplifiée

de compostage des ordures ménagères d'abord au sein de l'usine de Rabat-Salé au Maroc. La deuxième étape de cette étude a été conduite par l'ADEME à partir de 1992. Cette deuxième étape a consisté à concevoir la filière de compostage (tableau n° 10) la mieux adaptée aux spécificités locales (qualité des ordures ménagères, gestion et maintenance des équipements, marché local de compost).

Tableau 10 : Amélioration des procédés de compostage en vue de les adapter à la nature des déchets des villes marocaines

N°	Type process	Première phase	Deuxième phase	Troisième phase	Quatrième phase
1	Méthode classique	Broyage	Tri	Fermentation	Maturation et stockage
2	Adaptation « usine de Meknès »	Tri	Fermentation	Broyage	Maturation et stockage
3	Adaptation en cours à l'usine d'Agadir	Fermentation	Tri	Stockage	En cours de développement

L'originalité selon les auteurs du procédé utilisé dans l'usine d'Agadir réside dans la mise en andains pour une fermentation lente des ordures ménagères brutes sans broyage ni criblage préalable. Dans les procédés (2) et (3) de la figure n° 9, la phase de broyage des ordures brutes est supprimée pour éviter la formation d'une pâte par écrasement de matériaux très humides pouvant entraîner le colmatage des trémies, le bourrage et la formation d'abondantes quantités de jus malodorants.

D'autres unités de compostage industriel ont été installées :

- À l'île Maurice où l'usine d'une capacité de 40 tonnes/jour construite en 1965 a arrêté ses activités en 1970 à cause de la mévente du compost, non pas par manque de débouchés mais en raison de la qualité du compost. Le manque d'étude préalable était à l'origine de cet échec [Colardeau, 1976].

- Au Sénégal, une usine a été installée à Dakar en 1968 et a fermé deux ans plus tard. La présence de sable dans les ordures a altéré les broyeurs pour lesquels il n'y avait pas de pièces de rechange.

- Au Brésil, certaines unités de compostage ont résisté plus longtemps, à cause d'une recherche permanente de qualité/prix et d'une publicité soutenue auprès des utilisateurs de compost. L'usine de Sao-Paulo par exemple a multiplié ses résultats de vente par six entre 1978 et 1988, en réduisant le prix de vente de compost de 22 à \$5 et en faisant une publicité auprès des cultivateurs [Guaraldo, 1987] cité par [Rajaomanana, 1996].

Dans les usines de compostage d'ordures ménagères implantées dans les pays en voie de développement, outre les problèmes d'exploitation (forme de gestion de l'usine) et les problèmes techniques (inadéquation entre la nature, la composition des déchets et les techniques utilisées, maintenance, etc.), c'est la mévente du compost qui constitue l'une des raisons essentielles de leur échec.

Ainsi avant d'entreprendre la construction d'une installation de compostage, il est donc impératif :

- de connaître la technique la mieux adaptée aux déchets à traiter et aux conditions économiques et techniques locales ;
- d'effectuer une étude de marché comprenant le débouché du compost, les qualités du produit demandé par l'utilisateur et le mode de commercialisation à mettre en place.

Pratique de la méthanisation dans les pays en développement

Avant de passer en revue les différentes expériences de méthanisation qui ont fonctionné dans les villes des pays en développement, il est important de donner d'abord quelques fondements théoriques de ce procédé de traitement. D'ores et déjà, il faut rappeler qu'aucune unité industrielle de traitement des ordures ménagères par méthanisation n'a fonctionné dans un pays en développement jusqu'à ce jour, alors qu'il en existe plusieurs dizaines en Europe.

Aspects théoriques de la méthanisation

Il est présenté ici le processus de dégradation anaérobie, les facteurs pouvant influencer ce processus et aperçu sur les techniques de méthanisation des substrats organiques.

Le processus de dégradation anaérobie

La digestion méthanique se réalise dans des conditions d'environnement bien précises, notamment avec un potentiel d'oxydo-réduction bas, un pH voisin de la neutralité et l'absence d'oxygène [Moletta, 1993]. Elle se réalise en trois étapes (figure n° 10) :

- la phase d'hydrolyse par laquelle les macromolécules organiques se trouvent décomposées en composés chimiques plus simples ;
- la phase d'acidogénèse qui conduit à la formation d'acides gras volatils ;
- la phase de méthanogénèse qui est la phase ultime de production du méthane à partir des acides gras, du gaz carbonique et de l'hydrogène (en très petite proportion), qui proviennent des étapes précédentes.

Elle résulte de l'activité des bactéries acétogènes et des bactéries méthanogènes proprement dites.

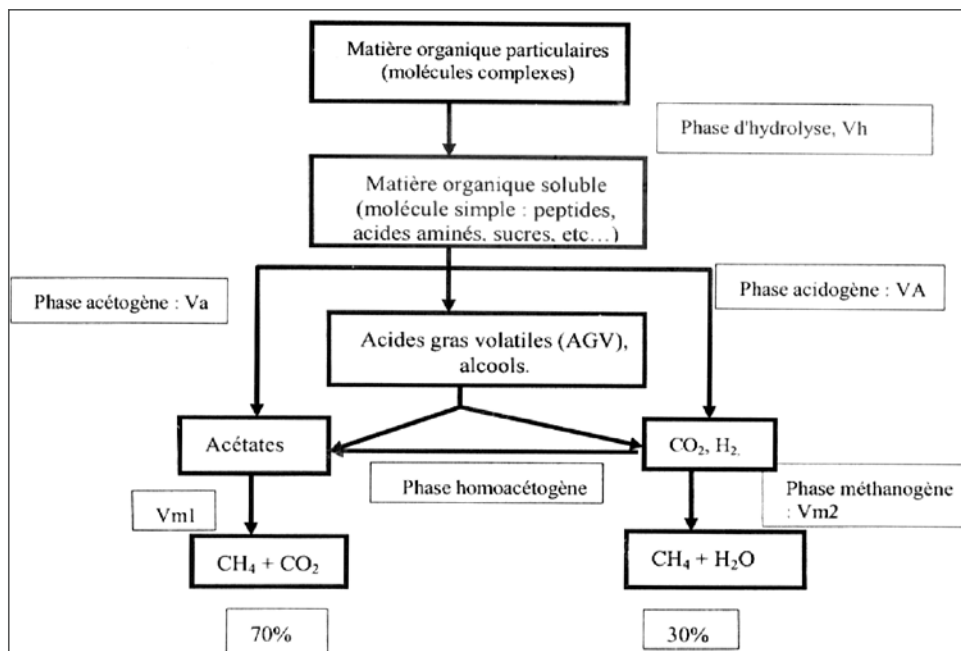


Figure 10 : Étapes biochimiques de la digestion anaérobie
[Hédit, 1993; De La Farge, 1995]

On a : $V_h < V_{m1} < V_a < VA < V_{m2}$, ces valeurs représentent les vitesses de réaction de chaque phase. Dans la première phase d'hydrolyse et d'acidogénèse, les macromolécules sont hydrolysées en monomères aux côtés des autres molécules simples. Elles seront transformées principalement en acides gras volatils, en alcool, en acide organique, en hydrogène et en gaz carbonique.

L'étape d'acétogénèse quant à elle transforme les composés « métaboliques » intermédiaires en acétates, hydrogène et gaz carbonique grâce à l'action des bactéries. Les bactéries méthanogènes métabolisent principalement l'acétate, l'hydrogène et le gaz carbonique. La phase de méthanogénèse est plus lente et elle peut conduire à une accumulation d'acide gras qui augmenterait l'acidité du milieu. C'est pour cette raison que l'évolution du pH doit être régulièrement contrôlée lors du processus de méthanisation pour éviter le blocage du processus. Les autres paramètres

pouvant influencer le processus de méthanisation sont : la température, la composition du substrat, l'humidité, le potentiel oxydo-réduction.

Les principaux paramètres influençant le processus de méthanisation

[Rajaomanana, 1996; Héduit, 1993; de La Farge, 1995]

Le tableau n° 11 présente les principaux paramètres pouvant influencer le processus de méthanisation en réacteur.

Tableau 11 : Paramètres pouvant influencer le processus de méthanisation

Paramètres	Présentation	Valeurs maximales	Valeurs minimales
Teneur en eau	Rapport de la différence du poids sec et du poids humide sur le poids humide	Plus de 95 %	70 % (le processus s'arrête si <10 %)
Température	Elle varie en fonction de la composition des déchets		35°C (valeur optimale)
Charge organique	Proportion de la matière organique fermentescible dans le substrat	Éviter de surcharger	Risque d'acidification du milieu
pH	Permet de contrôler le processus biochimique du compostage	8 (valeur optimale 7)	6,5 (valeur optimale, 7).
Rapport C/N [de La Farge, 1995]	Mesure la vitesse de décomposition de substrat en cours du compostage	30	20

La présence de nickel est indispensable à la croissance des bactéries méthanogènes. Il est démontré que d'autres métaux à l'état de traces stimulent la méthanogénèse (fer, cobalt, molybdène, sélénium et tungstène). Il est cependant difficile de définir les concentrations optimales requises. Car dans le milieu de méthanisation, ces métaux sont précipités par des ions hydroxydes et sulfures, ou fixés par des chélateurs, ce qui les rend indisponibles pour les bactéries. Aussi la concentration réelle disponible est mal connue. Les concentrations employées en général dans les milieux de culture sont de 10 mg/l pour le fer, 5 mg/l pour le cobalt, 0,1 mg/l pour le nickel, molybdène et sélénium.

Caractéristiques du biogaz

Le biogaz peut être caractérisé par deux paramètres principaux : sa composition et sa valeur énergétique.

Le biogaz est un mélange de méthane (CH₄) combustible et de gaz carbonique (CO₂) inerte. Les proportions relatives de ces gaz dépendent de la nature du substrat fermenté. Le biogaz final est plus riche en méthane (65 à 70 %) lorsque le produit est riche en azote (lisiers de porc, fientes de vo-

lailles), il ne contient par contre que 55 à 60 % de méthane lorsqu'il est issu de la fermentation du fumier de vache pailleux plus pauvre en azote.

De même, en fonction de la qualité du substrat, le gaz peut contenir plus ou moins d'hydrogène sulfuré (H_2S). Moins de 0,3 % pour les fumiers de bovin, il est de l'ordre de 0,7 % pour les lisiers de porcs et 1 % pour les fientes de volaille. La composition moyenne de biogaz est la suivante (tableau n° 12).

Tableau 12 : Composition moyenne du biogaz par type de substrat

[de La Farge, 1995; Brula et al., 1995]

Composant	Déjections animales	Ordures ménagères
CH_4	50 - 90 %	50 - 60 %
CO_2	10 - 40 %	40 - 60 %
H_2	1 - 3 %	< 0,5 %
N_2	0,5 - 2 %	-
H_2S	0,1 - 0,5 %	200 à 2 500 ppmv
CO	0 - 0,1 %	-

Dans le cas des ordures ménagères, en dehors de ces principaux gaz, le biogaz contient de la poussière et beaucoup d'autres gaz sous forme de trace, dont certains sont responsables des mauvaises odeurs (c'est principalement H_2S qui est malodorant).

La valeur énergétique du biogaz

Le pouvoir calorifique d'un combustible est la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète de l'unité de masse ou de volume de combustible. On parle de pouvoir calorifique inférieur (PCI) lorsque l'eau produite par cette combustion reste à l'état de vapeur. Le tableau n° 13 ci-dessous donne les caractéristiques du méthane qui est le principal combustible du biogaz dans les conditions normales de température et de pression (0°C et 1 atmosphère).

Tableau 13 : Caractéristiques du méthane (0°C, pression 1 atm)

[Héduit, 1993]

Caractéristiques	Valeur	Unité
PCI	9,94	kWh/m ³
Masse volumique	0,71	kg/m ³
Densité par rapport à l'air	0,55	
Limite d'inflammabilité dans l'air	7 à 14 %	
Température de liquéfaction	- 161,6°C	

À partir de ces valeurs de base, on peut calculer le PCI du biogaz si l'on connaît sa teneur en méthane. Par exemple, un biogaz avec 60 % de méthane a un PCI de 5,65 kWh/Nm³ (mesuré à 15°C et à la pression atmosphérique).

Aperçu sur les technologies de méthanisation existant dans les pays en développement

La méthanisation contrôlée se déroule à l'intérieur des réacteurs dont la conception et la taille sont fonction de la nature et de la quantité de substrat à traiter. Mais d'une manière générale, les digesteurs peuvent être classés en trois grandes catégories :

- les digesteurs discontinus ;
- les digesteurs semi-continus ;
- les digesteurs continus.

On parle de « fermentation continue » lorsque le contenu du digesteur est renouvelé par partie régulièrement et de « fermentation discontinue » lorsque le digesteur est chargé en une seule fois et que la fermentation est prolongée jusqu'au quasi-épuisement du substrat (la production de biogaz devient très faible).

- les digesteurs discontinus

Un digesteur de ce type a été réalisé au Burkina Faso par le CIEH [Héduit, 1993]. Ces réacteurs discontinus sont caractérisés par un cycle en 3 temps pour leur fonctionnement : une période de charge, une période de fermentation jusqu'à ce que la production soit faible, une opération de déchargement.

Ces réacteurs sont adaptés aux produits solides tels que les fumiers et les ordures ménagères. Le processus est lent et irrégulier et il convient d'utiliser des batteries de cuves pour maintenir une production de gaz constante [De la Tore Lozano, 1979]. Trois réacteurs au minimum sont né-

cessaires pour obtenir une production continue de gaz. Ces réacteurs peuvent être enterrés ou hors sols. En 40 jours, on peut obtenir un rendement volumique moyen sur la période de 1 m^3 de biogaz/ m^3 de réacteur/jour [Héduit, 1993].

- les digesteurs semi-continus

Les digesteurs rencontrés ici sont de type indien ou chinois. Ils sont caractérisés par :

- un chargement aléatoire en qualité et quantité de substrat ;
- une évacuation en continu des digestats ;
- la nécessité de les arrêter (environ tous les ans) pour les nettoyer.

Ils sont adaptés à des effluents liquides ou solides à faible teneur en composés ligno-cellulosiques. Les digesteurs semi-continus sont généralement enterrés. Le produit à fermenter est introduit régulièrement, et un volume équivalent du digesteur est chassé vers un réservoir. Le temps de séjour hydraulique est long (parfois plus de 100 jours). Ces digesteurs présentent l'avantage d'une grande simplicité, car pouvant être réalisé directement par les bénéficiaires avec des matériaux de proximité (brique de terre) et il y a absence d'équipements mécaniques.

Cependant, ce type de digesteur stocke une quantité importante de boue qui, au fil de temps, diminue le volume utile du réacteur et le temps de séjour de l'effluent. Ils nécessitent donc un curage régulier. Les performances de ce réacteur sont inférieures à $0,5 \text{ m}^3$ de biogaz/ m^3 de digesteur/jour.

- les digesteurs continus

Les digesteurs continus les plus fréquents dans les pays en développement sont de type piston. L'Institut de Recherche Agronomique Tropicale (IRAT) aujourd'hui (CIRAD) a développé un réacteur « Transpaille » utilisant le procédé piston et adapté pour la méthanisation des résidus de récoltes. Ces réacteurs ont été largement utilisés à titre démonstratif en Afrique de l'Ouest [Ndiaye, 1996].

Les caractéristiques communes des digesteurs rencontrés ici sont l'absence d'un système d'agitation de substrat. Ils sont de faible taille (10 à 50 m^3) et ne sont pas en général chauffés.

Les expériences de méthanisation de substrat à forte charge de matière sèche dans le monde, en Afrique et au Cameroun

Cinq usines de méthanisation des déchets ménagers ont été recensées en Europe en 1992 [Solagro, 1993]. Elles traitent entre 3 000 et 55 000 tonnes de déchets organiques par an. En 1992, deux nouvelles unités ont été mises en service : il s'agit de l'usine de Tilburg aux Pays-Bas qui utilise le procédé Valorga et de l'usine de Salzbourg en Autriche qui utilise le

procédé OWS. F. Cecchi *et al.* (1988) signalaient déjà l'existence des unités industrielles de traitement conjoint de boue des stations d'épuration et des ordures ménagères à Ballaria en Italie (80 tonnes par jour) et dans la commune de Bergamo (38 tonnes par jour). D'autres unités ont été projetées dans certaines régions d'Italie, mais n'ont pas été réalisées.

En Afrique et dans les pays en voie de développement, les expériences de méthanisation qui se sont développées ont surtout porté sur les résidus de récolte et d'élevage. Les unités qui ont été installées sont à l'échelle de la famille ou de la communauté villageoise et sont implantées dans les zones rurales pour satisfaire aux besoins d'éclairage et de cuisson des aliments. Ces projets de méthanisation en Afrique sont surtout venus en appui à la lutte contre la désertification dans les pays du Sahel. C'est pour cette raison que la plupart des unités connues ont été développées en Afrique de l'Ouest.

Le cas du Cameroun [Minka et Nzié, 1983]

Un programme « biogaz » a été développé par le Centre National d'Études et d'Expérimentation du Machinisme Agricole (CENEEMA) depuis 1979. Ce programme avait pour objectif de mettre à la disposition du monde rural, à partir des ressources localement disponibles, de l'énergie fournie par le biogaz et l'amendement organique provenant du compostage des digestats.

De 1979 à 1983, le CENEEMA a construit au Cameroun 29 installations de biogaz implantées dans presque toutes les régions du pays. Les provinces du Nord-Ouest et du littoral détenaient à elles seules 17 installations. Trois modèles de digesteur, dont la capacité varie entre 1 et 10 m³, ont été testés dans ce programme :

- Le modèle chinois ;
- Le modèle indien ;
- Le modèle allemand (Darmstadt).

Aucun des trois modèles n'a été adapté aux conditions du milieu rural camerounais. En effet, le modèle chinois a posé beaucoup de problèmes d'étanchéité et de pression de gaz qui n'était pas constante. Le modèle indien a dû être abandonné à cause des difficultés de vidange. Quant au modèle allemand (Darmstadt), il y avait régulièrement un problème de blocage de l'agitateur mécanique, surtout après un arrêt prolongé du digesteur. En plus, ce modèle coûte plus cher que les autres.

Pour faire face à ces difficultés, le CENEEMA a mis en place un nouveau modèle qui fait la combinaison entre les modèles indien et Darmstadt. Plusieurs prototypes de ce digesteur ont été installés dans le pays : ils ont fonctionné pendant près de quatre années dans les fermes privées.

Deux digesteurs ont été aussi installés à l'hôpital de Mbandjoun et de Bali. Le bilan de ces installations en 1983 (4 ans après leurs installations) était le suivant :

- 50 % en bon état de fonctionnement ;
- 30 % arrêté à cause du manque d'entretien régulier ;
- 20 % en arrêt de fonctionnement pour d'autres raisons.

Suite à la difficulté financière qu'a connu le Cameroun depuis 1985, ce programme a été arrêté sans avoir pu développer l'aspect utilisation du biogaz. Cependant, on a pu noter dans les premiers essais que les fermiers souhaitaient en dehors des besoins de cuisson utiliser le biogaz pour la production d'électricité, le chauffage des poussins et la réfrigération.

Le cas du Mali [Bengaly et Diara, 1997]

C'est à partir de 1984 que le programme biogaz a été lancé au niveau de l'Atelier technologique de Sira Kéfé au Mali. De 1984 à 1995, 70 digesteurs ont été réalisés avec la formation de plus de 200 stagiaires ruraux, dont 12 spécialistes villageois. Le digesteur chinois qui a été utilisé répond bien aux réalités rurales maliennes. L'objectif du programme biogaz au Mali était de satisfaire aux besoins d'éclairage et de cuisson à travers de petites unités familiales ou communautaires au niveau des villages.

Comme au Cameroun, les unités de biogaz n'ont pas fonctionné longtemps après l'arrêt des programmes qui les ont mis en place. Quatre difficultés majeures ont été identifiées comme origine de l'arrêt de fonctionnement des digesteurs installés dans ce pays :

- La défaillance du système d'entretien : une majeure partie de digesteurs est arrêté à cause de pannes minimes (tuyau d'alimentation percé ou cassé) ;
- La mauvaise information du public : le digesteur de la maternité de Doumanaba a dû être arrêté parce qu'un médecin de passage dans le village a dit aux infirmiers que la lumière du biogaz dégage un gaz nocif pour la santé du nouveau-né ;
- Le manque d'organisation des comités dans les villages, et surtout le manque de motivation des responsables chargés de la gestion et de l'alimentation du digesteur qui a abouti dans certains centres à l'arrêt du digesteur par manque de substrat à méthaniser ;
- Certaines installations communautaires ont été récupérées par des privés (directeur d'école du village, etc.), ce qui occasionne le désintéressement des villageois.

Le cas du Burkina Faso [Héduit, 1993]

Les premiers travaux sur la méthanisation ont débuté en 1976 grâce au soutien du Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques (CIEH), de l'IRAT

avec le financement du COMmissariat à l'Énergie Solaire (COMES). Dans le cadre de ce programme, plusieurs digesteurs ont été réalisés et les essais agronomiques ont été effectués sur les digestats.

Pendant la mise en œuvre de ce programme, des difficultés rencontrées sont d'ordres technologiques et socioculturels :

- fuite de gaz au niveau du digesteur, fissuration du digesteur, surcharge de la cuve, etc. ;
- absence de structure capable de gérer l'unité de biogaz ;
- la non-disponibilité de la matière organique à proximité de l'installation ;
- l'éloignement du point d'eau nécessaire pour l'immersion de la matière organique ;
- le manque de motivation des utilisateurs qui préfèrent le bois qui est récolté gratuitement ;
- l'absence de suivi technique et de maintenance des équipements ;
- l'insuffisance du personnel d'encadrement et l'absence de formation des utilisateurs.

Les autres pays d'Afrique de l'Ouest

Au Bénin, l'expérience de production de biogaz a démarré en 1983 avec la construction d'une unité expérimentale du type chinois sur financement de la FAO (Organisation Mondiale pour l'Alimentation) : 11 unités ont été développées dans le cadre du projet « création et développement d'unité de biogaz » démarré en 1987. Ces unités ont une capacité de 10 m³ chacune et produisent en moyenne 3 m³ de biogaz par jour. Elles étaient encore fonctionnelles en 1990 [Héduit, 1993].

Au Togo, les recherches sur le biogaz ont commencé en 1979 à l'université du Togo (École d'agronomie). En 1989, trois unités ont été réalisées à Avelon (50 m³) et à Mango (10 m³) chez les paysans et elles fonctionnaient correctement. Il a été prévu de construire 25 unités de 10 m³ chacune dans le reste du pays [Héduit, 1993].

Au Niger, le programme biogaz a démarré en 1980 avec l'installation pilote de Lossa, composée de trois digesteurs de 5 m³ et de deux gazomètres. D'autres unités ont été par la suite installées dans 4 villages : elles ont une capacité de 5 à 60 m³.

Au Tchad, une unité pilote Transpaille a été expérimentée avec succès par la faculté des Sciences de l'université de Djamena. Elle traitait des déchets d'abattoirs et de marchés de la ville de N'Djamena [Bintou, 1995].

La méthanisation des substrats organiques doit prendre en compte plusieurs paramètres tels que la composition du substrats (C, N, P, S, etc.), le pH, la température, la présence d'éléments toxiques.

Quant au choix des technologies à adopter, il faut retenir que les procédés industriels ont l'avantage d'obtenir une productivité en gaz élevée. Cependant, leur adaptation aux pays en voie de développement reste limitée aux investissements élevés qu'il requiert.

Les expériences de méthanisation réalisées en Afrique sont presque toutes issues des programmes financés par les bailleurs de fonds internationaux. Pour la plupart, les unités implantées n'ont pas survécu après l'arrêt des subventions. On peut aussi constater que, dans tous les pays africains, il n'y a pas eu d'étude de faisabilité sérieuse avant la mise en place de ces installations. Souvent, les types de digesteurs sont retenus au préalable sans que la quantité de substrat disponible soit bien connue, encore moins les besoins énergétiques des utilisateurs potentiels, notamment leurs besoins en énergie de production.

FINANCEMENT DE LA GESTION DES DÉCHETS

Le véritable problème qui se pose à un élu lorsqu'il faut choisir un système de traitement des déchets municipaux est celui des coûts des investissements de base nécessaires à la mise en place du système et du coût de revient à la tonne de déchets traités. Les bénéfices environnementaux sont simplement vus sous l'angle de la sauvegarde de la salubrité publique. Bien que les autres aspects environnementaux soient non négligeables, surtout pour l'environnement local et planétaire, force est de constater qu'ils ne constituent pas jusqu'alors le facteur déterminant de décision dans le contexte des pays en développement.

Au Cameroun et à titre d'exemple, on constate que, pour les élus locaux, l'idée de déchet est très contrastée. L'idée que les déchets urbains en général constitueraient une source de richesse reste ancrée chez certains élus, qui pensent dès lors qu'il faudrait juste mettre en des équipements de base pour produire de la richesse à partir des déchets. Pour les défenseurs de cette thèse, le déchet serait alors une matière première qu'on pourrait « éventuellement vendre » à un industriel qui la transformerait en produits secondaires¹¹. Ce point de vue est même partagé par une partie des experts gouvernementaux qui, dans le rapport de la deuxième commission interministérielle sur l'enlèvement des ordures ménagères, concluent par exemple, en ce qui concerne le compostage, que : « l'activité de compostage sera laissée à l'initiative des sociétés privées, mais devra recevoir l'appui concret des pouvoirs publics par la mise à disposition de

11 À cet effet, la SNI (Société Nationale des Investissements) a commandé une étude en 1994, dont l'un des objectifs était de rechercher des solutions pérennes au problème des ordures, entre autres, grâce à des approches nouvelles capables d'autofinancement partiel ou total.

site et par l'enlèvement des refus... ». Cette situation montre une mauvaise connaissance de la part de ces élus, une mauvaise connaissance des coûts réels des différents services de déchets et des contraintes associées. Par contre, certaines municipalités perçoivent l'ampleur du problème; mais elles sont débordées par les problèmes et paralysées par la faiblesse de leurs moyens financiers. Elles préfèrent alors consacrer leurs maigres ressources aux charges incompressibles (salaires, entretien des bâtiments communaux, etc.).

Dans cette partie de l'ouvrage, l'objectif est de d'explorer à partir des études de cas comment les villes africaines font face au financement de la filière de gestion des déchets. Comme on pourra le constater, cette filière constitue un goulot d'étranglement pour toutes les villes. Le mode de financement de la filière déchet diffère d'un pays à l'autre et d'une ville à l'autre. Mais dans l'ensemble, trois cas de figure se présentent :

- le financement indirect à travers les taxes et redevances perçues par l'État au bénéfice des communes;
- le financement indirect à travers les redevances indexées sur les factures d'électricité ou d'eau potable;
- le financement direct par les producteurs (ménages, commerçants, entreprises, etc.) : redevance.

Pour tous ces modes de financement, le premier principe directeur du système est que tout producteur est responsable des déchets qu'il produit, cette responsabilité n'excluant aucun type de déchets. Le second principe est celui du « pollueur-payeur ».

Ces principes appellent 4 exigences de la part des gestionnaires de la filière :

- connaître les coûts séquentiels réels, les coûts totaux suivant la technologie, les besoins de financement et les économies réalisables par la rationalisation de la filière;
- connaître la capacité contributive de la municipalité à la gestion des déchets solides;
- analyser les revenus et dépenses monétaires des ménages en rapport avec la contribution fiscale par habitant et le coût de gestion des déchets par habitant;
- initier la création et la gestion du Fonds spécial de gestion des déchets solides.

Les besoins de financement de la filière

Pour bien connaître les besoins de financement, il faut avoir un certain nombre de données de base dont les plus importantes sont les suivantes :

- La population totale de la ville à desservir et son évolution dans le temps;
- La production totale des déchets par catégorie et en fonction des saisons;
- Une analyse de l'évolution de la production des déchets dans le temps et dans l'espace;
- Une analyse des caractéristiques physiques des déchets et de leur dangerosité en fonction des producteurs;
- Une analyse des moyens de collecte, de transport et de traitement en fonction des caractéristiques urbanistiques de la ville et des ressources mobilisables par la commune.

En conclusion, une étude de faisabilité devrait être réalisée pour avoir de façon détaillée une analyse du coût de chaque maillon de la filière (pré-collecte, collecte, transport, traitement et mise en décharge). À chaque étape du système, des alternatives doivent être proposées afin de permettre un choix optimal qui privilégie les intérêts des communes (nombre d'emplois créés, coût réduit, etc.). Cette étude devrait déboucher sur le coût de gestion des déchets suivant la filière envisagée et les possibilités de financement de la commune.

Une étude comparative du mode de gestion urbain dans neuf villes africaines effectuée par l'Agence Française de Développement (AFD) en 2001 montre que la gestion des déchets solides dans les 9 villes mobilisent une dépense publique et privée comprise entre 0,7 € par habitant à Bobo-Dioulasso au Burkina Faso, à Louga au Sénégal et par an, et 7 € par habitant et par an à Fès au Maroc. Rapporté à la tonne de déchets enlevés, cette dépense varie entre 4 € par tonne à Bobo et 36 € par tonne à Fès. Mais ces coûts sont consacrés beaucoup plus à la collecte et au transport qu'aux autres séquences de la filière, la mise en décharge étant presque absente dans la plupart des villes. Le coût de collecte, transport et mise en décharge est de 24,4 € par tonne à Yaoundé et 74,7 € par tonne à Libreville (tableau n° 14).

Tableau 14 : Budget par habitant et dépenses de gestion des ordures ménagères

[AFD, 2001; Ngnikam, 2000; Adegnika et al., 2002]

Villes	Budget/habitant (€)	Prix de revient de la tonne d'OM (€)	% budget déchets/budget total
Conakry (1999)	2	6	63 %
Accra (2000)	4	6,5	58 %
Bobo Dioulasso (2000)	5,2	4	10 %
Louga (2000)	5,2	4	11 %
Ouagadougou (2000)	7	7	8 %
Dakar (1999)**	16	15	21 %
Fès (1998)	18	36	22 %
Rabat (1998)	19	27	16 %
Agadir (1998)	33	33	16 %
Yaoundé (1999)*	7,9	24,4	40 %
Libreville (2001)**	15,5	74,7	60 %

(* supporté à 80 % par la subvention de l'État; ** supporté entièrement par la subvention de l'État)

On constate que les villes les plus pauvres (en terme de budget par habitant) sont aussi celles où le prix de revient de la tonne est le plus faible. La différence ne vient ni d'une différence dans la qualité de service (qui ne change pas fondamentalement avec la richesse de la ville), ni d'une différence des coûts des intrants entre les différentes villes. Ce résultat montre que la plupart des villes doivent encore faire des efforts pour rationaliser les coûts de gestion des services déchets. Une analyse approfondie du cas de Libreville par exemple montre qu'on pourra, en changeant le système de facturation (à la tonne et non à la journée de travail), faire chuter le prix de revient de la tonne d'ordures enlevés de 74,4 €/tonne à 36,6 €/tonne [Adegnika *et al.*, 2002]. De même à Yaoundé, on pourrait passer de 24,4 € par tonne à 17,53 € par tonne [Ngnikam, 2000].

La répartition des dépenses entre les différentes étapes de la filière n'est pas égale. Dans le cas de Yaoundé par exemple, les séquences de précollecte et de collecte absorberaient 68 % des dépenses (figure n° 11)

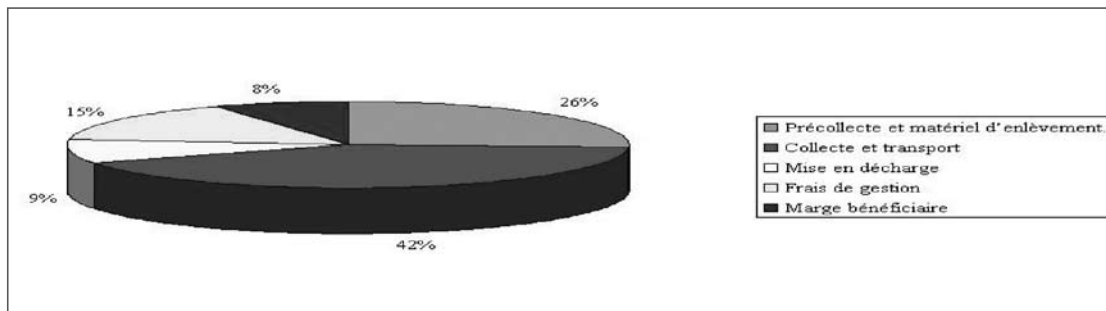


Figure 11 : Répartition du coût de revient du traitement des déchets suivant les différentes séquences du système de collecte traditionnelle [Ngnikam, 2000]

Comme on peut le constater dans la figure n° 11, dans le système de collecte traditionnelle, la séquence de collecte et de transport représente 42 % du coût de traitement des ordures ménagères. Cette charge est partagée à parts égales entre les frais d'amortissement et d'exploitation. Il a été retenu un délai d'amortissement des véhicules assez court (5 ans), à cause du mauvais état des routes. La séquence de précollecte représente environ 26 % du coût de traitement des ordures ménagères. C'est l'organisation d'un système de précollecte non conventionnel dans les quartiers spontanés qui est à l'origine de l'augmentation des coûts de la précollecte. Cette opération représente à elle seule presque 60 % des coûts de cette étape. La précollecte non conventionnelle dans les quartiers spontanés qui a été préconisée est la séquence la plus pourvoyeuse d'emplois, avec 288 emplois directs, contre 85 emplois seulement à la séquence de collecte et de transport et 17 emplois directs pour la mise en décharge. Les charges de fonctionnement du système (frais administratifs, frais de siège, etc.) ont été estimées à environ 15 % des coûts de traitement des ordures ménagères. L'étape de mise en décharge est la moins onéreuse, elle représente seulement 8 % des coûts de traitement des déchets. Avec un coût de revient hors taxe et hors frais généraux de moins de 1 000 FCFA/tonne, la mise en décharge des déchets représente le mode d'élimination le moins coûteux, mais il nécessite des capitaux importants. Il faut dire que le coût relativement bas de la mise en décharge se justifie ici par le fait que le site est exploité de manière sommaire, sans imperméabilisation du fond, sans récupération et traitement de lixiviats, ni de captage du biogaz. Par ailleurs, on n'intègre généralement pas le prix d'acquisition du site. Pour l'évaluation du coût de ce système, on a préféré prendre des hypothèses de calcul se rapprochant de la situation à Yaoundé.

Les mécanismes de financement envisageables pour la gestion des déchets

Trois sources de financement sont généralement utilisés : la taxation spécifique, les produits de la valorisation des déchets, la contribution des usagers.

L'analyse de chacune de ces sources de financement permet d'envisager le mécanisme le mieux approprié pour le financement durable de la filière dans chaque contexte. Sachant qu'il n'y a pas de mode de financement unique, on se limitera ici à la comparaison des différentes modes de financement mis en œuvre dans quelques villes dans des contextes spécifiés.

La taxation : les taxes ou redevances d'enlèvement des ordures ménagères sont instituées dans la plupart des pays africains pour permettre aux communes de faire face aux charges d'enlèvement et de traitement des ordures ménagères. Mais force est de constater que ces redevances ne produisent dans aucune ville des recettes en rapport avec la dépense de gestion des ordures ménagères. Dans la ville de Dakar au Sénégal par exemple, cette dépense est 2,4 fois supérieure au montant de la taxe d'enlèvement des ordures ménagères (TEOM). Elle l'est de 3 fois dans la ville de Louga et quasi nulle dans la ville de Ouagadougou au Burkina Faso. À Yaoundé, le montant de la TEOM représente moins de 10 % des coûts de gestion des déchets. À Accra, où la taxation n'est pas encore appliquée, les recettes liées à la gestion des ordures ménagères provenaient essentiellement des services vendus par la société concessionnaire et représentaient 6 % des dépenses globales en 1999 [AFD, 2002].

Seule la taxe d'édilité appliquée dans les villes marocaines (qui a pour objet de financer l'ensemble des services urbains) et, dans une moindre mesure, la taxe urbaine produisent des recettes qui se rapprochent et dépassent parfois la dépense de gestion des ordures ménagères. À titre d'exemple, à Fès, cette taxe a produit 2,6 fois le budget de gestion des ordures ménagères en 1998, tandis qu'à Rabat elle a juste couvert les besoins de financement du service déchet [AFD, 2002].

On peut constater que, dans les villes des pays d'Afrique au sud du Sahara, la TEOM dans les conditions actuelles de fourniture du service offre peu de perspectives. On ne pourra pas à terme envisager un meilleur rendement de cette taxe, car son assiette est faible et les montants à payer sont souvent sans aucune mesure avec les besoins de financement du service.

Les différentes études diagnostiques de la situation financière des communes, notamment celles réalisées par le PDM dans les villes des pays de l'UMOA, par la Coopération française dans quatre villes du Cameroun et par Adegnika et Ngnikam dans la ville de Libreville ont montré de grandes possibilités de gisements fiscaux réalisables à court terme et donc la

possibilité d'accroître les ressources financières des communes [PDM, 2001 ; Minat, 1996 ; Adegnika *et al.*, 2002]. Un bon fonctionnement de la filière fiscale repose sur une identification et une localisation aussi parfaite que possible des contribuables qui permette d'adresser les avis d'imposition. Certains outils comme le système d'informations foncières couplé au registre foncier urbain qui ont fait leur preuve dans les villes d'Afrique de l'Ouest peuvent être recommandés, mais il faudrait au préalable les adapter au contexte de chaque pays et de chaque ville.

La surtaxe sur la consommation d'électricité ou d'eau appliquée dans certaines villes africaines fait l'objet de débats dans plusieurs grandes villes. Une simulation sommaire effectuée dans les villes de Yaoundé et Douala au Cameroun et Libreville au Gabon [Adegnika *et al.*, 2002] montre que cette surtaxe peut permettre d'approcher ou de dépasser le budget de gestion des ordures ménagères. Mais son application, pour être efficace, doit tenir compte du niveau de revenu des ménages. Au Cameroun par exemple, les études ont montré que l'application d'un taux de surtaxe proportionnelle à la tranche de consommation électrique permettrait de tenir compte du niveau de vie par la baisse de la part supportée par les ménages pauvres. Cette surtaxe a déjà été appliquée dans la ville d'Abidjan en Côte d'Ivoire avec plus ou moins de succès depuis 1983. L'instauration d'une taxe sur la consommation d'électricité a permis dans la ville d'Abidjan en Côte d'Ivoire de mobiliser, entre 1998 et 2001, en moyenne 1,6 milliard de FCFA par an, représentant 13 et 26 % du coût global de gestion des déchets de la ville (encadré n° 5).

Encadré n° 5 : indexation du financement des déchets sur la consommation d'électricité à Abidjan (Côte d'Ivoire)

L'État a confié le financement de la collecte et de l'élimination des ordures ménagères à la Ville d'Abidjan à partir d'une source de revenus de nature fiscale. Ces revenus étaient constitués par des taxes rémunératoires et des redevances qui rétribuent un service rendu par la commune. Le produit des taxes rémunératoires et des redevances était insuffisant pour faire face aux dépenses liées à l'enlèvement des ordures ménagères des communes.

C'est dans ce contexte que la Taxe d'Enlèvement des Ordures Ménagères (TEOM) a été instituée pour financer l'une des dépenses obligatoires des communes liées au service d'enlèvement, d'évacuation et d'élimination des ordures ménagères.

Mais face aux difficultés rencontrées par les communes pour le recouvrement de cette taxe, celle-ci a été remplacée par une taxe sur la consommation domestique d'eau et d'électricité créée par l'article 4 de l'annexe fiscale à la loi n° 71-683 du 28 décembre 1971 portant loi de finances pour la gestion 1972.

.../...

L'article 27 de l'annexe fiscale à la loi n° 82-1157 du 21 décembre 1982 portant loi de finances pour la gestion 1983 a modifié le dispositif sus-cité en instituant une taxe rémunératoire pour l'enlèvement des ordures ménagères dont le montant, pour chaque client assujetti, est de :

- 2,5 FCFA/kWh d'électricité basse tension consommée à Abidjan;
- 1 FCFA/kWh d'électricité basse tension consommée dans les communes autres que celle composant la ville d'Abidjan.

Fonctionnement du système de financement global

Aujourd'hui, la ville d'Abidjan a la charge de rémunérer les services des sociétés à partir de son budget. Ce budget est financé par :

- Les taxes prélevées sur les factures d'électricité qui sont de 2,5 FCFA/kWh ;
- Les contributions des 10 communes provenant de :
 - La dotation spéciale attribuée par la Direction générale des collectivités territoriales (subvention de l'État);
 - La part communale des impôts fonciers et la patente.

Le financement des ordures ménagères est assuré par ailleurs par les précollecteurs qui mobilisent des fonds de manière informelle auprès des ménages (500 à 1 500 FCFA/mois par ménage abonnés à leur service).

Bilan financier des ressources mobilisées de 1998-2001

Le recouvrement des taxes d'enlèvement des ordures indexées aux factures de consommation d'électricité est assuré par la Compagnie Ivoirienne d'Electricité (CIE) qui assure également l'éclairage public de la ville d'Abidjan. Si théoriquement les taxes recouvrées permettent de couvrir les coûts de gestion des ordures ménagères, une compensation pour les charges d'éclairage public dues par la ville et les charges d'exploitation estimées à 15 % prélevées par la Compagnie fait que les recettes restituées ne permettent pas de faire face aux dépenses engendrées par la gestion des déchets à Abidjan.

Le montant total des ressources annuelles mobilisées les trois dernières années est donc resté insuffisant pour couvrir les besoins de la filière. Ce qui entraîne le recours aux plans d'urgence récurrents supportés par le budget de l'État (plan d'urgence en décembre 1998 d'un coût de 2 milliards de FCFA).

Tableau : Charges et ressources mobilisées en FCFA

Désignation/Année	1998	1999	2000	2001
TEOM basse tension *	1 577 933 000	1 615 902 000	1 694 708 000	1 694 708 000
TEOM moyenne et haute tension				1 458 200 000
Contribution des dix communes	3 078 877 000	7 234 720 000	9 295 673 000	9 160 000 000
Contribution de l'État à la Ville			342 008 000	
Montant mobilisé et dépensé**	3 078 877 000	7 234 720 000	9 637 682 000	
Charges de gestion des ordures	6 239 765 000	9 412 803 000	12 220 381 000	12 994 114 000

* Produit de la TEOM basse tension : Produit non reversé en raison de la compensation avec l'éclairage public effectué par la CIE.

** Montant total mobilisé : Ce montant ne prend pas en compte la basse tension qui n'est pas reversée par la CIE (Compagnie Ivoirienne d'Electricité).

.....

Points forts et points faibles de ce système de financement

Points forts

- La simplicité et l'efficacité de la méthode de recouvrement;
- La parfaite lisibilité pour le contribuable du mode de calcul et de l'affectation de la taxe.

Points faibles

- La consommation d'électricité n'est pas l'assiette la plus représentative du niveau de production d'ordures ménagères;
- L'absence d'imputation de la taxe nuit à la transparence de la gestion budgétaire des communes;
- Le produit de la taxe basse tension n'est pas reversé par la Compagnie Ivoirienne d'Electricité (CIE) qui en assure le prélèvement. Cette entreprise effectuant une compensation pour les sommes qui lui sont dues par la Ville d'Abidjan au titre de l'éclairage public;
- La non-disponibilité des ressources à temps et en totalité (importants arriérés de paiement des sociétés)

La contribution des ménages recouvrée par les précollecteurs n'est pas maîtrisée.

Source : Extrait de la communication de M. Adja S. à l'atelier régional de Cotonou sur « La gestion partagée des déchets dans les villes africaines », 9-11 juillet 2002.

Produits de la valorisation des déchets : Bien que des études détaillées n'aient pas été menées pour connaître les chiffres d'affaires générés par les diverses activités de valorisation de déchets, il est très improbable que les prélèvements supplémentaires auxquels ils pourraient être soumis puissent produire des recettes permettant de réduire significativement les coûts de fourniture de service.

Une étude des filières de recyclage des différents types de déchets urbains à Abidjan conduite par l'AFD en 1995 a montré que la valeur ajoutée dégagée par l'économie du secteur est estimée à 1 milliard de FCFA, le chiffre d'affaires à 1,9 milliard et les revenus nets à 946 millions.

Différentes expériences menées au Maroc (fabrication industrielle de compost), au Cameroun (fabrication artisanale de compost) et aux États-Unis (fabrication de compost, recyclage de plastique, papiers, verre, etc.) montrent que, si la valorisation des déchets est effectuée par les collectivités et même des petits opérateurs privés, elle ne génère que des recettes insignifiantes par rapport aux dépenses supplémentaires qu'elle nécessite.

La contribution directe des usagers : le financement de la filière de gestion des déchets par les usagers est mobilisé par le biais des abonnements auprès des opérateurs de collecte. Ce système est utilisé dans quelques villes d'Afrique de l'Ouest et du Centre. Il contribue significativement au financement de la gestion des ordures ménagères à Cotonou (30 %), Conakry (50 %), Ouagadougou (31 %). À l'exception de Conakry, où il finance aussi le transport des ordures ménagères pour 14 %, la contribution

des usagers se limite essentiellement pour le financement de l'étape de précollecte et d'équipement sommaire des « points de rupture de charge » des déchets. Mais d'une manière globale, ce système de financement reste marginal à cause du manque d'organisation du système et du caractère informel des actions qui sont menées. La situation de la ville de Conakry est un exemple type de financement directe de l'amont de la filière de collecte des ordures ménagères par les usagers (encadré n° 6).

Encadré n° 6 : L'amont de la filière de gestion des ordures ménagères à Conakry

La ville de Conakry qui couvre une superficie de 308 km² est peuplée de 1,2 million d'habitants. En 1996, la ville produisait environ 600 tonnes d'ordures ménagère par jour, mais moins de 20 % de ces déchets étaient collectés. Pour pallier à ce déficit, des réformes ont été faites et la plus récente a conduit à la création du PTGD (Programme Transitoire de Gestion des Déchets) dans le cadre du PDU3. Ce programme était financé par la Banque mondiale (1,1 milliard de francs guinéens) et il a permis de couvrir la ville en quatre années. Le système mis en place permettait de desservir 773 421 personnes en 2001. La fréquence de collecte est de deux fois par semaine pour les ménages. La facturation du service pour les ménages varie entre 1 000 et 5 000 francs guinéens par mois. Le taux de recouvrement est de 76 % pour les ménages et 90 % pour les entreprises.

La ville a été divisée en 39 secteurs de précollecte qui sont adjugés exclusivement par appel d'offres aux petits opérateurs (PME). Une zone de précollecte constitue une concession indivisible. Mais les places publiques et les marchés sont l'objet de concession spéciale.

Dans ce système, les communes assurent la maîtrise d'ouvrage, le gouvernorat la maîtrise d'ouvrage déléguée tandis que le ministère de l'Urbanisme, à travers le PDU3, est le maître d'œuvre. Les PME adjudicataires de zone de collecte bénéficient de l'encadrement technique du PTGD.

Dans ce système, le découpage de la chaîne de gestion et de responsabilités permet de gérer le système de collecte de déchets en période d'insuffisance de financement, dans la mesure où il fait intervenir le producteur directement dans le financement des actions de proximité comme la précollecte.

Il faut noter que, dans un tel système, la maîtrise d'ouvrage déléguée est difficile à organiser. Par ailleurs, la limite du système réside toujours dans la fragilité des PME (faible moyen technique et managérial) et le refus d'abonnement et de paiement par certains clients, d'où la difficulté de financement régulier des PME.

Source : Modi Mahy Barry, Communication à l'atelier régional de Cotonou sur « La gestion partagée des déchets dans les villes africaines », 9-11 juillet 2002.

Un des acteurs difficiles à mobiliser sont les opérateurs économiques du secteur informel qui produisent entre 10 et 15 % des déchets solides urbains dans les villes africaines. Une évaluation de la capacité contributive des ménages est nécessaire avant de fixer le niveau de redevance.

L'enlèvement payant des ordures ménagères par les charretiers individuels constitue une filière parallèle au service officiel dans la plupart des

viles. Mais les quantités enlevées par ces opérateurs reste marginal (1 % du gisement à Yaoundé).

Les expériences de paiement au bac (redevance demandée aux apporteurs de déchets aux bacs publics) ont montré à Accra et Ouagadougou le caractère contre-productif de ce système, qui incite les ménages à déposer leurs déchets partout ailleurs que dans le bac.

Chapitre 3

APPROCHES D'ÉVALUATION DE FLUX ET CARACTÉRISATION DES DÉCHETS

CE CHAPITRE PERMET DE DISTINGUER les approches conduisant à l'identification des déchets ménagers et non ménagers. Il développe les méthodes d'évaluation de flux et de caractérisation les plus utilisés de même que leur application dans les villes des pays en développement.

REVUE DES MÉTHODES D'ÉVALUATION DE FLUX ET CRACKTÉRISATION DES DÉCHETS MÉNAGERS

L'identification des déchets ménagers solides est caractérisée par son hétérogénéité. Cela signifie qu'un petit échantillon de quelques dizaines de centimètres cubes, qu'on retrouve souvent pour les eaux usées par exemple, n'aurait aucune chance d'être représentatif lorsqu'il s'agit des déchets solides. La taille importante des particules qui le composent en est la cause. En effet, un mélange banalisé des déchets solides collectés en poubelle ou en sac comporte des particules dont la taille peut varier de quelques fractions de millimètres à quelques dizaines de centimètres. La taille des particules peut alors varier dans une amplitude de 1 à 1 000. Par ailleurs, il faut noter que les déchets solides présentent par rapport aux autres déchets (liquides ou gazeux) un avantage certain : les particules qui les composent peuvent être identifiées à l'œil nu. Cette hétérogénéité des déchets solides obligera les opérateurs à prélever des quantités importantes (une dizaine à une centaine de kilogrammes) pour espérer avoir une représentativité de l'échantillon par rapport au gisement de départ. En plus de cela, il faudrait tenir compte de la variabilité de la nature et du gisement des déchets dans le temps et dans l'espace.

Les stratégies d'identification des déchets solides ménagers

Pour la caractérisation des déchets solides en général, on distingue deux stratégies : les stratégies directes et les stratégies indirectes.

Les stratégies directes consistent en un tri des déchets eux-mêmes, tandis que les stratégies indirectes consistent à identifier les biens qui deviendront déchets (stratégie amont) ou à analyser les sous-produits issus de traitements des déchets (stratégie aval).

La stratégie indirecte amont est très peu fiable à cause des durées de stockage plus ou moins importantes des biens de consommation et du fait que certaines informations sur les biens existant dans un territoire ne peuvent pas être obtenues à l'échelle locale.

La stratégie indirecte et aval n'est applicable que si une installation traite la totalité des déchets d'une agglomération. Le meilleur cas est celui d'une usine d'incinération, car la composition des sous-produits du traitement est beaucoup plus stable dans le temps que celle des déchets. Mais cette stratégie ne peut renseigner que sur la teneur en éléments chimiques stables des déchets de la zone desservie par l'usine.

Dans la stratégie directe, la plupart de temps, l'identification des déchets se fait après la collecte. Elle consiste à identifier une partie du contenu d'une benne de collecte qui contient plusieurs tonnes de déchets. Plusieurs méthodes existent pour procéder au choix d'un échantillon représentatif. Cette stratégie a été adoptée par plusieurs pays pour réaliser les enquêtes nationales d'inventaire des déchets.

L'identification des déchets peut aussi être faite à la source, c'est-à-dire auprès du producteur. Cette stratégie présente plusieurs avantages qui la rendent plus efficace que les autres :

- elle prélève les échantillons dès la production, lorsque le plus grand nombre de particules composant les déchets sont encore identifiables;
- elle permet de prélever de petits échantillons homogènes de chaque catégorie avant qu'elle ne soit souillée lors du stockage ou du transport;
- elle fournit des données sur les quantités de déchets à l'échelle du producteur, ce qui permet d'avoir un taux de production plus fiable.

Pour une campagne d'identification des déchets, le tri manuel est la méthode la plus performante pour effectuer une séparation des différentes particules composant le déchet. Mais dans certains cas, il faudra renoncer au tri manuel pour des raisons sanitaires (cas des déchets contaminés provenant des hôpitaux par exemple).

La détermination de la composition des déchets peut être influencée par le taux d'humidité. Il est souvent recommandé de faire une composi-

tion par rapport à la matière sèche, ce qui diminue l'effet de la fluctuation du taux d'humidité sur la composition final du gisement.

Conception d'une campagne d'identification

Suivant cette méthodologie, une campagne d'identification des déchets doit se réaliser en trois étapes importantes : la préparation de la campagne pendant laquelle on calcule la quantité minimale représentative (QMER), le choix d'une méthode d'échantillonnage et l'organisation de la campagne.

La préparation de la campagne

Une campagne d'identification des déchets doit être soigneusement planifiée, elle exige au minimum :

- Un premier essai pour se faire une idée des catégories de déchets afin d'opter pour une classification;
- Un second essai pour vérifier le choix judicieux des strates urbaines dont on suppose qu'elles fournissent des déchets ayant une faible dispersion des caractéristiques;
- Une précampagne pour recueillir les éléments nécessaires pour le calcul de la quantité minimale d'échantillon représentatif (QMER). Par

exemple pour la ville de Genève, le programme d'identification réalisé en 1986 comportait quelques jours pour réaliser les essais 1 et 2 et une semaine pour effectuer une précampagne de tri de 2 tonnes de déchets [Maestre, 1995]. La figure n° 12 présente l'organigramme d'une campagne d'identification des déchets ménagers.

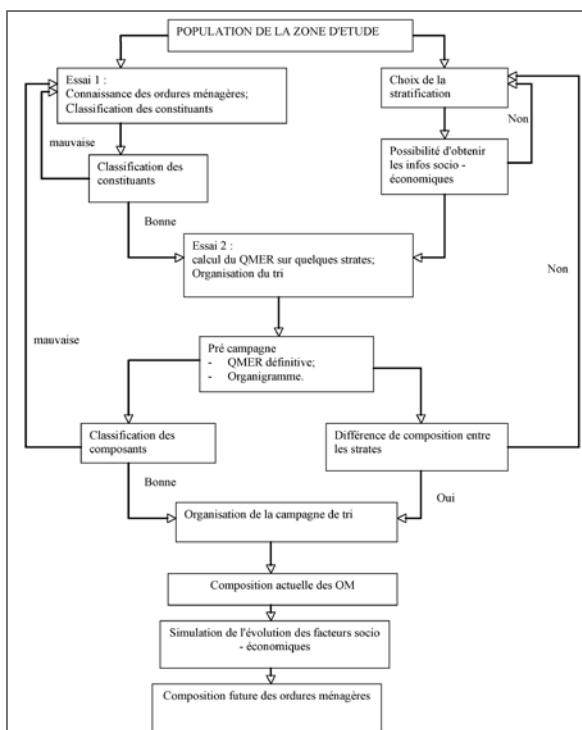


Figure 12 : Organigramme d'identification des déchets
[Maestre et al., 1995]

Stratification des zones d'apport des déchets

Pour accroître la représentativité de l'échantillon total, la méthode recommandée est celle de l'échantillonnage aléatoire stratifié qui est basée sur le postulat suivant : les facteurs socio-économiques, en particulier le type de l'habitat et d'activité, conditionnent les caractéristiques des déchets. Le programme d'identification de Genève par exemple a identifié 8 strates d'habitation et 11 strates d'activité [Maestre *et al.*, 1995], tandis que dans les campagnes menées dans 7 villes du Cameroun, seulement 4 strates d'habitation ont été retenues pour la production des ordures ménagères [Ngnikam, 2000] et 14 strates d'activité industrielle [Leseau, 2002].

À chaque strate d'habitation correspondent plusieurs lieux de prélèvement des déchets pour l'identification. Il est judicieux de construire un graphe de sélection du nombre de points de prélèvements, en fonction du poids statistique de chaque strate. Mais un minimum de 5 points de prélèvement est conseillé pour assurer une bonne représentativité spatiale de l'échantillon.

Connaissance de la pratique existante

Avant d'organiser une campagne d'identification des déchets, il est absolument indispensable de connaître les pratiques de collecte en usage. Il faut notamment savoir quels sont les quartiers dans lesquels on effectue une ou des collectes sélectives. Il faut aussi connaître les zones desservies par les camions de collecte, le système de collecte mis en place, les fréquences de collecte, etc. Ces informations sont importantes pour permettre de collecter les déchets des zones pressenties en phase de stratification et surtout s'assurer que les déchets qu'on veut trier n'ont pas été stockés pendant trop longtemps. Une visite de la zone couverte est aussi nécessaire pour identifier les activités pouvant avoir une influence sur la qualité des déchets (garage, gare routière, etc.).

Détermination de la masse minimale de l'échantillon

Le souci ici est de choisir un échantillon représentatif des déchets, de façon à ce que le résultat de la campagne de tri puisse être extrapolé à l'ensemble de la strate de production puis à la ville tout entière. Un autre problème qu'il faudrait résoudre est celui du calcul d'erreur sur le résultat de la campagne de tri.

L'échantillonnage a pour unique objet de réduire la masse d'un lot de matière sans altérer significativement ses propriétés. D'après les conditions de la sélection, le mode d'échantillonnage peut être probabiliste ou non probabiliste. Pour l'utilisateur d'une méthode d'échantillonnage, le résultat concret sur lequel le jugement va s'exercer c'est l'erreur d'échantillonnage.

Dans le cas présent, il s'agit de déterminer la masse d'un échantillon représentatif du gisement des déchets d'une ville. La principale source d'erreur que l'on veut réduire ici est l'hétérogénéité de distribution des éléments dans le lot. Pour prélever un échantillon de déchets dans une benne, qui est un lot de matière s'étendant dans les trois dimensions de l'espace, il faudrait autour des points choisis comme siège de prélèvement opérer une découpe. Trois problèmes se posent alors dans la pratique :

- le premier est d'accéder au point de prélèvement choisi;
- le deuxième est d'y parvenir sans détruire la matière située sur la voie d'accès;
- le troisième est de prélever la matière contenue dans un volume centré au point de prélèvement.

La succession de ces opérations engendre globalement une erreur d'échantillonnage, qui se décompose en une succession d'erreurs dont seule l'erreur fondamentale sera utilisée pour déterminer la productivité et la représentativité de l'échantillon à prélever.

Il s'agit concrètement à travers cette opération de calculer la masse de l'échantillon qui permet de minimiser l'erreur fondamentale d'échantillonnage. L'erreur fondamentale d'échantillonnage (EF) est une variable aléatoire de moment $m(EF)$ et de variance $\sigma^2(EF)$. Ces deux grandeurs sont définies par les relations suivantes [Gy, 1988] :

$$m(EF) = \frac{(1-P)}{P} * \sum \left(\left(\frac{a_i - a_L}{a_L} \right) * \left(\frac{M_i^2}{M_L^2} \right) \right) \quad (1)$$

$$\sigma^2(EF) = \frac{(1-P)}{P} * \sum_i \left(\left(\frac{a_i - a_L}{a_L} \right)^2 * \left(\frac{M_i^2}{M_L^2} \right) \right) \quad (2)$$

Dans ces expressions :

a_L est la teneur critique du lot L échantillonné. Dans le cas présent, ce sont les différentes proportions massiques des éléments composant le gisement des déchets, c'est la valeur idéale qu'on cherche à obtenir en procédant à la caractérisation des déchets;

a_i est la teneur du constituant i, c'est-à-dire la valeur qui sera effectivement mesurée après la caractérisation des déchets;

M_L est la masse totale du gisement, ce qui correspond par exemple à la production annuelle de déchets dans une ville ou dans une strate de la ville;

M_i est la masse du constituant i , masse par exemple de carton contenu dans les déchets de la ville;

P est la probabilité de prise de chaque constituant, on suppose ici que le tirage est équiprobable.

Pour que l'échantillon que l'on veut obtenir soit juste, il faut que $m(EF)$ soit statistiquement nul et, pour qu'il soit reproductible, la variance doit être la plus petite possible, d'où la relation de représentativité :

$$\sigma^2(EF) + m(EF) < s \text{ (seuil tolérable)}$$

Une solution pratique et économique consiste à minimiser la variance $\sigma^2(EF)$ de l'erreur fondamentale. Ainsi la masse M_E de l'échantillon à déterminer peut être obtenue à partir de l'équation : $\sigma^2(EF) < s$.

Pour effectuer les calculs, on utilisera l'expression simplifiée de la relation (2) qui s'écrit [Gy, 1988] :

$$\sigma_c^2(EF) = \left(\frac{1}{M_E} - \frac{1}{M_L} \right) * [mc^* \frac{1-2*tc}{tc} + \sum_i t_i^* m_i] \quad (3)$$

avec : M_E , masse de l'échantillon à prélever ;

mc , masse unitaire du constituant c ;

tc , teneur (pourcentage massique) du constituant c ;

t_i , teneur du constituant i ;

m_i , masse unitaire du constituant i (i varie entre 1 et N (nombre de constituant)).

Dans la pratique, on considère que la masse du lot M_L est très grande par rapport à la masse M_E de l'échantillon, donc $1/M_L$ est nul. La valeur de la variance est alors :

$$\sigma_c^2(EF) = \left(\frac{1}{M_E} \right) * [mc^* \frac{1-2*tc}{tc} + \sum_i t_i^* m_i] = \frac{1}{M_E} * IH_{LC} \quad (4)$$

IH_{LC} est l'invariant d'hétérogénéité du lot L par rapport au constituant c . Pour un constituant IH_{LC} est constant. En fixant le seuil de tolérance (s), on peut alors calculer la masse de l'échantillon M_E . Pour une benne d'ordure ménagère, la masse M_E à considérer sera la valeur obtenue avec

le maximum des valeurs de $\sigma_c(EF)$ calculé à partir des différents constituants. Pour cela, il ne faudrait pas tenir compte des éléments sous-représentés (objets de forte masse unitaire représentant moins de 1 % de la masse totale des déchets à caractériser).

À partir des relations ci-dessus, on ne peut pas prévoir a priori la précision d'une campagne de caractérisation des déchets. C'est pour cela que plusieurs tests sont indispensables pour avoir les éléments nécessaires pour le calcul de la taille de l'échantillon devant faire l'objet de tri. Le tableau n° 15 présente un exemple de résultat de calcul du seuil de tolérance à partir de la composition d'une benne de déchets industriels banals [Ngnikam, 1996].

Tableau 15 : Détermination des invariants d'échantillonnage (IH_{Lc}) pour les déchets industriels banals [Ngnikam, 1996]

Catégorie	Masse unitaire du constituant (kg)	Masse dans les déchets (kg)	% massique	Invariant (kg)	Erreur
Papier	0,01	76,5	1,5 %	3,55	± 5,3 %
Cartons	0,8	693,6	13,6 %	7,19	± 7,5 %
Palettes de bois	3,3	3 921,9	76,9 %	0,6	± 2,2 %
Plaques	4,0	30,6	0,6 %	661,7	± 72,0 %
Film PE	0,15	45,9	0,9 %	19,3	± 12,3 %
Mousse de PU	0,6	25,5	0,5 %	121,7	± 30,9 %
Caoutchouc	0,82	10,2	0,2 %	411,3	± 56,8 %
Métaux	2,0	61,2	1,2 %	165,6	± 36,0 %
Verre	5,1	204,0	4,0 %	120,2	± 30,7 %
Divers	0,05	30,6	0,6 %	11,14	± 9,3 %
Total		5 100,0	100,0 %		

On peut constater dans ce tableau que l'erreur d'échantillonnage est d'autant plus importante que la masse du constituant est élevée et que son pourcentage dans le gisement est faible. C'est pour cela que la masse de l'échantillon doit être choisie à partir des constituants les moins représentatifs du gisement. Plus le seuil de tolérance est faible, plus la masse de l'échantillon à prélever est élevée. Par ailleurs, il faut noter que plus on dispose des données pour fixer la taille de l'échantillon mieux sont les résultats. En effet, une insuffisance d'informations peut conduire à un échantillon qui ne reflète pas la réalité.

Sur la base de la relation (4), Pineau (1995) établit que, pour les ordures ménagères, une masse minimale de 200 kg est suffisante pour avoir un échantillon représentatif d'une benne de 5 tonnes avec un seuil de tolérance de 10 % [Ngnikam, 1996]. Cette masse est celle qui est recommandée ici comme taille de l'échantillon à prélever pour le tri.

Une fois fixée la taille de l'échantillon, la manière de le prélever est importante pour maintenir l'aspect aléatoire du tirage et surtout s'assurer que l'erreur d'échantillonnage suit la loi normale.

Organisation d'une campagne d'identification des déchets

Pour organiser une campagne d'identification des déchets, deux précautions sont à prendre : les mesures d'hygiène et de sécurité, l'aménagement d'un centre ou d'une aire de tri.

Mesure d'hygiène et de sécurité

Avant l'organisation d'une campagne de tri, il faut consulter une personne compétente en hygiène du travail. Des analyses de qualité de l'air ambiant montrent qu'une campagne de tri ne constitue pas une activité dangereuse pour le personnel si les précautions suivantes sont prises [Maestre *et al.*, 1995] :

- Une bonne aération du local de tri permet le renouvellement de l'air ambiant ;
- L'éclairage des postes de travail doit être suffisant ;
- Les tables de tri doivent permettre de travailler en position debout sans avoir à courber le dos, leur hauteur devrait être comprise entre 1 et 1,30 m ;
- Les personnes qui effectuent le tri doivent être protégées des mauvaises odeurs et des risques de blessures ;
- Il est interdit de fumer durant le tri.

Le tri des déchets est une activité qui nécessite concentration et discipline. Ainsi, les composantes triées sont apportées vers les caisses de stockage prévues à cet effet, et non lancées depuis la table de tri. Par ailleurs, une forte agitation des déchets à trier est à proscrire pour éviter la dispersion de poussières dans l'air.

Une analyse de l'air ambiant d'un centre de tri des déchets a montré des risques de contamination microbienne indirecte par voie aérienne 5 à 40 fois supérieurs à la normale. Mais cette contamination est due principalement à des champignons non pathogènes (pénicillium et paccilomyces) [Maestre *et al.*, 1995].

Aménagement du centre ou de l'aire de tri

Le centre ou l'aire de tri peuvent être installés à proximité d'une installation de traitement des déchets afin de faciliter l'évacuation des ordures triées. La méthode « EPFL » prévoit que le centre de tri soit localisé dans un local fermé. Dans ce cas, il faut prévoir deux salles d'égale surface. La première sert au stockage des déchets durant la journée de tri, tandis que la seconde sert de local de tri. Le centre de tri doit être aménagé de manière à permettre le respect des mesures d'hygiène préconisées. Le local de tri peut être divisé en quatre zones :

- La zone de tri : c'est la zone la plus importante. Au centre se trouve la table de tri autour de laquelle sont disposées les caisses destinées à recevoir les déchets triés;
- La zone de tri secondaire : ce secteur est réservé à la préparation des échantillons pour les analyses et au tri secondaire de certaines classes de déchets;
- Zone de pesée : elle regroupe la table du secrétaire et les balances;
- Zone d'évacuation : cette zone qui est située à l'extérieur du local est utilisée pour l'entreposage des bennes destinées à recevoir les déchets triés et pesés.

Comme on peut constater, l'aménagement d'un centre de tri couvert nécessite d'importants moyens matériels et financiers, mais offre l'avantage que le tri peut être effectué même pendant les pluies car les déchets ne seront pas mouillés pendant le stockage. Dans les situations de pénurie de ressource comme c'est souvent le cas dans les villes des pays en développement, on peut se contenter d'un centre de tri en plein air : une aire de tri.

Le choix des bennes de collecte à échantillonner

En fonction de la stratification réalisée par ville, il faudrait choisir au moins une benne par strate. Il faudrait exclure de l'échantillon les bennes qui ne collectent pas les ordures ménagères. Il faudrait choisir la benne au hasard parmi les bennes qui desservent la strate retenue. Pour ce faire, il faut se baser sur les relevés de collecte établis la semaine précédant la campagne. Il est conseillé de sélectionner au plus une benne par jour, pour éviter le stockage de longue durée, ce qui peut faire évoluer la qualité des déchets initiaux. Le numéro des bennes retenues ne doit pas être communiqué au chauffeur à l'avance pour éviter le « biais » lors de la collecte.

La benne de collecte à échantillonner ne doit pas contenir moins de 2 tonnes de déchets. Si le contenu de la benne choisie est insuffisant, il faudrait le compléter par une benne venant du même secteur (strate). Une fois le camion retenu, il faut procéder à l'échantillonnage des déchets avant le tri.

Prélèvement de l'échantillon à trier

Plusieurs méthodes de prélèvement sont proposées, mais les plus importantes sont : l'échantillonnage par partage et l'échantillonnage par pelletage fractionné.

L'échantillonnage par partage : consiste en une subdivision du lot de déchets initial (contenu de la benne) en un certain nombre de fractions de masses voisines et de propriétés similaires, qui constituent un ensemble d'échantillons potentiels jumeaux au sein duquel, dans un second temps, on sélectionne un ou plusieurs échantillons réels (tirage au sort après partage). La méthode de quartage présentée par l'Ademe fait partie de cette famille de méthodes ;

L'échantillonnage par pelletage fractionné : consiste à extraire du lot un certain nombre de prélèvements dont la réunion constitue l'échantillon. Avant le démarrage de la prise d'échantillon, il convient de fixer le taux d'échantillonnage approximatif que l'on cherche à réaliser en fonction de la masse initiale des déchets :

$$N = \frac{M_L}{M_E} \quad (5)$$

N est l'inverse du taux d'échantillonnage, M_L et M_E étant respectivement la masse totale des déchets dans la benne et la masse de l'échantillon qu'on vient de calculer.



Photo 16 : Échantillonnage des déchets industriels sur une décharge en France (photo des auteurs)

L'opérateur prélève à l'aide de demi-fûts (100 l) ou de la pelle d'un Bodcad (300 l) des pelletées successives de même volume. Avant de procéder au prélèvement, l'opérateur doit choisir un nombre k compris entre 1 et N . Toutes les pelletées dont les rangs sont des multiples de k seront retenues pour former l'échantillon à trier, tandis que les autres pelletées seront jetées

dans les tas de refus. À titre d'exemple, si la masse des déchets contenus dans la benne est de 5 tonnes, le nombre N est égal à 25 (5 000 kg / 200 kg). On doit au début de l'opération choisir un chiffre entre 1 et 25, supposons que le chiffre choisi est « 5 ». Toutes les pelletées dont les rangs sont les multiples de 5 seront retenues, tandis que les autres seront jetées sur le refus. À la fin du processus, on aura deux tas : le tas retenu qui correspondra à $1/25^e$ du gisement initial et le refus qui représente le reste.

Par rapport à la méthode par partage, cette méthode de prise d'échantillon a l'avantage d'être rapide car on réalise en même temps le nettoyage de l'aire de stockage des déchets.

À chaque fois, l'échantillon retenu est pesé et envoyé au fur et à mesure sur la table de tri. Il est important de combiner en même temps les opérations d'échantillonnage, de pesée et de tri, surtout lorsqu'on travaille dans un espace non couvert.

Le tri manuel des déchets de l'échantillon

Au cas où l'on dispose d'un local fermé, on peut effectuer le tri d'un échantillon 24 heures suivant sa constitution. Avant de procéder au tri, il faudrait au préalable définir les catégories des déchets à trier. Cette définition est faite en fonction des objectifs recherchés et des résultats de tests effectués. Mais d'une manière générale, les catégories retenues pour effectuer les caractéristiques des ordures ménagères sont les suivantes [Ademe, 1994] :

- Les déchets fermentescibles ;
- Les papiers ;
- Les cartons ;
- Les composites,
- Les textiles ;
- Les textiles sanitaires ;
- Les plastiques ;
- Les combustibles non classés ;
- Les verres ;
- Les métaux ;
- Les incombustibles non classés ;
- Les déchets spéciaux ;
- Les éléments fins (< 20mm).

Si l'objectif valorisation matière est recherché, on peut encore pousser le tri en sous-catégorie. Par exemple dans la catégorie plastique, on a intérêt à reconnaître les thermo-plastiques des thermo-durcissables. De plus, pour le recyclage de matière plastique, il faut pouvoir effectuer le tri en fonction de la nature du plastique (PE, PS, PET, PVC,...).



Photo 17 : Tri des déchets au sol



Photo 18 : Tri sur table

Il faut prévoir une table de tri de 2,5 m x 1 m pour ajuster les deux tamis (maille ronde de 100 mm) et maille ronde de (20 mm) et un bac de récupération des éléments fins. Pour le tri proprement dit, l'échantillon est déversé sur le train de tamis qu'on secoue pour faire passer les éléments moyens et fins. Ensuite, on effectue le tri des éléments grossiers (> 100 mm) par catégorie puis des éléments moyens (20-100 mm) par catégorie.

Pour l'organisation pratique du tri des constituants, les opérations suivantes doivent être menées :

- 1) Identifier à l'aide d'étiquettes très lisibles ou à partir de couleurs les poubelles recevant les produits triés pour chaque catégorie ;
- 2) Peser l'échantillon à trier (QMER) en totalité ;
- 3) Avec l'équipe de trieurs (6 personnes en moyenne), effectuer le tri par catégorie des éléments grossiers (> 100 mm), c'est-à-dire le refus du tamis de 100 mm. Pour cela, il faut :
 - verser les déchets en petite quantité sur le crible supérieur (maille ronde de 100 mm) pour ne pas surcharger le crible et remuer les déchets pour faire passer les éléments fins et moyens ;
 - recueillir régulièrement les refus au crible de 20 mm (les éléments moyens) dans une poubelle de 80 l ou un demi-fût de 100 l, pour éviter la saturation du deuxième crible.
 - recueillir les éléments fins dans un seau poubelle de 80 l ou un demi-fût de 100 l ;
 - répéter l'opération jusqu'à l'épuisement de l'échantillon.
- 4) peser chacune des fractions recueillies pendant le criblage primaire : les gros triés par catégorie, les moyens et les éléments fins ;
- 5) Tamiser les fines < 20 mm à la maille de 8 mm ronde après quartage si cette opération a été retenue et par la suite peser la fraction < 8 mm ;
- 6) Trier entièrement les éléments moyens en fonction des catégories définies à la phase précédente. Pour cela :
 - enlever de la table de tri le crible de 100 mm rond ;
 - placer le crible de 20 mm rond sur la partie supérieure ;
 - laisser le bac de récupération des fines en dessous ;
 - déverser une petite quantité de « moyens » sur le crible ;

- trier et répartir les composants dans les poubelles prévues à cet effet;
- répéter l'opération jusqu'à l'épuisement des moyens ;
- 7) Calculer le poids des pertes lors du tri des éléments gros et du tri des moyens;
- 8) Trier des sous-catégories si nécessaire.

Détermination de l'humidité par rapport au poids humide des composants

Après la campagne de tri, le taux d'humidité sur les composants des déchets est déterminé par séchage à l'étuve à la température de 105°C pendant 24 h selon la norme française NF M03-002. Mais on a constaté qu'à cette température certains matériaux comme les plastiques souples (polyéthylène basse densité par exemple) sont fondus dans les étuves. Il est recommandé de sécher les déchets à une température de 80°C pendant au moins 48 heures. L'idéal est d'arriver à obtenir une masse de l'échantillon séché constante. Le taux d'humidité doit être déterminé sur toutes les catégories triées dans les fractions « gros » et « moyen ». Il est nécessaire de retenir au moins deux échantillons pour l'humidité par composant pour pouvoir obtenir une moyenne fiable. Pour certaines fractions très importantes comme par exemple les matières organiques fermentescibles, il faut faire l'analyse sur quatre échantillons. Les quantités à prélever pour l'humidité seront toujours calculées en utilisant la relation (5), cette fois la masse de l'échantillon global étant la masse des déchets triés (Q_{MER}). L'Ademe conseille à cet effet que la masse totale de l'échantillon à sécher doit être égale à 1/5^e de la masse totale des déchets triés, soit 40 kg par benne pour les cas étudiés dans cet ouvrage. Ce qui suppose qu'on doit avoir une étuve de grande capacité pour sécher ces déchets. Les opérations à mener pour obtenir leur taux d'humidité sont les suivantes :

- Préparer les bacs nécessaires au séchage dans l'étuve en les identifiant selon les références de l'échantillon;
- Prélever la masse à sécher de chaque catégorie de matériaux triés à la fois à partir de la fraction « gros » et de la fraction « moyen »;
- Peser la quantité humide prélevée de la catégorie considérée : Q_h;
- Mettre à l'étuve à 80°C et sécher pendant au moins 48 h (jusqu'à l'obtention d'une masse sèche qui n'évolue plus);
- Peser la quantité sèche de la catégorie considérée : Q_{c,sec};
- Calculer le taux d'humidité sur le poids humide

$$H_c = \frac{Q_h - Q_{c,sec}}{Q_h} * 100 \quad (6)$$

Avec : H_{cu} le taux d'humidité de la catégorie c ;
 - Inscrire les masses pour chaque catégorie des composants sur la fiche du tri (annexe) et enfin calculer le taux d'humidité total des déchets H_{tu} suivant la relation (7).

$$H_{tu} = \sum_c \frac{H_{cu} * P_{cu}}{100} \quad (7)$$

avec : \sum_c = somme des catégories triées

P_{cu} = part humide de la catégorie c

Calcul de la composition de l'échantillon (QMER)

Le calcul de la composition est effectué à partir des pesées réalisées lors des tris. Au cas où il s'est passé un temps entre la prise de l'échantillon et le tri, les pertes d'eau doivent être prises en considération pour corriger la composition des déchets, ainsi que les pertes dues par exemple aux éléments fins qui se sont décollés sur les matériaux pendant le tri. Ces éléments sont récoltés dans le bac placé sous le crible de 20 mm.

En ce qui concerne les fines, une seule catégorie de fines (< 20 mm) devrait être considérée si le criblage à 8 mm n'est pas retenu. Les fines résiduelles obtenues lors des tris des sous-catégorie doit être comptabilisé dans la fraction fines < 8 mm. Les résultats de la composition sont exprimés de deux façons :

- En pourcentage du poids humide de l'échantillon à trier dit échantillon total;
- En pourcentage du poids sec de l'échantillon total.

Dans le premier cas, la part humide (P_{cu}) de chaque catégorie (c) exprimé en % du poids humide de l'échantillon total est le suivant :

$$P_{cu} = \frac{M_{cu} + m_{cu}}{M_{tu}} * 100 \quad (8)$$

avec : P_{cu} = la part humide de chaque catégorie c (en %)

M_{cu} = masse humide de gros de la catégorie (c)

m_{cu} = masse humide de moyens de la catégorie (c)

M_{tu} = masse humide de l'échantillon

Pour le calcul des pourcentages sur sec, la connaissance des humidités de chaque catégorie est nécessaire. Il n'est traité ici que les cas où l'on ne

fait pas de tri en sous-catégorie. La part ($P_{c\text{sec}}$) de chaque catégorie (c) exprimée en % du poids sec de l'échantillon total est (9) :

$$P_{c\text{sec}} = \frac{P_c u \left(1 - \frac{H_c}{100}\right)}{M_{t\text{sec}}} * 100 \quad (9)$$

avec : $M_{t\text{sec}}$ = masse sèche de l'échantillon total

Calcul de la composition moyenne des ordures ménagères de la zone d'étude

La composition des ordures ménagères collectées sur la zone d'étude est déterminée soit par une moyenne simple, soit par une moyenne pondérée des productions. Dans les deux cas, cette composition pourra être exprimée en % du poids humide ou en % du poids sec. Au cas où la zone d'étude n'a pas fait l'objet d'une stratification, la composition des ordures ménagères de la zone d'étude est égale à la moyenne simple des résultats des différentes campagnes de tri organisées au cours de l'année. Pour une catégorie (c), on a :

$$P_{c\text{moyen}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{ci}}{n} \quad (10)$$

avec : P_{ci} = part pondérale de la catégorie (c) pour le i ème tri
 $P_{c\text{moyen}}$ = part pondérale moyenne de la catégorie c
 n = nombre de campagnes de tri organisées au cours de la période considérée

Dans le cas où la zone d'étude a été stratifiée, la composition moyenne sera calculée par moyenne pondérée. La composition moyenne des ordures ménagères collectées sur la zone d'étude sera alors la moyenne des compositions de toutes les strates, pondérée par leurs productions respectives. Ainsi la relation (11) sera utilisée pour effectuer le calcul de la composition moyenne de la zone d'étude.

$$P_{c\text{moyen}} = \frac{\sum_{i=1}^s (W_i * P_{ci})}{\sum_{i=1}^s W_i} \quad (11)$$

avec : P_{ci} = part pondérale de la catégorie (c) pour chaque strate i
 W_i = production annuelle de chaque strate (i) lors de la campagne
 s = l'ensemble des strates considérées dans la zone d'étude

Mais dans le cas où chaque strate a fait l'objet d'une campagne de tri de façon séparé, on calculera la composition des déchets de chaque strate en utilisant la relation (10).

La réalisation de plusieurs campagnes de tri au cours d'une année complète a pour but d'étudier l'influence de la saison sur la nature des déchets. Il est donc judicieux de présenter les résultats de deux campagnes (saison sèche et saison humide) avant de dégager la valeur moyenne de la composition annuelle.

- personnel et matériels nécessaires pour organiser une campagne d'identification des déchets

Le tableau n° 16 présente pour chaque étape du système le personnel et les matériels nécessaires pour réaliser une campagne d'identification des déchets, ainsi que le temps nécessaire pour le faire.

Tableau 16 : Personnel et matériels nécessaires

Tâches à réaliser	Personnel et qualification	Matériel	Durée approximative
Analyse des caractéristiques de la zone d'étude, données démographiques, analyse des données cartographiques	Un ingénieur ou urbaniste	Relevé de la production des déchets Circuit de collecte Carte de la zone avec l'habitat, équipement et infrastructure Données démographiques	3 à 4 jours
Stratification de la zone d'étude	Un ingénieur ou urbaniste	Fiche de relevé de la collecte des déchets Analyse du circuit de collecte	2 à 3 jours
Calcul du nombre d'échantillons à prélever, choix des bennes	Un ingénieur	Relevé de la production des déchets Circuit de collecte Carte de la zone avec l'habitat, équipement et infrastructure Données démographiques	2 à 3 jours

.../ ...

Tâches à réaliser	Personnel et qualification	Matériel	Durée approximative
Campagne de prétri	Un ingénieur Un technicien 1 peseur 3 chargeurs 6 trieurs	Une caisse-tamis de 2,5 x 1 m à maille ronde de 100 mm, une autre à maille ronde de 20 mm, un bac de récupération des fines de 2,5 x 1 m 15 poubelles de 60 l 10 demi-fûts de 100 l Une balance de portée 100 kg (50 g de précision) Des sacs poubelles de 100 l Des raclettes, des balais, des pelles, des gants, des marques, un aimant, des combinaisons de travail	2 jours
Campagne de tri	Un ingénieur Un technicien Un peseur 4 chargeurs 6 trieurs	Idem étape précédente, en plus : Une table pour le peseur Une table pour le technicien (prise de note) Une benne d'évacuation des déchets triés Une balance de 10 kg de portée (précision 50 g)	1 à 2 jours par échantillon
Analyse du taux d'humidité et calcul de la composition	Un ingénieur Un technicien de laboratoire	Une balance électronique de 5 kg de portée (précision 10 g) Une étuve de 200 l au moins Des étiquettes Des marqueurs indélébiles Des tares pour le séchage des échantillons Une calculatrice ou un micro-ordinateur Des feuilles de relevés	2 à 3 jours par échantillon

APPLICATION DE CES MÉTHODES POUR LA CARCTÉRISATION DES DÉCHETS MÉNAGERS DE SEPT VILLES DU CAMEROUN

Certaines techniques classiques d'échantillonnage des ordures ménagères telles que celle proposée par l'Ademe¹² [Ademe, 1993], ne peuvent pas être entièrement utilisées dans les contextes des villes des PED pour les raisons suivantes :

- la collecte est irrégulière et même inexistante dans certains quartiers;
- la couverture de la ville n'est pas totale et les déchets collectés ne peuvent pas représenter entièrement la production de la ville, même lorsque la collecte est assurée.

Compte tenu de toutes ces contraintes, cette technique doit être modifiée en conséquence. Ainsi donc, la méthodologie utilisée comporte les quatre étapes suivantes :

- La stratification de la ville en zones homogènes d'habitation;
- Le prélèvement de l'échantillon primaire;
- Le prélèvement de l'échantillon secondaire;
- Le tri manuel des déchets en catégories et la prise d'échantillons pour le laboratoire par catégorie de déchets.

Stratification de la ville en vue de la caractérisation des déchets

Cette stratification a pour objectif de définir les zones homogènes suivant le type d'habitation, le niveau de vie des populations, l'activité dominante dans la zone et le niveau d'accessibilité à la parcelle. Dans le cas de la ville de Yaoundé et à titre d'exemple, sur la base de ces critères, quatre zones homogènes ont été identifiées à partir des photographies aériennes et sur la base de la connaissance de la ville par l'équipe des chercheurs :

Zone 1 : habitat de haut standing et zone administrative.

Zone administrative et résidentielle du type villas et appartements. Parcelles normalement clôturées, loties, jardin ou cour entourant les habitations avec garage et accès à toutes les parcelles par des véhicules de gros gabarit.

Le taux de collecte des OM ici pourra être de 100 % en raison de la suffisance et du bon état du réseau de voirie. Cette zone est essentiellement résidentielle et y vivent majoritairement les hauts fonctionnaires, les directeurs d'entreprises.

12 Il s'agit du « MODECOM », c'est à dire Méthode de Caractérisation des Ordures Ménagères.

Zone 2 : habitat de moyen standing.

Ici, on distingue deux variantes : les zones « moyen standing » et les « lotissements municipaux ». Cette zone est caractérisée par l'existence de trames de voiries non entretenues et difficilement accessibles aux véhicules de gros gabarit. Terrains lotis, jardin ou cour entourant l'habitation, cette zone est constituée par des villas ou maisons à usage d'habitation. On y rencontre aussi quelques activités commerciales localisées autour des marchés et sur les voies principales. Y vivent en majorité les cadres moyens de l'administration publique ou privée. Dans cette strate, on a distingué des zones de lotissement municipal qui ont été viabilisées dans les années quatre-vingt et où les voies de dessertes qui ont été créées à cette époque sont dans un état de délabrement très avancé.

Zone 3 : habitat spontané très dense.

Les voies de desserte sont presque inexistantes et le seul accès reste les voies principales qui traversent les quartiers.

Le taux de collecte des OM y est faible en raison de l'enclavement des quartiers. Il s'agit de zones résidentielles pour la population à bas revenus. Les activités du secteur informel sont dominantes, avec une forte concentration le long de la voie principale (axe structurant). Ces quartiers se caractérisent aussi par un manque d'équipement et de délimitation des espaces publics et privés. Les terrains sont non lotis et les infrastructures sont rudimentaires.

Dans cette strate, il y a aussi les quartiers spontanés ayant fait l'objet d'une restructuration partielle ou totale.

Zone 4 : zone périurbaine en voie de densification.

Les habitations sont dispersées, de standing moyen ou de type traditionnel. Le taux de collecte des OM est faible en raison de la présence des surfaces agricoles sur lesquelles est encore jetée une partie des OM. La population est mixte, avec une population rurale composée essentiellement des autochtones et de quelques cadres de l'administration ou du privé. Ces quartiers sont encore neufs et constituent les zones d'extension de la ville.

Délimitation des différents tissus urbains sur le terrain

La reconnaissance des différentes zones sur le terrain après la définition des critères cités ci-dessus s'est faite à partir des éléments suivants :

- une reconnaissance à partir des photographies aériennes les plus récentes : 1992 pour Yaoundé et 1984 pour Douala ;
- Une descente sur le terrain pour correction et mise à jour des délimitations obtenues à partir de l'analyse des photographies aériennes.

Le choix des quartiers à enquêter (îlot) s'est fait de manière aléatoire, pour permettre une bonne représentativité dans la ville. Le nombre de ménages à enquêter par strate est proportionnel à la taille de la strate (tirage proportionnel). À l'intérieur de chaque îlot, les ménages à enquêter sont uniformément répartis.

Prélèvement de l'échantillon primaire

La campagne de caractérisation s'étant déroulée pendant la période de défaillance des systèmes de collecte de déchets dans la plupart des villes, on a choisi le prélèvement en poubelle (sur les tas d'ordures). C'est-à-dire que pour une strate donnée, l'échantillon est constitué par la rotation d'une benne d'entreprise. Pendant la rotation dans chaque strate, le camion est accompagné d'une pelle chargeuse qui permet d'effectuer 10 à 12 prélèvements à des endroits distants d'au moins 500 m de manière à couvrir toute la zone considérée. L'itinéraire retenu dans la strate est tiré au sort parmi la liste des chemins possibles (c'est-à-dire des voies sur lesquelles existe au moins un tas d'ordures et pouvant être empruntées par un véhicule lourd); une visite d'identification est nécessaire pour effectuer ce tirage au sort. Environ 2 tonnes de déchets sont ainsi collectés par strate. C'est la réunion de l'ensemble des bennes qui constitue l'échantillon primaire (10 tonnes en moyenne). Le contenu du camion est déversé sur une aire dégagée et plane où est effectuée la prise d'échantillon secondaire.

Prise d'échantillon secondaire

L'échantillon secondaire désigne l'échantillon obtenu à partir des tas d'ordures constitués à l'étape précédente (échantillon primaire). C'est la méthode de pelletage fractionné qui a été utilisée pour obtenir l'échantillon secondaire soumis au tri.

Le partage s'est fait à la main et en utilisant des demi-fûts de 100 litres et des fourches. On divise ainsi le lot principal en dix lots d'environ 200 kg qui seront intégralement triés. La masse minimale de déchets à trier est de 200 kg. Cette quantité permet d'avoir les résultats avec une précision de 10 % [Pineau, 1995]. C'est sur cet échantillon que seront effectuées les opérations de criblage, de tri et les analyses du laboratoire.

Tri de l'échantillon secondaire

L'échantillon de 200 kg environ dit « échantillon global réduit », préparé à partir d'un tas de 1,5 à 2 tonnes représentant les déchets d'une strate déterminée est criblé avec le tamis à maille ronde de 20 mm. Les éléments de taille supérieure à 20 mm sont triés manuellement en 8 catégories. Les

éléments grossiers (> 100 mm) sont séparés, mais il n'est pas effectué de tri sélectif sur ces éléments parce qu'ils sont dans la majorité des cas fermentescibles (jambe de plantain, cageot vide en fibre végétale, etc.).

Les fractions fines récoltées directement sous le tamis et la fraction organique de taille supérieure à 20 mm obtenue après le tri manuel sont étalées par classe sur une aire bétonnée ou couverte d'une film plastique. Les autres catégories triées (plastiques, verre, métaux, etc.) sont regroupées dans des seaux poubelles pour être pesées. La prise de l'échantillon du laboratoire s'est faite par quartage sur les différentes fractions (figure 13). Pour la mesure du taux d'humidité, chaque échantillon pris sur les composantes énumérées est séché à 95°C dans l'étuve pendant 48 heures. Deux analyses sont effectuées par échantillon.

Compte tenu des disparités prévisibles qui peuvent exister entre les deux grandes saisons qui dominent le climat dans les villes étudiées, au moins deux campagnes d'échantillonnage sont nécessaires. Ainsi pour les mesures de la saison sèche, on a choisi le mois de janvier pour Yaoundé et février pour Douala. Pour les mesures de la saison des pluies, les mois d'octobre a été retenu pour Yaoundé et novembre pour Douala. Chaque campagne a duré cinq jours pour Douala et Yaoundé et deux jours pour les autres villes. Pour les autres villes, une seule campagne de tri a été effectuée.

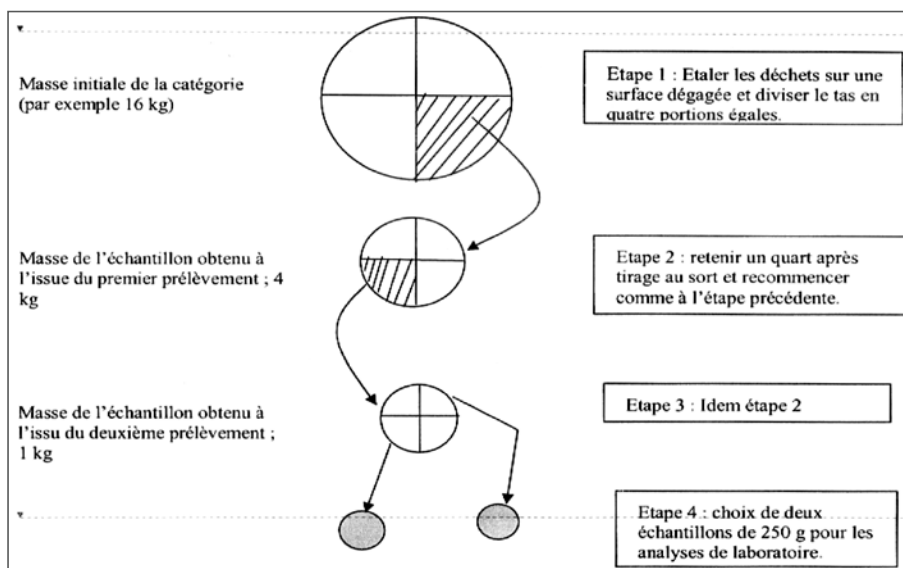


Figure 13 : Présentation de la méthodologie de quartage retenue pour le prélèvement de l'échantillon de laboratoire

Évaluation de la production de déchets ménagers

Faute de disposer des données statistiques de chaque groupe de déchets identifiés, pour évaluer la production des déchets municipaux, on a utilisé la méthode d'enquête par questionnaire et des mesures directes auprès des ménages et des commerçants. Cette enquête a été précédée en ce qui concerne les déchets des ménages de deux campagnes de caractérisation qui se sont déroulées en saison de pluie et en saison sèche.

Choix des villes à enquêter

Pour obtenir les données sur la production et la composition des déchets ménagers des villes du Cameroun, les villes ont été regroupées en quatre zones géographiques. Les critères de regroupement étaient basés sur le climat, l'économie dominante et les habitudes alimentaires de la zone considérée. Les caractéristiques de ces différentes zones, ainsi que leur effectif de population urbaine sont présentées dans le tableau n° 17 ci-dessous.

Tableau 17 : Caractéristiques des zones dans lesquelles des enquêtes ont été conduites

Zone	Caractéristiques	Villes enquêtées	Population des villes enquêtées (1998)	Population urbaine de la zone en 1998
Douala	Grande agglomération, population hétérogène, ville industrielle et commerciale, climat équatorial humide	Douala	1 394 380	1 394 380
Yaoundé	Grande agglomération, population hétérogène, ville administrative et commerciale, climat équatorial humide	Yaoundé	1 266 400	1 266 400
Zone équatoriale humide	Villes agricoles et commerciales, alimentation basée sur les céréales, les tubercules et les légumes, climat équatorial humide	Bafoussam Nkongsamba Kumba Bafang	478 472	3 512 158
Zone sahélienne	Villes agricoles et commerciales, alimentation basée sur les céréales, climat sahélien sec	Garoua	295 974	740 945
Total			3 435 226	6 913 833

Source : Direction des statistiques et de la comptabilité nationale pour l'effectif des populations.

Méthodologie d'évaluation

Pour chaque agglomération retenue, la méthode de sondage stratifié et les mesures directes de la production des déchets auprès des ménages producteurs a été adoptée. Le plan de sondage et la méthode de stratification utilisés sont les mêmes que pour l'identification des déchets. Un sondage aléatoire a été réalisé. Le taux de sondage est de 1/100^e pour les villes moyennes, sauf par exemple pour la ville de Nkongsomba où un sondage au 1/20^e a été réalisé. Pour chaque ville, on s'est basé sur les résultats du recensement de 1987 fournie par le bureau central de recensement de la Direction des Statistiques et de la Comptabilité Nationale (DSCN), avec la carte de découpage par quartier qui avait servi de base d'intervention sur le terrain pendant le recensement. Ces données de base ont été actualisées avec les taux fournis par le même service. En fonction du taux de sondage retenu, dans chaque zone, les quartiers ou îlots à enquêter ont été tirés au hasard. Le taux retenu à Yaoundé a été de 1/200 et de 1/250 à Douala.

En plus des interviews réalisées auprès des ménages sondés, des sacs poubelles de 50 litres ont été disposés dans le tiers de l'effectif des ménages enquêtés dans chaque ville. Chaque ménage devait, pendant une durée moyenne de deux jours, stocker tous ses déchets dans ces sacs. Les sacs ont été par la suite collectés et pesés pour avoir la production spécifique de déchets par ménage. Le suivi de la pesée a été étendu sur une période de 15 jours à Yaoundé et à Nkongsamba. Le tableau n° 18 ci-dessous donne l'effectif des ménages enquêtés dans chaque ville et le nombre de sacs poubelles déposés, ainsi que le taux de récupération des sacs.

Tableau 18 : Effectif des ménages enquêtés par ville et nombre de sacs récupérés

Villes	Effectif ménages enquêtés	Nombre de sacs déposés	Nombre de sacs récupérés
Douala	1 225	350	300
Yaoundé	1 600	400	320
Nkongsamba ¹³	1 128	210	210
Bafoussam	350	120	84
Garoua	450	150	87
Kumba	300	100	91
Bafang	250	100	78
Total	5 303	1 430	1 170

¹³ Dans le cas de Nkongsamba, la production des déchets des ménages a été suivie pendant deux semaines au mois d'avril 1998.

Production des déchets ménagers

Le tableau n° 19 ci-dessous donne le taux de production et la production globale des déchets ménagers dans les villes du Cameroun où des enquêtes ont été conduites. La production totale des ordures ménagères est évaluée à 4 148 tonnes/jour, avec une production spécifique de 0,6 kg/habitant/jour. Il existe une différence significative entre les deux grandes villes du pays, Douala et Yaoundé, où la population dépasse déjà 1 000 000 d'habitants et les autres centres (tableau n° 19).

**Tableau 19 : Taux de génération des déchets de ménage
(en kg/habitant/jour)**

Villes ou régions	Déchets de ménage (kg/hab/jour)	Production totale des déchets ménagers (t/j)
Douala	0,88	1 227
Yaoundé	0,85	1 076,4
Bafoussam	0,57	120
Kumba	0,30	45,6
Bafang	0,65	31,6
Nkongsamba	0,52	51
Garoua	0,37	109,5
Ville moyenne de la zone équatoriale humide	0,50	1 756
Moyenne des villes du pays ¹⁴	0,60	4 148 ¹⁵

Les déchets des jardins existent en quantité faible et on les retrouve uniquement dans les quartiers de haut standing qui concentrent entre 3 et 7 % des ménages urbains au Cameroun. 56,8 % de la production totale des déchets ménagers des villes du Cameroun sont concentrés dans les deux grandes villes du pays : Douala et Yaoundé. C'est pour cette raison que les efforts des pouvoirs publics ont été concentrés jusqu'ici sur ces deux agglomérations au détriment des villes moyennes, surtout dans la zone humide qui produit 42,3 % des déchets ménagers.

Dans la partie septentrionale du pays, la pratique d'élevage intra-urbaine est très développée. Les animaux en divagation dans les rues consomment presque entièrement la fraction fermentescible des ordures

14 La moyenne nationale est calculée à partir de la moyenne arithmétique des différentes villes enquêtées.

15 Total national.

ménagères stockées dans les dépôts de la ville. Il ne reste en général que la fraction non fermentescible dont la partie matière plastique est le plus souvent dispersée par le vent.

Dans le cas de Yaoundé et Douala au Cameroun, on a noté une différence significative entre la production des déchets ménagers dans les différents strates (tableau n° 20). Par contre, dans les villes moyennes, cette différence n'est pas très significative.

Tableau 20 : Taux de production des ordures ménagères par strate à Douala et Yaoundé

Villes	Yaoundé		Douala	
	Saison sèche	Saison des pluies	Saison sèche	Saison des pluies
Structuré haut standing	0,95	1,31	0,97	1,42
Structuré moyen standing	0,78	1,12	0,78	1,28
Lotissements municipaux	0,73	0,98	0,53	0,79
Spontané	0,5	0,8	0,46	1
Périurbains	0,63	0,95	0,45	0,91
Moyenne de la ville	0,6	0,98	0,68	0,98

Pour obtenir la production moyenne annuelle de déchets présentée dans le tableau n° 20, on a tenu compte du fait que le taux de production de la saison sèche est valable pendant quatre mois dans l'année (décembre, janvier, février et mars), tandis que le taux de production pendant la saison pluvieuse est mesuré sur huit mois dans l'année. La fluctuation observée dans la production massive de déchets au cours de l'année est pour beaucoup liée à la fluctuation du taux d'humidité. Il faut aussi noter que la saison des pluies correspond à la période de récolte des mangues et du maïs dont les déchets constituent une part importante de la fraction fermentescible des déchets pendant cette période.

Bien qu'on observe une variation importante du taux de production de déchets entre deux saisons, la variation de ce taux moyen de production d'une année à l'autre et sur une période courte (moins de 10 ans) n'est pas significative [CLIP, 1996]. Surtout lorsque les conditions économiques sont défavorables. La variation de la production de déchets dans le temps dépend alors beaucoup plus du taux d'accroissement de la population.

Caractéristiques des déchets ménagers

La densité apparente des déchets en poubelle est mesurée en mettant les ordures ménagères fraîches dans un seau de 50 litres. La pesée est effectuée sans tassement des déchets. Une moyenne de 5 à 10 mesures est effectuée par strate.

On peut constater une variation de 200 % entre les densités mesurées en saison sèche et en saison des pluies dans la même ville (tableau n° 21). Dans le même temps, le taux d'humidité varie entre 45 et 65 % (voire 70 % pour les mois très pluvieux).

Tableau 21 : Variation de la densité en poubelle des ordures ménagères de Douala et Yaoundé entre les deux saisons

Type de tissus	Yaoundé		Douala	
	Saison sèche	Saison des pluies	Saison sèche	Saison des pluies
Structuré haut standing	0,23	0,32	0,16	0,34
Structuré moyen standing	0,26	0,38	0,18	0,39
Lotissements municipaux	0,25	0,34	0,19	0,43
Spontané	0,25	0,39	0,2	0,43
Périurbains	0,23	0,35	0,19	0,41
Moyenne de la ville	0,24	0,36	0,18	0,4

La densité mesurée en saison des pluies est valable pendant huit mois de l'année dans la plupart des villes (à l'exception de la zone aride). La variation entre les strates n'est pas significative.

Le taux d'humidité des déchets varie surtout en fonction des saisons. Dans les villes de la zone aride, le taux d'humidité peut être en dessous de 20 % pendant la saison sèche qui dure 6 à 7 mois. En saison des pluies, on observe un relèvement du taux d'humidité dans cette zone, cependant on dépasse rarement les 60 %. Dans les zones humides par contre, même pendant la saison sèche, le taux moyen d'humidité est de 48 % en raison de la forte présence des épiluchures de tubercules et de légumes frais dans les déchets. Le taux d'humidité se situe généralement à 65 % pendant la saison des pluies, et pourrait être supérieur à 70 % pendant les mois les plus pluvieux comme les mois de septembre et d'octobre à Yaoundé.

Les déchets des ménages et de commerçants ont été systématiquement triés manuellement en 9 catégories comme définies dans le tableau n° 23. Les éléments fins, c'est-à-dire les passants au tamis de maille ronde de

20 mm de diamètre, ont été récoltés sur une bâche en plastique puis pesés. Un évaluation visuelle a permis d'estimer la proportion de matière organique biodégradable contenue dans cette sous-catégorie.

Le taux d'humidité a ensuite été déterminé sur les catégories susceptibles de se charger en eau après les pluies. Après chaque campagne de tri, environ 25 échantillons de déchets par ville ont été prélevés pour mesurer la teneur en eau totale des déchets. Le tableau n° 22 ci-dessous présente la composition pondérale des déchets municipaux des villes enquêtées.

Tableau 22 : Composition (% matière sèche) des déchets municipaux dans quelques villes du Cameroun

Composants	Yaoundé	Douala	Nkongsamba	Bafang	Bafoussam	Garoua	Kumba	Moyenne
Papier/carton	3,5 %	3,7 %	4,8 %	1,3 %	1,3 %	1,7 %	0,7 %	2,2 %
Verre/céramique	4,1 %	1,6 %	5,6 %	0,3 %	0,8 %	0,1 %	0,4 %	1,8 %
Textiles/cuir	1,6 %	2,4 %	2,3 %	1,1 %	0,9 %	1,5 %	0,7 %	1,5 %
Plastiques	4,6 %	3,4 %	0,3 %	1,1 %	2,3 %	6,1 %	1,9 %	2,8 %
Métaux	4,6 %	2,3 %	1,3 %	0,7 %	0,6 %	1,0 %	0,8 %	1,6 %
Bois et copeaux	-	1,5 %	0,9 %	0,7 %	0,5 %	1,9 %	0,2 %	0,9 %
Gravats	5,9 %	5,1 %	1,7 %	0	1,7 %	2,5 %	0	2,4 %
Fines < 20 mm	27,6 %	1,3 %	6,7 %	17,3 %	25,6 %	41,9 %	14 %	19,2 %
Matière organique	47,9 %	78,7 %	76,5 %	77,5 %	66,2 %	42,8 %	81,6 %	67,3 %
Total	100	100	100	100	100	100	100	100
Matière organique totale ¹⁶	76 %	78,7 %	80,5 %	87,9 %	79 %	51,2 %	88,6 %	77,4 %

On observe une forte proportion de déchets fermentescibles dans les ordures ménagères, sauf dans la ville de Garoua située en zone tropicale sèche. Les fractions de plastique et de papier carton restent faible dans toutes les villes, ce qui entraîne un pouvoir calorifique relativement peu élevé pendant toute l'année. Sur la matière brute, on remarque que la matière organique est prépondérante (tableau n° 23).

16 Cette fraction tient compte de la matière organique biodégradable contenue dans les éléments fins.

Tableau 23 : Composition brute et sur sec des ordures ménagères de Yaoundé et de Douala

Catégorie	Yaoundé		Douala	
	Sur sec (%)	Brute (%)	Sur sec (%)	Brute (%)
Papier/carton	3,5 %	3,7 %	3,7 %	4 %
Verre/céramique	4,1 %	2,1 %	1,6 %	0,6 %
Textiles/cuirs	1,6 %	2,1 %	2,4 %	2,4 %
Plastiques	4,6 %	1,9 %	3,4 %	2,5 %
Métaux	4,6 %	3,8 %	2,3 %	0,9 %
Bois et copeaux	-	-	1,5 %	0,9 %
Gravats	5,9 %	2,9 %	5,1 %	4,5 %
Fines < 20 mm	27,6 %	20,9 %	1,3 %	0,4 %
Matière organique	47,9 %	61,7 %	78,7 %	83,9 %
Total	100	100 %	100	100 %

IDENTIFICATION DES DÉCHETS NON MÉNAGERS

Les déchets non ménagers concernent les déchets industriels (entreprises, administration publique, hôpitaux, établissements d'enseignement, etc.), les déchets des activités du secteur informel, les déchets produits par les commerçants dans les marchés.

Les déchets non ménagers sont une famille très grande et complexe, où on retrouve aussi des déchets assimilables aux ordures ménagères. Dans la pratique, ce type de déchets est géré directement par les producteurs. Mais les petites et moyennes entreprises de service et les unités informelles de production déversent généralement leurs déchets dans les bacs à ordures.

Les sous-produits des procédés de fabrication sont repris par d'autres industries, contre paiement ou non du receveur. Ces sous-produits sont considérés selon les cas comme des matières premières secondaires.

L'inventaire des déchets solides non ménagers a été effectué seulement dans la ville de Yaoundé¹⁷. Quelques études ont été menées sur Douala, mais sans une recherche de représentativité de l'échantillon retenu pour l'enquête. Dans l'inventaire des déchets industriels de Yaoundé, en dehors

¹⁷ Cette étude a été réalisée à la demande de la communauté urbaine de Yaoundé et financé par l'ambassade de France dans le cadre du projet PADUDY (Programme d'Appui au Développement de Douala et Yaoundé).

des déchets des marchés où une observation directe a été faite, il n'existe pas de méthode universellement reconnue d'identification des déchets non ménagers. Mais trois approches d'évaluation existent :

L'approche par bilan des flux : cette approche est centrée sur les matières. Elle est fondée sur le postulat que tout ce qui entre va ressortir du système considéré, dont les frontières doivent être clairement définies. Mais ce postulat ne peut se vérifier qu'à partir des composants chimiques contenus dans les matières. Ces données sont difficiles à obtenir dans le contexte des villes des PED et la méthode par le bilan de flux ne peut être appliquée.

L'approche par système « entité-relation ». Cette approche est centrée sur les acteurs, c'est-à-dire les personnes qui manipulent et transforment les biens en déchets. Elle convient lorsqu'il y a un grand nombre d'acteurs dont il faut pouvoir établir la responsabilité. Par exemple, il s'agira de suivre l'évolution du déchet depuis le producteur jusqu'au traitement d'élimination en passant par le transport, le tri et les traitements de valorisation. Au niveau de chaque acteur, il doit suivre les entrées et les sorties. Cette approche n'est pas adaptée au contexte des pays en développement compte tenu du fait qu'il n'existe aucune réglementation en matière de gestion des déchets : les traitements de valorisation sont encore embryonnaires et ne concernent qu'une faible proportion des déchets non ménagers.

L'approche indirecte par les indicateurs : il s'agit ici de définir un ratio à partir duquel on calcule le flux de déchets d'une entreprise. Ce ratio peut se rapporter soit au produit de base fabriqué, à la surface occupée par l'entreprise, au nombre de salariés ou d'employés. Cette approche est plus commode mais elle comporte des risques importants : les ratios changent en fonction de la technologie utilisée, dans le temps et dans l'espace. C'est pour cela qu'on recommande de faire un test préalable dans la zone géographique qu'on souhaite couvrir avant de déterminer les ratios applicables dans le contexte.

Fort de ce manque de consensus sur les approches d'évaluation des déchets non ménagers, il est présenté ici, et à titre d'exemple, la méthode utilisée pour identifier les déchets non ménagers dans la ville de Yaoundé. La ville de Yaoundé étant plus proche du contexte des autres villes d'Afrique au Sud du Sahara, le lecteur pourra s'en inspirer moyennant quelques adaptations liées à la spécificité locale.

Méthodologie de collecte des données

On s'est préoccupé dans la première phase de collecter les données nécessaires à la quantification de la production des déchets solides non ménagers et de leur caractérisation. La principale méthode utilisée est ba-

sée sur les enquêtes directes par questionnaire auprès des structures de production identifiées. Ces données ont été complétées auprès des entreprises spécialisées dans la collecte des déchets industriels, afin de croiser les informations reçues auprès des producteurs. Ce chapitre présente les méthodologies utilisées pour l'inventaire des déchets et l'analyse des flux de polluants dans les effluents.

Établissement de la base de sondage

Ce paragraphe présente la démarche adoptée pour le choix des unités où les enquêtes vont être conduites.

Stratification des unités de production

De nombreux documents ont permis de constituer une base de sondage exhaustive utilisée par la suite pour mener des enquêtes approfondies sur le terrain et d'évaluer, pour un échantillon donné, le flux de déchets (taux de production des déchets par entreprise).

Ces documents pour la plupart se complètent et présentent des forces et des faiblesses en fonction des contraintes à considérer lors de la constitution de la base de sondage.

1. Le fichier de la Chambre de Commerce et d'Industrie (CCI), document recensant l'ensemble des activités du secteur formel au Cameroun. Ce fichier donne le nom ou raison sociale et la nature de l'activité. En revanche, bien qu'elle soit déterminante pour le travail de terrain, la localisation est souvent omise et se résume souvent à la boîte postale. Par ailleurs, la date de publication de cette base de données n'est pas connue. Après extraction du secteur formel de la ville de Yaoundé et recoupement avec « Yaoundé Zoom », document de 2000-2001 recensant lui aussi le secteur formel, il s'avère que le fichier de la CCI est incomplet. Globalement, on doit avoir 25 % du contenu et de la précision de « Yaoundé Zoom ». Le classement des activités est confus et trop imprécis pour le recensement de toutes les activités productrices de déchets non ménagers, sachant que ce recensement a pour but de quantifier, qualifier et localiser les différents gisements de déchets présents dans la communauté urbaine de Yaoundé. À titre d'illustration, cette base de données ne distingue pas le commerce de gros et de détail, encore moins le type de produits commercialisés. Les branches d'activités ne concordent pas toujours avec celles définies dans la nomenclature NAEMA. En outre, cette base de données ne donne pas d'indications sur le chiffre d'affaires, ni sur les effectifs du personnel. Cette base de données semble donc incomplète et approximative, ce qui a conduit à l'abandon de cette source d'informations.

2. *Activité des entreprises du secteur moderne dans la province du Centre, exercice 1986-1987*, excellente base de données : si seulement les informations contenues dans ce rapport étaient récentes ! Cette base de données très complète listait toutes les entreprises en les classant suivant une nomenclature proche de la nomenclature NAEMA¹⁸, indiquait les chiffres d'affaires effectifs et donnait la structure salariale de l'entreprise ainsi que bien d'autres informations. L'inconvénient est que cette base n'a jamais été mise à jour depuis 1989.

3. *Fichier de la Direction des statistiques et de la comptabilité nationale* est le résultat d'une enquête nationale récente (2001). Ce fichier recense 962 entreprises à Yaoundé imposées au régime fiscal réel ou réel simplifié. Il a été constitué à partir de questionnaires envoyés aux différentes entreprises. L'information est complète : y sont indiqués le chiffre d'affaires, la localisation, le secteur d'activité suivant la nomenclature NAEMA. Il donne les effectifs du personnel de chaque entreprise et son chiffre d'affaires. Cependant, il existe quelques limites à cette base de données. En effet, cette étude était censée porter sur les entreprises imposées au régime réel ou réel simplifié. Or, en croisant la base de données avec les tableaux donnant la répartition des entreprises en fonction des secteurs d'activités et du chiffre d'affaires en 2000, on constate que seules 27 % de ces entreprises sont soumises au régime réel ou réel simplifié, ce qui révèle que le questionnaire n'a pas toujours été rempli correctement (regrettable tendance à estimer son chiffre d'affaires à la baisse). De même, on constate que 63,4 % des entreprises enquêtées comptent moins de 10 salariés, ce qui est relativement important et qui peut paraître incohérent au vu de la taille de ces entreprises.

4. *Yaoundé Zoom (le premier guide des activités socio-économiques de Yaoundé)* présente les différentes entreprises de Yaoundé ainsi que leurs activités principales. Ce document produit en 2000-2001 et réactualisé chaque année a permis de compléter la base de données de la Direction des statistiques et de la comptabilité nationale (on a pu extraire de ce document les entreprises qui sont soumises au régime de base), amenant le nombre d'entreprises du secteur formel à environ 2 690. En outre, ce document a permis d'identifier les entreprises à enquêter dans chaque sous-groupe d'activités homogènes et de les localiser. Cette base apparaît comme étant la plus complète. Ce guide est réalisé de la même façon pour les autres villes de l'Afrique de l'Ouest et du Centre comme Dakar, Douala, Cotonou et Lomé.

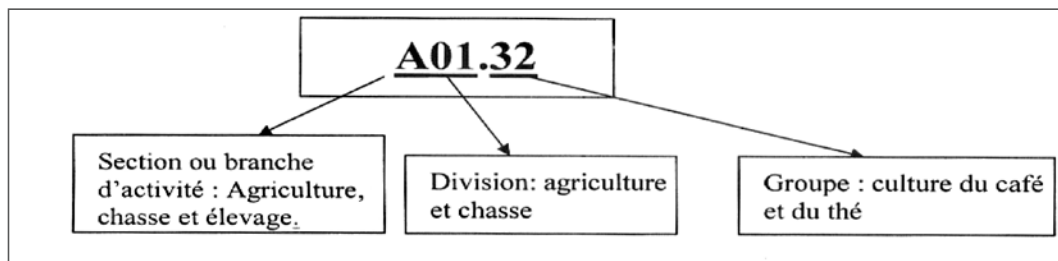
18 Nomenclature des Activités des Etats Membres de l'Afristat.

5. Base de données des activités soumises à l'impôt libérateur : à partir de la notice d'informations sur l'impôt libérateur, on a relevé la liste des activités commerciales ou industrielles ne relevant ni du régime du bénéfice réel, ni du régime simplifié d'imposition ainsi que les activités des contribuables relevant des bénéfices agricoles dont le chiffre d'affaires est inférieur à 1 000 000 FCFA. Ces activités sont considérées comme appartenant au secteur informel et, à ce jour, aucune base de données recensant les activités du secteur informel n'existe. Parmi ces activités, les plus intéressantes ont été choisies pour l'étude des activités non négligeables en terme de rejet de déchets (polluants, DIS) telles que les garages, menuiseries, laveries auto, vitreries, studios photo, teintureries... À partir de cette sélection, une fiche d'identification des activités de production du secteur informel a été élaborée sous forme de tableau. Les enquêteurs munis de cette fiche ont quadrillé la ville de Yaoundé préalablement découpée en 30 secteurs ou en 24 bassins versants et l'on a pu ainsi constituer, après traitement et saisie des fiches d'enquêtes, une base de données recensant près de 10 000 unités informelles. L'équipe estime avoir touché 95 % des activités visées. C'est à partir de cette base de données qu'un échantillon représentatif sera confectionné pour des enquêtes approfondies portant sur la nature et la quantité des déchets produits par ce vaste secteur d'activité. Le taux de sondage choisi a été de 1/100e pour des raisons de temps et de moyens (humains et financiers), soit une centaine d'activités retenues. Il est important de préciser que les débits de boisson ont été volontairement retirés de l'étude car ils sont extrêmement nombreux. Les secteurs les plus importants sont les salons de coiffure, les ateliers de couture, de recharge de batteries, de réparation de roues et garnissage, les garages sans vidange, les menuiseries métalliques, les menuiseries sans machines. Parmi les bassins versants les plus denses en terme d'activités informelles, il y a celui de l' Abiergoue-Ekooza, celui de la Biyéme et celui de l'Ewoué.

6. Document Nomenclature d'Activités des États Membres d'Afristat (NAEMA), DSCN : la nomenclature des activités permet de classer des unités statistiques. Ces unités peuvent être des entreprises, des établissements, des unités de production homogène. Les unités doivent être classées dans la rubrique qui décrit le mieux leur activité, compte tenu notamment de leur production. C'est à partir de cette nomenclature qu'ont été constitués les échantillonnages dans chacune des strates homogènes, c'est-à-dire dans chacune des branches d'activité définies par la nomenclature NAEMA. Cette nomenclature présente 4 niveaux de précision : sections, divisions, groupes, classes. Il a été choisi de considérer le troisième niveau pour stratifier au mieux l'activité et qualifier les types de déchets générés.

À titre d'illustration, cette nomenclature se présente de la manière suivante :

Tableau 24 : Présentation de la nomenclature NAEMA



Au terme de cette phase exploratoire, on a obtenu une base de données assez complète des activités économiques de Yaoundé. Cette base de données par son élaboration comporte plusieurs niveaux de stratification portant soit sur le type d'activité désignée par la nomenclature NAEMA soit sur le type de régime d'imposition (libératoire, de base, réel, réel simplifié).

Élaboration de la base de sondage

La méthode par enquête étant retenue pour la quantification des déchets, il était utile de définir une base de sondage devant permettre de préparer les enquêtes de terrain. Pour établir la base de sondage, on a utilisé trois sources d'information :

L'enquête entreprise réalisée par la direction des statistiques du ministère des Finances. Cette enquête qui s'est déroulée en 2001 a porté sur environ 11 000 entreprises dont 962 basées à Yaoundé. Pour cette base de données, seules les entreprises ayant plus de 60 millions de francs CFA (suivant la déclaration du dernier exercice budgétaire) de chiffre d'affaires annuel sont recensées. Toutes ces entreprises sont classées suivant leur secteur d'activité tel que défini dans le code NAEMA.

La base du MINEFI a été complétée par les entreprises répertoriées dans « Yaoundé Zoom », qui a un répertoire de 2 688 entreprises classées suivant le secteur d'activité. Il a fallu pour cela remettre ces entreprises dans le même système de classification que celui utilisé par le MINEFI. Les activités de commerce (27 %) et de service (17,5 %) sont prépondérantes. Les activités de fabrication, qui sont théoriquement les plus gros producteurs de déchets, ne représentent que 8,5 % des unités répertoriées. Les établissements de soins (5,7 %), de l'éducation (5,8 %), les administrations publiques (5 %) sont peu représentés (tableau n° 25).

Les entreprises soumises à l'impôt libératoire, généralement relevant du secteur dit « informel » ne figurent pas dans ce répertoire élargi. On a été conduits à compléter la base en faisant une enquête préliminaire d'identification des activités soumises à l'impôt libératoire. Seules les activités qui paraissent comme étant les plus grands générateurs des déchets ont été considérées. Il s'agit par exemple des réparateurs des pneus, des ateliers de froid et climatisation, des ateliers de menuiserie métallique, des garages, des menuiseries, des ateliers de peintures ou de couture. À l'issue des enquêtes d'identification menées, environ 10 000 unités de productions soumises à l'impôt libératoire ont été identifiées.

Constitution de l'échantillon

La construction de l'échantillon pose trois types de problèmes : le choix d'une technique d'échantillonnage, l'existence d'une base de sondage et la détermination de la taille de l'échantillon.

Pour le choix de l'échantillon, le sondage stratifié sera utilisé. Cette méthode de sondage s'impose dans le cadre de cette étude compte tenu du fait que la population de référence est peu homogène. On a alors défini pour chaque catégorie de producteur les sous-ensembles homogènes de population. Le prélèvement (choix de la population à enquêter) s'est ensuite effectué dans chaque strate par tirage au sort. Dans chaque strate, la taille de l'échantillon est rapportée au degré d'homogénéité de la strate. Moins la strate est homogène, plus la dispersion risque d'être grande et plus l'échantillon devra être important.

La taille de l'échantillon a été choisie de façon à minimiser les erreurs lors de l'extrapolation. Mais compte tenu du manque d'information sur la production des déchets des différents secteurs, il n'a pas été possible de calculer a priori la taille minimale sur la base des théories statistiques. Un échantillon global de 400 unités de production dont 300 unités formelles et 100 unités informelles a finalement été retenu.

Pour les établissements de soins, tous les hôpitaux de référence ont fait l'objet d'investigations (hôpital central, CHU, hôpital général), en plus de quelques hôpitaux d'arrondissement, ainsi qu'un échantillon des autres lieux de soins (centre de santé, dispensaire, infirmerie, cabinet d'analyse, cliniques, etc.), dont la taille a été fixée en fonction du nombre d'établissements recensés, et dans cette branche, 30 établissements ont été étudiés.

24 établissements publics, intégrant les ministères, les services déconcentrés, les communes, ont été retenus, sur la base d'un taux de sondage moyen de 10 %. Cette même base de sondage a été retenue pour les activités des autres branches en dehors des industries manufacturières où l'on a multiplié l'échantillon de base par deux pour tenir compte de la disparité qui existe entre les activités de cette branche.

Tableau 25 : Répartition des unités formelles retenues par branche d'activité

Branche d'activité	Nombre total d'unité répertoriée	% par rapport au total	Nombre d'unité retenue pour l'enquête
Agriculture (A)	17	17,6 %	3
Activité de fabrication (D)	224	19,6 %	44
Production et distribution d'électricité et eau	24	12,5 %	3
Construction (F)	62	11 %	7
Commerce et réparation de voiture et d'articles domestiques (G)	713	10 %	71
Hôtel et restauration (H)	152	10 %	15
Transport et communication (I)	90	11 %	10
Activités financières (J)	161	10 %	16
Immobilier et service aux entreprises (K)	459	10 %	46
Activités d'administration publique (L)	232	10 %	24
Éducation (M)	152	10 %	15
Activité de santé et d'action sociale (N)	150	20 %	30
Activité à caractère collectif ou personnel (O)	141	10 %	14
Organismes internationaux/ONG (P)	111	4,5 %	5
Total	2 687		303

Au total, 303 unités ont été retenues. Le choix de l'unité à enquêter s'est fait sur la base du régime d'imposition et du secteur d'activité. Ainsi, toutes les unités de plus de 500 millions de FCFA de chiffre d'affaires annuel ont été retenues (régime réel d'imposition). Dans les autres tranches, on a opéré un tirage au sort de façon à assurer une représentativité de toutes les tranches. Les entreprises retenues ont été localisées à partir d'un plan de localisation fourni par « Yaoundé Zoom ». Sur le terrain, il a été constaté que 10 % des entreprises ont déménagé ou ont été mal localisées, il a fallu recouper les informations auprès des autres entreprises du secteur pour retrouver leur nouvel emplacement.

En ce qui concerne les unités de production informelle, le choix du nombre d'unité par secteur s'est fait sur la base de l'effectif total recensé par zone. Un taux de sondage de 1/100^e a été appliqué. Seul le nombre

d'unités par secteur d'activité et par zone a été défini, le choix étant laissé à chaque enquêteur pour sélectionner l'unité de production à enquêter dans chaque zone.

Élaboration du questionnaire

À l'issue de ce travail d'exploration, un questionnaire a été réalisé sur les activités formelles et un autre pour les activités informelles. D'une façon générale, ce questionnaire permettait de connaître les quantités des déchets générés ou les quantités de produits consommés quand les flux de déchets s'avéraient difficiles à obtenir ou peu fiables.

Après son élaboration, le questionnaire a été testé afin de vérifier auprès des populations cibles :

- Si les termes utilisés sont facilement compréhensibles et dépourvus d'équivoque;
- Si l'ordre des questions ne suscite pas de réaction de déformation;
- Si la forme des questions utilisées permet de recueillir les informations souhaitées;
- Si le questionnaire n'est pas trop long.

Il apparaît que les chefs d'entreprise sont très réticents pour fournir leurs chiffres d'affaires, ainsi que les quantités réelles de produits fabriqués ou commercialisés. Il est donc nécessaire d'utiliser d'autres techniques que la question directe pour avoir ces données.

Administration du questionnaire

La méthode qui consiste à conduire des entretiens directs avec les chefs d'entreprises permet de respecter au mieux la composition de l'échantillon et de choisir son interlocuteur. Elle donne également la possibilité d'aider la personne interrogée quand les questions sont complexes. Les lettres individualisées ont été adressées à chaque entreprise retenue. Ces courriers ont été portés par l'enquêteur en charge de l'entreprise retenue. Il a fallu au minimum trois rendez-vous pour remplir le questionnaire dans chaque entreprise. Les autres, plus sceptiques, ont carrément refusé de répondre au questionnaire, ce qui quelquefois a conduit à des remplacements par des entreprises du même secteur d'activité et ayant une même tranche de chiffre d'affaires, mais ce n'est pas toujours possible surtout s'il s'agit d'entreprises ayant un chiffre d'affaires de plus de 500 millions de francs CFA. Il faut aussi éviter dans ce type d'investigation de choisir les périodes très sensibles pour la réalisation de l'enquête, comme par exemple la période préélectorale.

Les facteurs explicatifs utilisés pour l'extrapolation des résultats

Il est apparu difficile d'avoir une variable de contrôle pouvant servir de facteur explicatif pour l'extrapolation des résultats. L'information la plus crédible dont on disposait sur toutes les unités de production porte uniquement sur son secteur d'activité. Le fichier des entreprises du ministère de l'Économie et des Finances donne l'effectif total du personnel et la tranche du chiffre d'affaires. Mais ces informations paraissent très peu crédibles dans la mesure où plus de 50 % des entreprises que l'on retrouve dans cette base de données déclarent avoir un chiffre d'affaires de moins de 60 millions de francs CFA, alors qu'elles étaient censées être au-dessus. Ensuite, cette donnée n'est disponible que pour moins de 40 % des entreprises répertoriées. La tendance générale est de sous-estimer son chiffre d'affaires, car les entreprises ont peur que ces informations soient utilisées par les concurrents ou par les impôts. Les incertitudes sont très prononcées dans les entreprises dont le chiffre d'affaires est compris entre 15 et 100 millions de francs CFA.

En ce qui concerne l'effectif du personnel, les informations reçues ne font aucune différence entre le personnel administratif et de production. Ce qui rend difficile une corrélation entre le nombre de personnel de l'entreprise et la quantité des déchets produits. L'effectif du personnel productif apparaît comme étant une donnée importante pour extrapoler la production des déchets sur l'ensemble des activités recensées dans une branche.

D'une façon générale, deux paramètres ont été utilisés pour l'extrapolation des résultats :

- Le secteur d'activité de l'entreprise ;
- Le régime d'imposition qui traduit la classe du chiffre d'affaires.

Dans ce cas précis, on retiendra uniquement quatre catégories : plus de 500 millions, entre 100 et 500 millions, entre 15 à 100 millions et moins de 15 millions de FCFA (activités soumises à l'impôt libératoire).

Pour valider les résultats obtenus, on a utilisé la production réelle des entreprises qui amènent leurs déchets en décharge municipale où ils sont pesés pendant les six mois précédant l'enquête. Cette phase de validation permet de se rendre compte de la pertinence des paramètres d'extrapolation et de leur correction en cas de nécessité, ainsi que d'une estimation de l'erreur statistique sur les résultats des travaux.

PRODUCTION ET CARACTÉRISTIQUES DES DÉCHETS SOLIDES NON MÉNAGERS

Le cas des déchets industriels générés à Yaoundé au Cameroun

Pour une meilleure estimation des flux et pour un contrôle des quantités fournies par estimation par les entreprises, la question permettant de l'obtenir était doublée d'une autre portant sur le volume des conteneurs ou des poubelles utilisés et la fréquence de collecte. Lorsque l'écart était important entre les deux estimations, on procédait à une vérification auprès de l'entreprise concernée. Cette estimation était difficile dans les entreprises produisant peu de déchets, parce qu'elles les déversent directement dans les tas d'ordures qui sont situés dans la rue la plus proche; dans ce cas l'entreprise ne dispose que de petites poubelles vidées à des fréquences irrégulières.

Tableau 26 : Production des déchets solides non ménagers à Yaoundé par branche d'activité

Branche d'activité	Nombre total	Prod. mensuelle (tonne)	Pourcentage
Agriculture (A)	17	322,1	7,0 %
Activité de fabrication (D)	224	2 026,3	44,0 %
Électricité et eau (E)	24	6,0	0,1 %
Construction (F)	62	58,0	1,3 %
Commerce (G)	713	1 091,2	23,7 %
Hôtel et restauration (H)	152	156,2	3,4 %
Transport et communication (I)	90	19,9	0,4 %
Activités financières (J)	161	60,4	1,3 %
Immobilier et service (K)	459	57,5	1,2 %
Administration (L)	232	167,2	3,6 %
Éducation (M)	152	385,9	8,4 %
Santé et action sociale (N)	150	226,0	4,9 %
Activité collective ou personnelle (O)	141	16,2	0,4 %
Activité extra territoriale (Q)	111	15,9	0,3 %
Total	2 688	4 608,8	100,0 %

Les résultats contenus dans ce tableau n'intéressent que les activités industrielles soumises au régime réel, réel simplifié et au régime de base. Les activités soumises au régime d'impôt libératoire ont fait l'objet d'une enquête spécifique. À Yaoundé, les unités industrielles produisent en moyenne 4 609 tonnes de déchets solides par mois tous secteurs confondus. Du fait de la relative difficulté pour les entreprises à faire une estimation de leur tonnage mensuel de déchets (correspondance entre m³, nombre d'unités et tonnes, très fluctuante en fonction de la nature des déchets), d'une part, et d'autre part la difficulté de l'extrapolation qui a été réalisée, on peut estimer que les résultats sont exprimés avec une marge d'erreur de 20 %. Cependant, l'analyse croisée qui est faite impose une présentation des résultats à la tonne près.

Les résultats présentés au tableau n° 26 font apparaître quatre groupes de producteurs en fonction des quantités qui sont générées :

- Les gros producteurs ;
- Les producteurs moyens ;
- Les petits producteurs ;
- Les producteurs marginaux.

- les gros producteurs

Les résultats de l'enquête font apparaître la place prépondérante de la branche « fabrication » avec 44 % du tonnage total des déchets produits par les entreprises (2 026 tonnes par mois). La division (sous-branche) des industries agroalimentaires avec une production moyenne de 1 770,6 tonnes de déchets par mois contribue à 87,4 % de la production des déchets de cette branche. Les deux autres divisions les plus productrices de déchets de cette branche sont : le travail de bois (120 tonnes de déchets par mois), les imprimeries et éditions (58 tonnes par mois) et la fabrication des articles en papier (60 tonnes par mois). La participation des autres divisions à la production des déchets reste marginale (entre 1 et 5 tonnes de déchets par mois). La faiblesse de la production des déchets dans ces branches se justifie par leur faible volume d'activité. La seule entreprise de fabrication de tabac présente à Yaoundé génère environ 8,5 tonnes de déchets par mois.

- les producteurs moyens

On a regroupé ici les branches d'activités qui produisent entre 300 et 400 tonnes de déchets par mois. Les branches agriculture, enseignement et commerce font partie des producteurs moyens. Dans la branche agriculture, élevage et chasse, c'est l'élevage de volailles qui est le plus gros producteur avec plus de 300 tonnes de déchets par mois. L'essentiel de ces

déchets est constitué de fientes de poule qui sont entièrement récupérées par les agriculteurs pour fertiliser les sols.

Dans la branche «commerce», ce sont les supermarchés qui contribuent le plus à la production des déchets (70 tonnes par mois). Les déchets des activités de cette division ont l'avantage d'être regroupés et faciles à enlever. Les activités de vente d'automobiles et des sociétés pétrolières produisent environ 31 tonnes de déchets par mois. Les activités de vente de détail (G22), produisent presque la moitié des déchets de cette branche (145 tonnes par mois). Ces déchets ont la particularité d'être très diffus, car la moyenne de production se situe à moins de 400 kg par mois (moins de 16 kg/jour). Du fait de cette faible production, ces déchets sont rejetés directement dans les bacs à ordures. La production des déchets de cette branche est grossie par les boues des fosses des industries pétrolières et les boues des fosses septiques de ces unités qui sont estimées environ à 480 tonnes par mois.

La branche éducation (enseignement primaire, secondaire et supérieur) produit environ 393 tonnes de déchets par mois. C'est l'enseignement secondaire qui contribue le plus à cette production. Dans cette rubrique, il n'a pas été tenu compte des déchets produits par les restaurants universitaires. Ils sont plutôt comptabilisés dans la branche « hôtel et restauration ». Tous les déchets générés ici sont soit brûlés soit entreposés dans les bacs.

- les petits producteurs

Comme petits producteurs, les branches d'activités qui produisent entre 100 et 300 tonnes de déchets solides par mois ont été retenues. Trois branches d'activités appartiennent à ce groupe : les activités de santé et d'action sociale (226 tonnes par mois), les hôtels et restaurants (156 tonnes par mois) et les administrations publiques (167 tonnes par mois).

Pour les activités de santé, près de 80 % du gisement des déchets sont produits par les hôpitaux de grande envergure. Tandis que les hôtels sont les plus gros producteurs de la branche « hôtels et restaurants ».

- les producteurs marginaux

Ce sont les branches d'activités qui produisent moins de 100 tonnes de déchets par mois. 7 branches d'activités sur les 14 enquêtées contribuent de façon très marginale à la production des déchets solides industriels. Il s'agit de :

- La production et distribution de l'électricité et de l'eau (6 tonnes par mois);
- La construction (58 tonnes par mois). L'essentiel des déchets des activités de cette branche est produit dans les chantiers situés hors de la

ville. On n'a comptabilisé ici que les déchets produits dans les bureaux situés dans la ville ;

- Les activités financières et d'assurance (60 tonnes de déchets par mois) ;
- Les activités immobilières et services rendus aux entreprises (58 tonnes par mois) ;
- Les activités à caractère collectif ou personnel (11 tonnes par mois) ;
- Les activités extraterritoriales (missions diplomatiques et organisations internationales) (16 tonnes par mois).

Les 7 secteurs d'activités les plus producteurs de déchets solides génèrent à eux seuls 92,7 % du gisement, tandis que les 7 autres branches d'activités marginales ne produisent que 7,3 % du gisement. 1 048 entreprises sont répertoriées dans les 7 branches d'activités ayant une production marginale. Chacune de ces entreprises produit alors en moyenne 200 kg de déchets par mois (8 kg de déchets par jour).

Nature des déchets solides industriels

La composition des déchets industriels peut varier dans des proportions importantes d'une branche d'activité à l'autre. Le tableau n° 27 présente la composition globale des déchets industriels de Yaoundé.

Tableau 27 : Composition des déchets industriels à Yaoundé

Nature des déchets	Quantité	Pourcentage
Papiers	382,5	8,3 %
Déchets alimentaires	109,4	2,4 %
Déchets fermentescibles	1 896,6	41,1 %
Cartons	93	2,0 %
Bois, copeaux et sciure	148	3,2 %
Verre creux	135,7	2,9 %
DIB en mélange	580	12,6 %
Déchets spéciaux	63,7	1,4 %
Déchets hospitaliers	205	4,4 %
Boue de décantation primaire	360	7,8 %
Boue des fosses	480	10,4 %
Autres	155,5	3,4 %
Total	4 608,8	100 %

Les déchets industriels de Yaoundé sont dominés par les fractions fermentescibles, les déchets industriels en mélange, les boues des fosses septiques et les papiers cartons.

Les déchets fermentescibles

Les déchets fermentescibles produits par les entreprises de Yaoundé sont estimés à 1 896,6 tonnes par mois (41 % du gisement) (tableau n° 28). Ces déchets sont produits presque exclusivement par les industries agroalimentaires (71 % du gisement) et le secteur d'agriculture et d'élevage (29 % du gisement).

Tableau 28 : Composition des déchets fermentescibles

Catégorie	Quantité (tonnes/mois)	Pourcentage
Fientes	300	15,8 %
Coquilles d'œuf et poussins morts, poissons périmés	25	1,3 %
Déchets verts	13,8	0,7 %
Matières stercoraires	57,8	3,0 %
Drêches	1500	79,1 %
Total	1 896,6	100,0 %

Avec près de 1500 tonnes de drêches par mois, les industries de fabrication de boisson alcoolique contribuent à 79 % à la production des déchets fermentescibles. Les fientes de poules et les matières stercoraires, extraites de la panse des bovins et ovins à l'abattoir, représentent respectivement 16 % et 3 % des déchets fermentescibles produits par les entreprises à Yaoundé (figure n° 14). La baisse de la productivité de l'abattoir a entraîné une diminution importante de la quantité de matières stercoraires rejetées. Si la capacité de l'abattoir est atteinte, il pourrait produire environ 192 tonnes de matières stercoraires par mois. Les drêches sont entièrement récupérées par les éleveurs et servent d'aliments aux porcs. Des marchés informels de détail de drêches existent déjà dans quelques quartiers de la ville. Ce phénomène a été amplifié depuis la dévaluation du franc CFA car les petits éleveurs n'ont plus de moyen d'acheter les provendes.

Les carcasses d'animaux et les déchets verts représentent moins de 2 % des déchets fermentescibles.

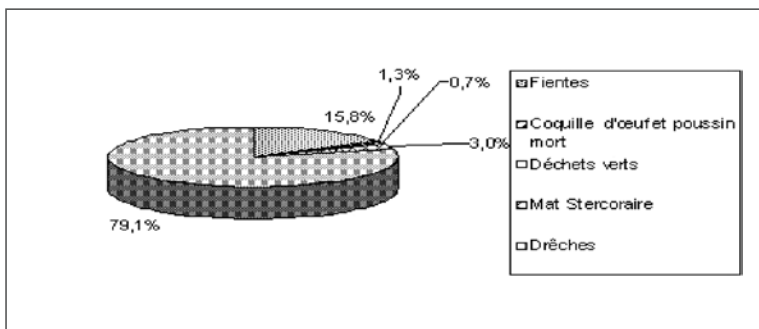


Figure 14 : Composition des déchets fermentescibles des entreprises de Yaoundé

Les DIB en mélange

Y sont regroupés tous les déchets assimilables aux ordures ménagères produits par les entreprises. Ce sont les établissements scolaires et universitaires qui contribuent le plus à la production des DIB (248 tonnes par mois), suivis des administrations publiques (97 tonnes par mois).

Les boues de vidange des fosses septiques

Évaluées à 480 tonnes par mois, elles sont produites par les entreprises de toutes les branches d'activités. Leur volume est lié au nombre de personnel permanent de l'entreprise.

Les déchets de papiers et cartons

Ils sont produits aussi par toutes les entreprises. Le papier (382,5 tonnes par mois) représente 8,3 % du gisement total des déchets solides industriels. Mais quatre branches d'activités concentrent à elles seules 80 % de tout le gisement de papier. Il s'agit de : l'éducation (127 tonnes par mois), le commerce (69 tonnes par mois), l'administration (47 tonnes par mois) et les banques et les assurances (36 tonnes par mois). Quant aux cartons, leur production reste relativement faible (93 tonnes par mois). Ils sont produits dans les commerces (52 tonnes par mois), les banques et assurances (24 tonnes par mois).

Les déchets spéciaux produits par les hôpitaux

Évalués à 205 tonnes par mois, ils sont produits exclusivement dans les hôpitaux, les cliniques, les laboratoires d'analyses médicales. Ce sont essentiellement les déchets issus des opérations de soins ou d'analyse de laboratoire. On y retrouve les déchets de soins (compresses, perfuseurs, aiguilles, etc.), les placentas, les médicaments périmés, etc. La plupart de ces déchets sont mis en décharge. Seuls les grands hôpitaux transportent les déchets à la décharge, les petites unités rejettent directement leurs dé-

chets dans les bacs à ordure. Les déchets assimilables aux ordures produits par les hôpitaux ne sont pas comptabilisés ici.

Les déchets de bois, copeaux et sciures

Ils sont produits par les entreprises mais sont marginaux à Yaoundé (148 tonnes par mois). Ces déchets sont produits presque exclusivement par les entreprises de transformation de bois (120 tonnes par mois). On retrouve aussi les déchets de bois et des sciures dans les entreprises de déménagement (10 tonnes par mois) et les activités de la construction (13 tonnes par mois). Ils servent pour l'emballage des objets avant leur exportation (10 tonnes par mois).

Les déchets alimentaires

Évalués à 109 tonnes par mois, ils sont produits presque exclusivement par les hôtels et les restaurants (90 tonnes par mois). On les retrouve aussi dans les déchets de cantines des grandes entreprises de commerce.

Les autres déchets solides

Dans la catégorie *autres*, on a regroupé : les plastiques (47,9 tonnes par mois), les métaux ferreux (12,9 tonnes par mois) et non ferreux (5,6 tonnes par mois), les verres plats (1,1 tonne par mois), les déchets complexes représentant les carcasses de petits équipements (12,8 tonnes par mois), les restes de levures de bière (12 tonnes par mois), les poussières de tabac (4 tonnes par mois), les plumes, les os et les cornes (4,6 tonnes par mois), les déchets de cellulose produits par une entreprise de fabrication de papier hygiénique, d'alvéoles et d'autres produits à base de papier. Dans cette catégorie, on retrouve enfin les déchets complexes. La production des déchets de textiles et de l'aluminium est très insignifiante (environ 300 kg par mois) (figure n° 15).

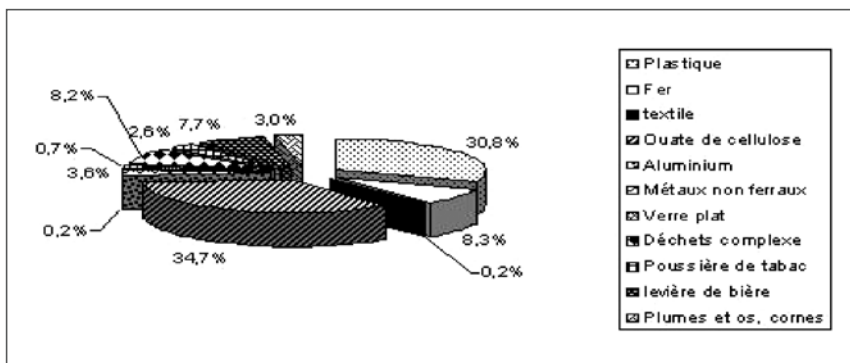


Figure 15 : Composition des déchets de la catégorie « autres »

Les déchets industriels spéciaux (DIS)

Évalués à 629,7 tonnes par mois, ils sont concentrés sur un nombre limité d'entreprises (hôpitaux, dépôt pétrolier, garages, industries chimiques, imprimeries, etc.).

Ils sont surtout constitués par les emballages souillés (44 tonnes par mois) par les huiles, les solvants et peintures, les cartouches d'encre, les acides et les déchets de laboratoire, la boue de perchloroéthylène (1,2 tonne par mois) qui est un déchet très toxique issu du nettoyage à sec des habits. Il est produit par les pressings. Les hôpitaux et la société de dépôts pétroliers sont les plus gros producteurs de déchets industriels spéciaux. Ils concentrent 89,7 % de la production. Les encres d'imprimante représente 7 % de la production des déchets spéciaux, ils proviennent principalement des administrations, des services et des établissements d'enseignement. Un problème spécifique est posé par ces déchets qui se retrouvent dispersés dans la masse totale de déchets industriels banals représentant plus de 86 % de la production.

Destination des déchets industriels

La grande majorité des entreprises enquêtées (63 %) mettent les déchets dans les bacs à ordures. Ils sont donc collectés en même temps et au même titre que les ordures ménagères (tableau n° 29). Cette situation se justifie pour la plupart des entreprises, car elles produisent peu de déchets.

Tableau 29 : Destination des déchets industriels de Yaoundé

Type de traitement	Nombre	Pourcentage
Incinération	24	8,4 %
Transport en décharge	42	16,7 %
Valorisation externe	18	7,5 %
Rejet dans un bac	155	61,7 %
Recyclage	8	3,2 %
Mise en décharge à l'intérieur de l'usine (enfouissement)	4	1,6 %
Total	251	100 %

16,7 % des entreprises enquêtées déclarent avoir recours à une entreprise privée pour transporter leurs déchets à la décharge de Nkolfoulou. Mais seulement 16 entreprises ont donné les noms et adresses des privés qui assurent la collecte de leurs déchets.

8,4 % des entreprises enquêtées incinèrent leurs déchets à l'intérieur de l'usine. Cette pratique est très fréquente dans les administrations publiques, les banques et les assurances. Les déchets incinérés sont essentiellement du papier, du carton et des plastiques. Seul l'hôpital général de Yaoundé incinère ses déchets spéciaux. La pratique d'incinération dont on parle ici consiste uniquement à brûler les déchets à l'air libre, sans aucun contrôle des émissions. Ceci devient dangereux surtout lorsqu'il s'agit du plastique et de certains déchets spéciaux. Leur incinération génère des gaz acidifiants comme le HCl ou des gaz cancérigènes comme le phosgène.

7,5 % des entreprises enquêtées déclarent que leurs déchets sont valorisés par d'autres entreprises, des ménages isolés ou des activités du secteur informel. Les déchets concernés sont le papier, le carton, les bidons en plastiques (souillés ou non), les déchets de bois et les copeaux de bois, certains déchets fermentescibles comme les drêches et les fientes. Les groupes d'activités dont les déchets sont concernés ici sont : l'élevage, les industries agroalimentaires, les commerces, les stations services, les industries de transformation de bois, les commerces. Malgré leur caractère souillé par les produits chimiques, les emballages des huiles sont récupérés et réutilisés dans les garages et même par les ménages.

Seulement 3,2 % des entreprises enquêtées recyclent leurs déchets et 1,6 % éliminent leurs déchets dans les fosses creusées à l'intérieur de l'usine. Cette pratique se rencontre dans certains hôpitaux et ne concerne que les déchets hospitaliers.

- le recyclage des déchets industriels

Il s'agit ici d'une réutilisation ou bien d'une transformation des déchets produits dans la même entreprise à l'intérieur de l'usine pour la fabrication d'autres produits. La quantité de déchets subissant ce mode de traitement est insignifiante parce que la plupart des entreprises ne considèrent pas comme déchets les sous-produits utilisés pour la fabrication des nouveaux objets. Il faut néanmoins signaler que cette pratique n'est pas très courante dans les industries de Yaoundé où l'on rencontre plus des cas de réutilisation que de valorisation. 65 % des entreprises qui ont répondu aux questionnaires déclarent ne pas être au courant des filières de traitement adaptées à la nature de leurs déchets. Seules quelques entreprises ont fait des études pour une meilleure utilisation de leurs déchets. Les déchets recyclés sont les chutes d'aluminium, les bidons ayant contenu des produits alimentaires, les téléviseurs usés, les sciures de bois. Les quantités concernées sont faibles.

- la valorisation externe

Ce mode de traitement s'est considérablement développé depuis deux ans à cause des difficultés économiques qui ont conduit les citoyens à s'investir davantage dans l'agriculture urbaine et l'élevage. Les drêches qui jusqu'en 1992 posaient énormément de problèmes d'élimination à l'industrie brassicole de la place sont de nos jours reprises totalement par les éleveurs à 1 000 FCFA/tonne (prix de départ de l'usine sans compter les frais de transport qui peuvent être évalués à 2 500 FCFA/tonne pour une distance de moins de 5 km). La drêche, qui était considérée comme un déchet il y a de cela 5 ans, est devenue un sous-produit dont l'apport dans le chiffre d'affaires de l'entreprise n'est pas négligeable. Pendant trois jours d'observation faite sur place, 50 personnes en moyenne se ravitaillent en drêche quotidiennement, provoquant souvent une rupture de stock à partir de 8 heures du matin. Ce phénomène a été amplement expliqué par quelques éleveurs sur le terrain. En effet, le nombre d'unités d'élevage n'a pas considérablement augmenté entre 1992 et 2005, mais la dévaluation du franc CFA survenue en janvier 1994 a occasionné le doublement des prix des provendes; selon les estimations du ministère de la Pêche et de l'Élevage, le prix de la viande a augmenté d'au moins 15 % entre 1990 et 1997. Pour rester compétitifs, les éleveurs ont alors été contraints de fabriquer leurs propres provendes, d'où le recours massif à la drêche. La valorisation à l'extérieur de l'usine ne concerne que la réutilisation par les acteurs des autres secteurs. C'est ainsi que les matières organiques riches en azote (déjection animale) sont réutilisées par les agriculteurs pour la fertilisation des sols. Le coût de reprise de cet amendement varie entre 13 000 et 20 000 FCFA la tonne. Ces produits sont souvent transportés sur plus de 300 km (à l'ouest du pays) pour être revendus au moins le double de leur prix initial. Ce mode de valorisation apparaît aujourd'hui comme la voie par excellence d'élimination des déchets industriels à Yaoundé. En faible quantité, les déchets tels que : les plastiques (bouteilles en PVC, sacs en polypropylène ou en polyéthylène), les papiers, ainsi que les déchets alimentaires sont aussi concernés par cette filière.

Les repreneurs de ces déchets sont :

- Les artisans, qui réutilisent les sacs en polypropylène, les plaques des imprimeries, les chutes de bois, les fûts. Les sacs sont réutilisés en l'état ou utilisés pour coudre les petits sacs de marchés, les plaques ou les chutes d'aluminium sont utilisées dans les fonderies pour la fabrication des marmites, les chutes de bois sont utilisées pour la fabrication des jouets, en dehors de ces trois produits, les autres sont réutilisés en l'état;

- Les commerçants : ils récupèrent les sacs en polypropylène, les bidons et bouteilles en PVC, les papiers d'imprimerie, les sacs en papiers provenant des boulangeries. Tous ces produits sont réutilisés en l'état pour le conditionnement des denrées alimentaires (djinja, huile de palme, emballage des beignets,...);
- Les cultivateurs, qui récupèrent les fientes de poules, les drêches, pour l'amendement des plantations;
- Les copeaux et les sciures de bois, ainsi que les déchets de bois sont récupérés par les ménages pour la cuisine. Il existe un circuit organisé de vente de sciures qui sont récupérées dans les industries de transformation de bois. Le sac de 35 kg de sciures se vend 500 FCFA, alors que le sac de copeaux se négocie entre 100 et 200 FCFA dans les menuiseries.
- Les ménages qui récupèrent les sacs en polypropylène, les bouteilles en PVC pour la conservation d'eau potable, les copeaux et les sciures de bois pour la cuisson des aliments, ...
- D'autres industries de la ville ou hors de la ville. Ici on retrouve uniquement la SOCAVER, l'industrie de fabrication de verre basée à Douala qui récupère l'intégralité des verres cassés des brasseries de la place, soit environ 0,2 % de la quantité de bouteille qui transite par cette usine (80 tonnes par mois).

D'une manière générale, les coûts de reprise de ces déchets varient de 0 à 2 millions de francs CFA par tonne. Ce sont les déchets alimentaires des restaurants et hôtels qui sont récupérés gratuitement, tandis que les sous-produits les plus chers sont les sacs en polypropylène qui sont vendus aux commerçants 100 FCFA par unité (la masse unitaire d'un sac est de 20 grammes). L'aluminium est vendu aux artisans de 150 à 200 FCFA par kg. Mais pour les plaques encore en bon état, elles sont revendues plus cher pour la réalisation de plafonds.

Malgré le fait que ce secteur soit encore non réglementé, la réutilisation des déchets des industries absorbe 47 % de la production actuelle des déchets industriels de Yaoundé, d'où la nécessité pour les pouvoirs publics de favoriser ce genre d'échange en adoptant une réglementation visant à protéger les consommateurs. Car la plupart de ces déchets sont réutilisés en l'état comme emballage des produits alimentaires.

Le nombre d'entreprises qui réutilisent dans leur processus des produits de récupération sont rares. On n'a retrouvé que 26 unités, soit 10,6 % des entreprises enquêtées, qui pratiquent le recyclage des déchets venant d'ailleurs. Les déchets concernés par ce mode de traitement sont :

- les bouteilles en verre, qui sont utilisées dans les industries de conditionnement de vin;

- les chiffons qui sont utilisés pour l'essuyage dans les imprimeries ;
- les copeaux de bois qui sont réutilisés dans les élevages de volaille ;
- les papiers utilisés par les boulangeries et la fabrication des alvéoles ;
- les cartons et les caisses en bois réutilisés par les entreprises de déménagement ;
- les cadres de lunettes usés réutilisés par les établissements de vente de lunettes ;
- les téléviseurs et pièces autos, récupérés par les divers établissements de vente d'objets d'occasion ;
- les tourteaux d'arachide, de coton et de noix de palme utilisés par les entreprises de fabrication d'aliments pour bétail.

La plupart de ces déchets sont récupérés surtout par des privés qui les revendent aux entreprises citées. En dehors des bouteilles en verre, dont la quantité réutilisée est significative, les autres types de déchets sont utilisés en quantité marginale. Cette forme de recyclage est beaucoup plus développée dans la ville de Douala (capitale économique du Cameroun).

Production de déchets solides par des activités informelles

Yaoundé se caractérise par une extrême diversité des activités du secteur informel. Afin d'estimer les quantités produites, une enquête préliminaire portant sur la typologie et la localisation des activités de ce secteur a été conduite dans toute la ville. Cette enquête a permis de recenser 9 647 unités de production réparties sur l'ensemble des bassins versants de la ville (tableau n° 30).

Tableau 30 : Répartition des unités de production informelle des déchets par type d'activités

Activité	Nombre total	Nombre enquêté	Pourcentage
Réparation de roues et charge batteries	840	8	8,7 %
Ateliers de froid et climatisation	291	3	3,0 %
Atelier de réparation de radios et télévisions	295	3	3,1 %
Menuiserie métallique	495	5	5,1 %
Garage	794	8	8,2 %
Tôlerie auto	96	1	1,0 %

.../...

Activité	Nombre total	Nombre enquêté	Pourcentage
Menuiserie	938	9	9,7 %
Salon de coiffure homme	1 098	11	11,4 %
Salon de coiffure dame	1 614	16	16,7 %
Atelier de couture	1 055	11	10,9 %
Laverie autos	223	2	2,3 %
Maroquinerie	441	4	4,6 %
Mini-imprimerie	194	2	2,0 %
Studio photo	209	2	2,2 %
Sérigraphie	159	2	1,6 %
Vitrierie	141	1	1,5 %
Casse autos	246	2	2,6 %
Carcasses et divers	122	0	1,3 %
Dépôt de bois	185	2	1,9 %
Diverses activités	211	11	2,2 %
Total	9 647	103	100,0 %

Ce tableau montre que les activités de salon de coiffure sont prédominantes avec 16,7 % pour les salons de coiffure dames et 11,4 % pour les salons de coiffure hommes. Les deux totalisent environ 28 % de l'effectif recensé. Ces activités sont talonnées de près par les ateliers de couture qui représentent 11 % de l'effectif des activités. Parmi les activités moyennement représentées, on peut citer : les ateliers de réparation de roues et de recharge de batteries (8,7 % de l'effectif), les menuiseries bois (9,7 % de l'effectif), les garages (8,2 % de l'effectif). Dans une moindre mesure, on peut citer les activités de menuiserie métallique et de maroquinerie.

Dans l'ensemble de la ville, on a également recensé environ 122 tas de carcasses de voitures ou d'engins lourds.

Une des caractéristiques des unités informelles réside dans leur caractère diffus dans l'ensemble des tissus urbains.

Certaines de ces unités sont réduites au seul propriétaire comme c'est le cas dans la plupart des salons de coiffure hommes et elles peuvent parfois employer jusqu'à 15 personnes (notamment dans les garages).

Sur l'ensemble des fiches remises, 93 questionnaires bien remplis ont été collectés pour l'ensemble des unités réparties dans toute la ville. La démarche de validation des fiches est la même que celle retenue pour l'étu-

de des entreprises du secteur formel. Il en est de même de la procédure d'analyse et de quantification des déchets.

Pour l'extrapolation des résultats quantitatifs à l'ensemble de la ville, les quantités moyennes unitaires de déchets produits ont été multipliées par le nombre d'unités exerçant le même type d'activité.

L'estimation des quantités de déchets produits par le secteur informel est apparue comme un exercice relativement plus difficile que dans le secteur formel à cause des faibles quantités produites par chaque unité et du peu d'importance qui est généralement accordée dans ce secteur à la protection de l'environnement. Le tableau n° 31 récapitule les quantités produites mensuellement par type de déchets.

Tableau 31 : Production mensuelle des déchets solides des activités informelles

Désignation	Quantité (tonnes)	Pourcentage
Vieille batterie	20,9	0,7 %
Emballage souillé	15,4	0,5 %
Papier et carton	39,3	1,3 %
Métaux ferreux	198,7	6,5 %
Pneumatiques	325,5	10,7 %
Sciures et copeaux de bois	2 263,6	74,5 %
Chutes de bois	68,0	2,2 %
Appareils hors d'usage	31,0	1,0 %
Autres	77,0	2,5 %
Total	3 039,4	100,0 %

Les sciures et copeaux de bois représentent 74,5 % des déchets produits par les activités informelles. Ces déchets sont produits par les menuiseries. Ils sont entièrement récupérés par les ménages pour les besoins de cuisson des repas. Les pneus usés produits par les ateliers de réparation de pneus et de charge de batteries représentent 10,7 % de la production des déchets.

La majeure partie des déchets de ce secteur est constituée de déchets qui sont généralement rejetés sans aucun traitement dans la nature sauf les sciures, copeaux et chutes de bois issus des menuiseries.

Ces déchets se composent aussi bien des déchets banals (papiers, cartons,...) que des déchets industriels spéciaux (batteries, flacons de produits souillés...).

Les DIB en mélange (tissus non infectieux, textiles, caoutchouc, plastiques divers, pneumatiques) représentent près de 20 % du gisement. Les déchets industriels spéciaux en mélange (boues, vieilles batteries, flacons de produits, tubes cathodiques) occupent près de 2,75 %.

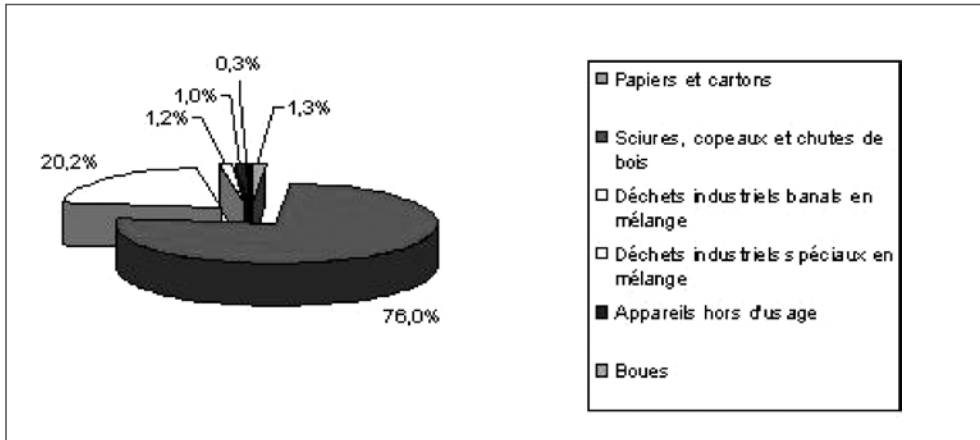


Figure 16 : Composition des déchets solides produits par les activités informelles

Divers types de déchets sont produits par le secteur informel. Ces déchets se composent des déchets industriels banals (papiers, cartons, etc.), des déchets industriels spéciaux (batteries, flacons de produits souillés...) et des déchets liquides.

La connaissance de la nature des déchets est indispensable pour l'orientation vers une filière de traitement. Parmi les paramètres fondamentaux on peut citer :

- les paramètres physiques (densité, consistance, taux d'humidité, pouvoir calorifique);
- les paramètres chimiques (carbone organique, azote, métaux lourds, chlore, fluor, etc.

Le problème fondamental à résoudre pour faire des analyses nécessaires à la connaissance de la nature des déchets produits est celui de la représentativité de l'échantillon. Comme on peut constater à travers les exemples et les modèles développés dans ce chapitre, la recherche des données nécessaires pour le calcul de la taille de cet échantillon nécessite le recours à des statistiques anciennes qui font souvent défaut dans le contexte des pays en développement. C'est pour cela que des études tests sont souvent nécessaires. Dans la plupart des villes, des études ayant conduit

à la caractérisation des déchets solides ménagers sont rares, ce qui donne peu de visibilité aux élus pour définir un plan de gestion des déchets efficaces. D'où les disparités observées dans les prix de gestion des déchets dans les différentes villes africaines.

Chapitre 4

CADRE INSTITUTIONNEL ET RÉGLEMENTAIRE DE LA GESTION DES DÉCHETS DANS QUELQUES PAYS D'AFRIQUE DE L'OUEST ET DU CENTRE

DANS LES VILLES AFRICAINES, on peut distinguer les acteurs institutionnels, les acteurs non gouvernementaux, les usagers, les sociétés privées et les partenaires techniques et financiers bilatéraux et multilatéraux. Les bailleurs, notamment la Banque mondiale et le Fond Monétaire International (FMI) insistent auprès des gouvernements africains pour qu'ils accélèrent la privatisation et la décentralisation. Bien que la privatisation concerne moins le service de gestion des déchets que celui de l'approvisionnement en eau potable par exemple, les services publics de proximité devraient subir des mutations profondes dans les années futures. Dans toutes les villes, la commune occupe un rôle central en matière de gestion des déchets. Toutes les institutions de l'État interviennent à des degrés divers dans le domaine de la gestion des déchets. Les rôles sont évidemment différents et l'on peut distinguer les institutions de planification, de normalisation et d'exécution.

Dans le contexte du Cameroun, la loi n° 74/23 du 5 décembre 1974 portant organisation communale, en son article 93, donne le droit aux communes de percevoir le produit de l'impôt forfaitaire, des contributions des patentes et licences et de la taxe sur le bétail. L'article 95 permet au conseil municipal d'instituer des taxes dites « taxes communales directes », dont le produit est recouvré en même temps que les impôts perçus. Ces taxes se présentent sous forme de redevances forfaitaires annuelles exigibles auprès des habitants d'une agglomération et comprennent les taxes d'eau, d'électrification, d'éclairage et d'enlèvement des ordures ménagères, ainsi que les taxes de fonctionnement des ambulances municipales. Dans les communautés urbaines, la loi confie d'une part la gestion des déchets solides aux communes urbaines d'arrondissement et d'autre part l'hygiène et

la salubrité publique à la communauté urbaine (loi n° 87/15 du 15 juillet 1987 portant réorganisation communale).

LES ACTEURS INSTITUTIONNELS

On distinguera les institutions de planification, d'exécution et de normalisation.

Les institutions chargées de la planification et de la gestion des interfaces

Dans tous les pays d'Afrique de l'Ouest et du Centre, plusieurs ministères interviennent à des degrés divers dans la gestion des déchets. Mais leur intervention n'est généralement pas coordonnée à cause de l'absence d'une stratégie nationale en la matière. Dans les douze pays¹⁹ où l'on a eu des informations sur les acteurs de la gestion des déchets, les ministères qui interviennent dans la gestion des déchets sont les suivants [PDM, 2003] :

- ministère en charge de l'environnement et de l'eau ;
- ministère en charge de l'habitat et de l'urbanisme ;
- ministère en charge de l'intérieur et de la décentralisation qui assure la tutelle des communes ;
- ministère en charge de la santé ;
- ministère des finances, dans les pays où l'État subventionne partiellement ou totalement la gestion des déchets.
- le ministère en charge du développement urbain.

Le fonctionnement de ces institutions, ainsi que leur responsabilité en matière de gestion des déchets sont fixés par décrets qui évoluent dans le temps.

Les institutions décentralisées chargées de la mise en œuvre des politiques : les collectivités décentralisées

« La commune est une collectivité publique décentralisée et une personne morale de droit public. Elle gère les affaires locales sous la tutelle de l'État en vue du développement économique social et culturel de ses populations ».

Dans le contexte de décentralisation, on observe un transfert des responsabilités en matière d'exploitation et de gestion des équipements de proximité au « profit » des communes. Trois grands groupes de communes

¹⁹ Bénin, Burkina Faso, Cameroun, Côte d'Ivoire, Gabon, Ghana, Guinée Conakry, Mali, Mauritanie, Sénégal, Tchad, Togo.

existent au Cameroun : les communautés urbaines, les communes urbaines et les communes rurales. Il existe deux communautés urbaines, celle de Douala et celle de Yaoundé. Elles sont divisées en communes urbaines d'arrondissement dont six pour Yaoundé et cinq pour Douala.

Dans le contexte du Cameroun, la loi n° 74/23 du 5 décembre 1974, portant organisation communale en son article 93, donne le droit aux communes de percevoir le produit de l'impôt forfaitaire, des contributions des patentes et licences et de la taxe sur le bétail. L'article 95 permet au conseil municipal d'instituer des taxes dites « taxes communales directes », dont le produit est recouvré en même temps que les impôts perçus. Ces taxes se présentent sous forme de redevances forfaitaires annuelles exigibles auprès des habitants d'une agglomération et comprennent les taxes d'eau, d'électrification, d'éclairage et d'enlèvement des ordures ménagères, ainsi que les taxes de fonctionnement des ambulances municipales.

Les acteurs non gouvernementaux (ANG)

Ce sont des personnes physiques ou morales qui, conformément aux lois et règlements en vigueur, participent à l'exécution des missions d'intérêt général.

Cette catégorie d'acteurs de développement social, économique et culturel apparaît au Cameroun à partir de 1990 grâce au vent de démocratie qui, à cette époque, a soufflé sur l'ensemble des pays du tiers monde et, d'autre part, à la crise économique qui depuis 1985 avait paralysé l'état et les collectivités locales décentralisées et leur capacité à satisfaire les besoins fondamentaux de la population.

En milieu urbain, les activités des acteurs non gouvernementaux sont centrées sur l'assainissement des quartiers, l'enlèvement des ordures, l'aménagement des voies de desserte.

Les organisations constituées se réfèrent à l'une ou l'autre loi en vigueur dans les différents pays et prennent des dénominations variées.

En général, les organisations prennent les formes suivantes :

- Associations reconnues ;
- Groupes d'Initiatives Communes (GIC) ;
- Organisations Non Gouvernementales (ONG) ;
- Les petites et moyennes entreprises (PME).

Les associations

La liberté d'association est reconnue à toute personne physique ou morale sur l'ensemble du territoire national. Au Cameroun par exemple, comme dans la plupart des pays de la sous-région, les associations obéissent à deux régimes :

- le régime de déclaration ;
- le régime d'autorisation.

Les associations étrangères et les associations religieuses relèvent du régime d'autorisation. Toutes les autres formes d'associations sont soumises au régime de déclaration.

Les associations définissent librement leur champ d'intervention. Toutefois, les membres fondateurs sont tenus de communiquer à la préfecture de leur siège le titre, l'objet, le siège ainsi que les noms, professions et domiciles de ceux qui, à un titre quelconque, sont chargés de son administration ou de sa direction.

Les ressources des associations sont constituées des cotisations des membres.

Toutefois, les associations reconnues d'utilité publique peuvent recevoir des subventions des personnes publiques, des dons et legs des personnes privées.

Les sociétés coopératives et les groupes d'initiatives communes

Une société coopérative est un « groupe de personnes physiques et/ou morales qui s'associent librement pour atteindre des buts communs par la constitution d'une entreprise dirigée de manière démocratique et à laquelle elles sont liées par un contrat qui fixe notamment les règles » :

- de leur activité avec cette organisation ;
- de répartition équitable de son capital ;
- de participation aux fruits et aux risques liés à ladite activité.

Un Groupe d'Initiative Commune (GIC) est une organisation à caractère économique et social de personnes physiques volontaires ayant des intérêts communs et réalisant à travers le groupe des activités communes.

Les groupes d'initiatives communes interviennent surtout au niveau de la précollecte et de la transformation des déchets. En effet, dans la plupart de cas, les GIC interviennent pour transformer les déchets solides en compost qu'ils revendent aux agriculteurs. Ils peuvent aussi faire de la précollecte en négociant avec les ménages qui le désirent un contrat de précollecte des déchets jusqu'au point de ramassage agréé. L'expérience de précollecte par les GIC ou les GIE est très développée actuellement dans les villes d'Afrique. Leur activité se situe généralement à l'amont des actions des entreprises privées qui assurent la collecte, le transport et la mise en décharge.

Les organisations non gouvernementales locales

« Une ONG est une association *déclarée* ou une association étrangère autorisée conformément à la législation en vigueur, et agréée par l'administration en vue de participer à l'exécution des missions d'intérêt général ». L'adoption d'un texte spécifique sur les ONG à côté d'une loi sur la liberté d'association est une originalité camerounaise, car dans la quasi-totalité des autres États de la sous-région, le législateur ne fait pas de distinction particulière entre ONG et association. À la lecture du texte camerounais, on se rend compte que le législateur a voulu faire une distinction entre les petites associations (zone d'intervention, qualité des membres et moyens d'action très limités) et les grandes associations.

Les ONG interviennent limitativement en fonction des priorités des pouvoirs publics dans le domaine : juridique, économique, social, culturel, sanitaire, sportif, éducatif, humanitaire, en matière de protection de l'environnement ou de promotion des droits de l'homme.

Chaque organisation définit librement son domaine d'activité, l'organisation à mettre en place et les *moyens* indispensables pour la réalisation. Il leur est seulement recommandé de respecter la réglementation en vigueur.

Les petites et moyennes entreprises

Il s'agit des entreprises individuelles ou des groupes de personnes qui interviennent dans le domaine des déchets pour faire du bénéfice. Ils offrent leurs services à des administrations pour enlever régulièrement les déchets qu'ils transportent par voiture privée jusqu'à la décharge agréée.

Les bailleurs de fonds extérieurs

Les principaux appuis extérieurs à la gestion des déchets solides dans les villes du tiers monde en général et d'Afrique en particulier concernent notamment :

- L'étude et la réalisation des infrastructures, notamment les unités de traitement (usine de compostage), l'aménagement des décharges ;
- La fourniture de véhicule de collecte ;
- Le fonctionnement : la rémunération de personnel dans le cadre des opérations à haute intensité de main-d'œuvre au Cameroun et au Sénégal ;
- Les études de faisabilité des filières de traitement et la réalisation des schémas directeurs ;
- L'assistance technique à la maîtrise d'œuvre et l'élaboration des réglementations locales.

Les bailleurs de fonds qui interviennent dans le financement de la gestion des déchets dans les villes d'Afrique sont bilatéraux (Agence française

de développement, coopération japonaise (JICA), coopération britannique (DFID), coopération allemande (GTZ), canadienne (ACDI) ou américaine (USAID)) ou multilatéraux (Banque mondiale, PNUD, PAM).

Les logiques et les contenus des interventions des bailleurs de fonds extérieurs diffèrent et évoluent avec le temps. L'intervention des bailleurs de fonds extérieurs se fait souvent sans aucune coordination, ce qui entraîne fréquemment des antagonismes sur le terrain et l'inefficacité des certaines actions.

La coopération décentralisée intervient aussi à travers les ONG internationales, mais ces opérations ont très souvent un caractère pilote et drainent une fraction négligeable des déchets produits. L'une des opérations d'envergure dans la région de coopération décentralisée en matière de gestion des déchets solides est rencontrée dans la ville de Ouagadougou au Burkina Faso, où la ville de Lyon a fait don de quelques bennes tasseuses à la ville : elle assiste le service technique à leur meilleure utilisation.

ANALYSE DES RÔLES DE CES ACTEURS

Le jeu des acteurs est analysé à travers les trois groupes d'opérateurs : acteurs institutionnels, les acteurs non gouvernementaux à but non lucratif, les sociétés privées à but lucratif.

Les acteurs institutionnels

Comme on vient de le voir, les ministères techniques tels que ceux en charge des Mines, de l'Eau et de l'Énergie, en charge de la Santé publique, de l'Urbanisme et de l'Habitat, de l'Administration territoriale et de la décentralisation et des Finances et du Budget ont pour rôle d'élaborer les stratégies globales à l'échelle du pays, de fixer les normes et la réglementation en matière de propreté. À travers leurs services déconcentrés, ils interviennent en ordre dispersé sur le terrain lorsqu'ils sont sollicités par les municipalités. D'une manière générale, l'action des services déconcentrés de l'État est peu lisible au niveau local, surtout dans les villes moyennes et les petits centres où ils sont peu présents. Cependant, l'approche technocratique qui avait longtemps régi le service de la propreté urbaine au Cameroun tend à disparaître dans ces ministères. Plusieurs études et commissions techniques ministérielles associent les autres acteurs. L'absence de données fiables sur la production des déchets dans la plupart des villes de la région constitue encore l'un des blocages majeurs pour les ministères techniques.

Aux collectivités publiques locales incombe le service de collecte des ordures dans les agglomérations camerounaises. Le chevauchement des compétences de la communauté urbaine de Yaoundé et des communes

urbaines d'arrondissement donne lieu à des conflits entre le délégué du gouvernement nommé et les maires des communes urbaines d'arrondissement qui sont élus. Les intérêts sociaux divergents et la baisse des ressources financières contribuent à augmenter les rivalités entre les acteurs institutionnels. En outre, les communes urbaines d'arrondissement de Yaoundé à faible potentiel financier, matériel et humain n'entretiennent pas entre elles des rapports pouvant faciliter la mobilisation de tous les acteurs non gouvernementaux.

Les institutions de recherche jouent un rôle important dans la gestion des déchets solides urbains au Cameroun. Une banque de données a été constituée pour la ville de Yaoundé entre autres. Des données de base portant notamment sur la production des déchets et leurs caractéristiques ont été fournies aux municipalités.

Les acteurs non gouvernementaux (ANG)

Les organisations non gouvernementales et les associations de quartiers constituent les ANG. L'émergence de ce groupe d'acteurs au Cameroun a été favorisée en 1990 par la loi sur les associations (n° 90/053 du 19/12/90). Mais elles doivent leur essor dans les pays en développement aux défaillances de l'État et des municipalités dans l'offre des services urbains de proximité tels que l'eau, l'éclairage public et l'enlèvement des ordures ménagères. Ces ANG sont constituées de petits groupes ayant un effectif moyen entre 5 et 50 membres dont le niveau scolaire ne dépasse guère celui de l'enseignement secondaire. Ils fondent leurs actions sur les liens sociaux qui existent entre les populations, ce qui renforce leurs capacités à les mobiliser et à les sensibiliser. Bien que dotés de structures organisationnelles précaires, ils offrent un niveau de service appréciable à l'échelle de quartier. Ils mobilisent la participation des populations tout en leur permettant de participer directement aux décisions concernant les projets locaux comme la précollecte et le traitement décentralisé des déchets. La précollecte est l'une des étapes où on a recensé une grande participation des ANG (cf. chapitre 2).

Mais en dépit de tout cela, leurs actions restent de faible portée dans la mesure où les groupes sont très peu nombreux et où les moyens techniques financiers dont ils disposent sont très faibles. Il est clair qu'à eux seuls les ANG ne peuvent pas résoudre les problèmes liés à la propreté urbaine à l'échelle d'une ville. D'où la nécessité de renforcer la capacité de gestion des municipalités qui travaillent à cette échelle.

Les usagers

Les usagers, premiers bénéficiaires du service de la propreté urbaine, ne sont pas associés au processus de décision sur la gestion des déchets. Les options prises par certaines villes comme Ouagadougou, Cotonou, Bamako et Conakry pour développer la filière amont de collecte des déchets urbains renforcent la participation des usagers dans la définition des politiques de la propreté urbaine. En effet, l'utilisateur est sollicité à travers la contribution directe au financement de la précollecte des déchets. Ils peuvent aussi être mobilisés par différentes actions de sensibilisation à la propreté urbaine. À titre d'exemple, un programme de sensibilisation est intégré dans le contrat de la Hysacam (en charge de la propreté de la ville de Yaoundé) uniquement pour faire changer le comportement de l'utilisateur. Les spots publicitaires tels que « jetez vos ordures dans les bacs », « ne mettez pas le feu dans les bacs », sont largement diffusés à travers les banderoles, les tracts et la télévision. L'utilisateur n'est généralement pas consulté pour la définition des itinéraires de collecte, des horaires, de l'emplacement des bacs, encore moins sur les types de bacs à disposer dans les quartiers.

Les sociétés privées à but lucratif

Dans les villes africaines, il existe un marché potentiel pour le service des ordures ménagères. Mais la durabilité de ce marché dépend du mode de financement mis en place pour la couverture des frais de service. La dépense publique et privée déjà importante pour la collecte des ordures ménagères est en augmentation dans toutes les villes du fait de la croissance démographique. En face de cette demande, on trouve dans toutes les villes des opérateurs privés formels ou informels qui interviennent ou pourraient intervenir à toutes les étapes du service de ramassage des ordures ménagères. Dans certaines villes, les entrepreneurs privés sont des opérateurs exclusifs de l'enlèvement, du nettoyage et de la gestion de décharge. C'est par exemple le cas à Douala et Yaoundé au Cameroun, à Dakar au Sénégal, à Accra au Ghana. Dans la plupart des villes, la durabilité du service de ces entreprises tient à la participation de l'État dans le paiement de service sur la base des quantités enlevées qui, à la différence du forfait, lie directement leur profit à la quantité des déchets enlevés. Mais ce mode de facturation ne permet pas toujours d'améliorer la qualité de service rendu, dans la mesure où le prestataire concentrera ses efforts dans la zone où les déchets peuvent être enlevés avec le minimum d'investissement. Le service est alors concentré dans les zones accessibles au détriment des quartiers pauvres à habitat spontané.

Dans les villes moyennes et les petites villes en générale, les facteurs qui limitent l'intervention du secteur privé dans le service des ordures ménagères sont :

- La réticence des services techniques municipaux qui répugnent généralement à abandonner leur activité en régie ;
- La réticence des élus locaux dont beaucoup considèrent la privatisation des services d'enlèvement des ordures ménagères comme hors de portée de leur budget et souhaitent conserver à la fois la maîtrise des interventions sur la commune et la maîtrise du nombreux personnel employé à la collecte et au nettoyage.

Les acteurs privés ont un contrat de marché public pour assurer le nettoyage de tout ou partie de la ville. Ce contrat peut les lier à l'État seul ou à la municipalité associée à l'État. Dans la plupart des villes d'Afrique subsaharienne, le marché d'enlèvement des déchets ne couvre pas la totalité de la ville. Cette disposition n'est formalisée dans aucun document officiel mais elle est une réalité dans la mesure où la société est payée par tonne d'ordures collectées, et d'autre part les provisions financières destinées à ce service sont souvent insuffisantes. Dans ces conditions, l'entreprise privée enlève prioritairement la tonne d'ordures la moins chère qui se trouve dans les zones administratives, les quartiers de haut standing, les marchés et le long des voies goudronnées. Négligeant de ce fait les quartiers à habitat spontané où l'accès par les camions de collecte est plus difficile.

À côté des services des opérateurs privés, on a aussi ceux des Groupes d'Initiative Commune (GIC), des associations et des PME qui sont constitués pour apporter un service moyennant rémunération. Dans les villes d'Afrique au sud du Sahara, on compte en moyenne 20 à 30 petits opérateurs par ville de plus de 500 000 habitants. Mais la quantité de déchets qu'ils drainent est faible et le plus souvent ces déchets sont déversés dans les bacs afin d'être acheminés en décharge par les entreprises privées. Bien que ce système soit toléré, aucune coordination n'apparaît entre l'entreprise et le petit prestataire qui fait le travail en amont. Même dans les villes où il existe des structures de coordination de l'intervention des différents acteurs, comme par exemple le cas de COGEDA (Coordination des Structures de Gestion des Déchets et de l'Assainissement) au Bénin, le fonctionnement n'est pas toujours bien assuré et chaque structure travaille assez souvent de façon isolée.

Suivant la synthèse des pesées effectuées en décharge²⁰ de Yaoundé entre août et novembre 2001, la quantité de déchets transportés en décharge de Nkolfofoulou par les acteurs non gouvernementaux (associations et

²⁰ Synthèse statistique fournie par HYSACAM.

PME) est évaluée à 114,5 tonnes par mois, soit une moyenne de 4,6 tonnes par jour, ce qui montre que la plupart des petits opérateurs ne transportent pas leurs déchets jusqu'à la décharge.

JEU DES ACTEURS DANS LA GESTION DES DÉCHETS

Le tableau n° 32 récapitule le jeu des différents acteurs de la gestion des déchets à Yaoundé.

Tableau 32 : Récapitulatif de la distribution des rôles entre acteurs en présence

[Tanawa et al., 2002]

Acteurs Activités	Acteurs institutionnels			ANG		Sociétés privées et GIC	Bailleurs de fonds
	Ministères techniques	Municipalités	Institutions de recherche	ANG à but non lucratif	Usagers		
Définition du contenu du concept de propreté urbaine	X	X	X				
Définition des normes de salubrité	X		X				
Contrôle du respect des normes au niveau local	X	X					
Collecte des impôts pour la propreté urbaine	X	X					
Gestion des crédits de la propreté urbaine	X	X				●	
Identification des priorités locales	●	X		X	X		
Financement des actions locales	X	X			X	X	X
Gestion du service de la propreté urbaine		X		X		X	

.../...

Acteurs Activités	Acteurs institutionnels			ANG		Sociétés privées et GIC	Bailleurs de fonds
	Ministères techniques	Municipalités	Institutions de recherche	ANG à but non lucratif	Usagers		
Collecte, transport et mise en décharge des déchets urbains				X		X	
Valorisation des déchets			X	X	X		X
Évaluation des quantités de déchets produits	X		X		X		X
Établissement des politiques locales en matière de propreté urbaine		X		X			X
Collecte des données pertinentes et études spécifiques de la planification de la propreté urbaine	X	X	X	X	X	X	X
Suivi des indicateurs de la propreté urbaine			X	X			X
Fixation des taux de la taxe d'enlèvement des ordures ménagères	X	X					

Légende : • Pratique actuelle - X Cas de figure ayant existé dans le passé et qui n'a plus cours aujourd'hui

Ce tableau montre que la collecte des déchets concerne plusieurs acteurs dont le chevauchement des compétences représente une source de conflits. De plus, le poids de la tutelle administrative, financière et technique de l'État sur les autres acteurs de ce secteur, et plus particulièrement sur les communes, ne permet pas d'exploiter toutes les potentialités disponibles dans le secteur.

Les analyses développées ci-dessus permettent de classer les acteurs intervenant dans la gestion des déchets en trois groupes suivant leur niveau de responsabilité dans la prise de décision :

Le premier groupe est constitué par les acteurs décisionnels de premier ordre : dans ce groupe, on range l'État représenté par l'ensemble des

ministères qui travaillent autour de ce sujet. Ce sont ces acteurs qui interviennent dans la définition des stratégies nationales, au niveau réglementaire et normatif. C'est aussi à ce niveau que les stratégies de financement de la gestion des déchets peuvent être élaborées. Dans le contexte du Cameroun, ces acteurs manquent souvent de données quantitatives fiables pour une meilleure planification du service à l'échelle des grandes villes ou de l'ensemble du pays.

La seconde catégorie est celle des acteurs décisionnels de deuxième ordre : ce sont les communes urbaines d'arrondissement qui sont chargées, chacune dans son territoire de compétence, d'appliquer les instructions gouvernementales. En plus, elles interviennent dans la définition des normes locales, le suivi de la gestion et le financement de l'opération.

Le troisième groupe est celui des acteurs transversaux : leurs interventions, bien que tolérées, ne sont pas officiellement reconnues ; mais par leurs actions de proximité, ils peuvent soit inspirer les décisions, soit faire pression sur les communes pour une prise de décision en matière de gestion des déchets. Les ONG qui opèrent dans le secteur travaillent de façon isolée, leurs relations avec les communes se limitant généralement à des correspondances d'information adressées au maire. Mais leurs actions sur le terrain sont tolérées à partir du moment où elles s'investissent plus dans les zones non accessibles aux camions de collecte.

L'analyse du jeu des acteurs permet de situer ce projet de précollecte par rapport au schéma global de gestion des déchets et de mesurer les difficultés ou les atouts que l'on devra exploiter pour augmenter les chances de pérennisation de ce projet et son extension dans les quartiers de Yaoundé ou dans les autres villes du Cameroun. Pour pouvoir le faire, le problème du financement reste au centre des préoccupations.

CADRE RÉGLEMENTAIRE

On distinguera ici les textes spécifiques fixant les cadres de gestion des déchets, les textes fixant les modalités de financement et les textes liés à l'hygiène et la salubrité publique. D'entrée de jeu, on peut affirmer que les activités de gestion et d'élimination des déchets ne sont pas assez encadrées malgré leur importance pour l'hygiène et la santé publique.

Les textes fixant le cadre de gestion des ordures ménagères

Dans la plupart des pays de la région d'Afrique de l'Ouest et du Centre, il n'existe pas de textes spécifiques qui fixent le cadre de gestion des ordures ménagères sauf au Bénin où deux décrets, l'un sur la gestion des déchets et l'autre sur les huiles usagées viennent d'être adoptés. Par contre, il

existe des textes tels que le code d'hygiène ou le code d'environnement qui donnent, entre autres, des cadres de gestion des déchets solides. Ces textes sont généralement des lois qui ont été votées récemment suite au Sommet de la terre à Rio de Janeiro au Brésil et manquent de décrets d'application, ce qui limite considérablement leur portée. Pour douze pays d'Afrique de l'Ouest et du Centre sur lesquels on a des données sur la réglementation en la matière [PDM, 2003], on a noté uniquement trois pays (Bénin, Burkina Faso et Tchad) où il existe des arrêtés ministériels ou interministériels réglementant les activités de collecte, d'évacuation, de traitement et d'élimination des déchets solides sur le territoire national. Ces textes sont le plus souvent récents : 1995 pour le Bénin et 1998 pour le Burkina Faso et le Tchad. Au Cameroun, seule la note circulaire du ministre de la Santé publique n° 069/NC/MSP/DMPHP/SHPA du 20 août 1980 relative à la collecte, au transport et au traitement des déchets industriels, ordures ménagères et vidange sanitaire précise les conditions techniques de collecte, de transport et de traitement des déchets. Cette circulaire donne en effet des prescriptions techniques claires aux sociétés d'enlèvement et de traitement des ordures ménagères et assimilés pour faire leur travail dans des conditions sanitaires et environnementales acceptables. Ces sociétés doivent alors remplir des cahiers des charges approuvés par le ministre de la Santé publique.

En dehors de ces textes spécifiques à la gestion des déchets dans tous les pays de la région, un certain nombre de textes spécialisés réglementent les différentes activités dans le domaine de l'hygiène et de la salubrité à l'échelle nationale. Ces textes sont liés à :

- L'organisation des communes ;
- Le code d'hygiène et de l'eau ;
- Le code de l'environnement ;
- Les conditions d'ouverture et de fonctionnement des établissements dangereux, insalubres et incommodes.

À la suite de la Conférence mondiale sur l'environnement de 1992, la plupart des pays se sont dotés d'un plan national pour l'environnement. À la suite de ces plans, des lois-cadres relatives à l'environnement ont été adoptées. Ces lois traitent à des degrés divers les problèmes de gestion des ordures.

Au Cameroun par exemple, la loi cadre relative à l'environnement a été promulguée le 5 août 1996. Elle porte sur les différents volets de l'environnement : protection des milieux récepteurs (de l'atmosphère, des eaux continentales et plaines d'inondation, du littoral et des eaux maritimes, des sols et des sous-sols, des établissements humains), installations classées

(dont celles traitant les déchets), gestion des ressources naturelles et conservation de la diversité biologique, risques et catastrophes naturelles.

Elle insiste fortement sur la sensibilisation, l'information, l'éducation, la participation, la formation, la recherche. Elle introduit de nombreux principes : principe de précaution, d'action préventive, de correction des atteintes, principe pollueur-payeur, de responsabilité, de participation, de subsidiarité. Elle définit le rôle du gouvernement, l'organisation et les obligations en terme de suivi de la qualité de l'environnement (bases de données, inventaires, rapport national biannuel et plan national tous les 5 ans,...).

En ce qui concerne les déchets solides des ménages, l'article 46 stipule que les collectivités territoriales décentralisées assurent l'élimination des déchets produits par les ménages. Elles veillent à ce que tous les dépôts sauvages soient enrayés, assurent l'élimination des dépôts abandonnés. Les décharges sont soumises à autorisation et surveillance. Elles doivent faire l'objet de contrôles périodiques et respecter des normes techniques minimales d'aménagement.

Les textes fixant les modalités de financement de la collecte des déchets

Bien que la collecte des ordures ménagères soit financée par le budget public, rares sont les pays qui ont adopté un texte spécifique pour le financement de ce service. En effet, sur les douze pays étudiés en Afrique de l'Ouest et du Centre, seulement trois pays (Cameroun, Côte d'Ivoire et Sénégal) disposent d'un texte spécifique pour le financement de la gestion des déchets solides : c'est la taxe d'enlèvement des ordures ménagères (TEOM) [PDM, 2003]. À Abidjan en Côte d'Ivoire, cette taxe était indexée sur les factures d'électricité et a produit environ 5 milliards de francs CFA en 2000. Dans les autres pays où elle existe, cette taxe est indexée sur les salaires du personnel du public et du privé et sur les entreprises soumises au régime d'imposition réelle ou réelle simplifiée. Dans la ville de Nouakchott en Mauritanie, c'est le Conseil municipal qui fixe au début de chaque exercice budgétaire le montant de la taxe d'enlèvement des ordures ménagères.

Au Cameroun, la loi du 2 décembre 1974 portant organisation des communes prévoit que le conseil municipal peut voter des droits et taxes dont les taux maxima et les modalités de recouvrement sont fixés par décret. L'instauration de ces taxes est subordonnée à la réalisation du service attendu par les usagers. Il s'agit de la distribution de l'eau à travers les bornes fontaines publiques, de l'enlèvement des ordures ménagères, de l'éclairage public, du fonctionnement de l'ambulance.

Le décret n° 80/017 du 15 janvier 1980, fixe les taux minima des taxes à collecter par les municipalités qui assurent un service de collecte des or-

dures ménagères. Ayant constaté la vétusté et les limites de ces textes, les recommandations de la commission interministérielle de 1993, réitérées par la commission de 1995, proposent la création d'une nouvelle taxe dont l'assiette serait basée sur les consommations d'électricité pour le financement du service déchet [MINUH, 1995].

La taxe d'enlèvement des ordures ménagères est une redevance forfaitaire annuelle exigible des habitants d'une agglomération. Celle-ci incombe à la commune et elle est organisée, le cas échéant, par un règlement municipal. Cette taxe est proportionnelle au salaire. Elle est prélevée à la source, sur le salaire des employés et agents du secteur public ou privé. Elle s'échelonne entre 150 FCFA par an pour les salaires mensuels inférieurs à 15 000 FCFA et 10 000 FCFA au-delà de 500 000 FCFA (100 FCFA = 1 FF = 0,15 euro).

Les textes relatifs à la propreté, l'hygiène et la salubrité publique

Ce type de texte est de portée locale et confère par exemple la responsabilité de police sanitaire et environnementale. Dans certains pays, ce rôle est assuré par la commune, bien qu'ici et là le pouvoir central intervienne à partir des lettres circulaires.

Au Cameroun par exemple, une note circulaire du ministre de la Santé publique du 19 juin 1978 précise les fonctions techniques que doivent assurer les agents techniques du génie sanitaire mis à disposition dans les municipalités ou affectés dans les provinces. Concernant plus particulièrement les déchets solides, ils doivent surveiller l'élimination des ordures à l'échelle domestique, promouvoir, contrôler et participer au projet de la collecte et de l'élimination collective des déchets solides, vulgariser la méthode du compostage et celle de l'utilisation du compost, enseigner aux populations les moyens salubres d'évacuation de leurs ordures en tenant compte de leurs habitudes et de leur environnement.

Une autre note circulaire du ministre de la santé publique du 20 août 1980 précise que la collecte des déchets doit se faire dans des poubelles galvanisées ou en plastique avec couvercle, dans des bacs en fer ou en béton armé. Toutefois, chaque famille doit disposer obligatoirement d'une poubelle pour la collecte individuelle. Cette même note fixe des consignes techniques très sommaires en matière de traitement des déchets solides (décharge, compostage, incinération).

Une lettre circulaire du 4 avril 2000 du ministre de l'Administration territoriale adresse des remontrances à l'égard des autorités administratives, municipales et de la population quant à la dégradation de la physionomie générale des agglomérations urbaines et rurales. Un délai de 2 mois est donné pour le maintien et la pérennisation de la propreté.

L'arrêté conjoint du ministre de l'Administration territoriale et du ministre de la Santé du 24 mai 2000 précise les modalités d'application de certaines règles de salubrité et de sécurité publiques. Il donne obligation aux occupants de nettoyer les alentours et abords des immeubles, interdit de déposer des ordures sur la voie publique.

Au niveau local, on note ici et là dans les différentes villes des arrêtés préfectoraux ou municipaux instituant les journées de propreté. Ces textes viennent souvent pour répercuter au niveau local les circulaires ministérielles.

Par exemple dans la ville de Yaoundé, un arrêté municipal du 9 décembre 1977 institue une journée de propreté par semaine dans le périmètre urbain de Yaoundé. Le but est de sensibiliser les habitants au respect de la réglementation en matière d'hygiène et de salubrité publique; ainsi, le jeudi ils doivent obligatoirement effectuer des travaux d'embellissement, de propreté et d'assainissement. Les services de la voirie doivent apporter leur concours, notamment en matière de ramassage intensif des ordures ménagères.

Le 7 juillet 1997, alors que la collecte des déchets urbains n'est plus assurée de manière régulière depuis plusieurs années, un arrêté préfectoral institue un programme d'urgence de lutte contre l'insalubrité dans la ville de Yaoundé. Ce programme vise des objectifs sociaux et environnementaux. Parmi ceux-ci, l'enlèvement des ordures, le dégagement des trottoirs, la propreté sont des priorités. Différentes structures ont été créées pour atteindre ces objectifs : comité de suivi du programme d'urgence, comités de suivi d'arrondissements, brigades opérationnelles.

La commune urbaine d'arrondissement de Yaoundé VI, l'une des six communes urbaines d'arrondissement de la ville de Yaoundé, a pris le 24 juillet 1997 un arrêté municipal portant assainissement de son arrondissement, en application de l'arrêté préfectoral du 7 juillet 1997 (cf. ci-dessus). Cet arrêté précise : afin de rendre l'environnement « attrayant, sécurisant, agréable et où il fait bon vivre », la population est invitée au respect des mesures d'assainissement préconisées. Parmi celles-ci, il est demandé de « déposer les ordures exclusivement dans des endroits aménagés à cet effet, à des heures bien indiquées (entre 6 et 9 h), et non sur la chaussée. ».

Par ailleurs, deux décisions ont été prises le 24 avril 2000 à la suite de la lettre circulaire du ministre de l'Administration territoriale du 4 avril de la même année : l'une désigne les journées du jeudi (de 13 h à 15 h) et du samedi (de 6 h 30 à 9 h) pour l'hygiène et la salubrité publique; l'autre porte sur la création d'un comité d'arrondissement et de sous-comités d'hygiène et de salubrité publiques pour superviser les programmes de travaux d'assainissement et évaluer le travail accompli.

On peut noter que les textes relevant de la propreté, de l'hygiène et de la salubrité publique ne sont suivis que très partiellement et le plus souvent quelque mois seulement après leur publication.

La réglementation nationale fixe néanmoins relativement bien les responsabilités en matière de gestion des déchets : ministère de la Ville, brigade opérationnelle, agents techniques du génie sanitaire. À tous, il incombe un rôle important en matière d'organisation et de sensibilisation de la population, et notamment en matière de précollecte. Aucune allusion n'est faite à une éventuelle exclusion de quartiers défavorisés du système de collecte. On constate aussi que les textes consultés ne prévoient pas les moyens qui seront mis en place pour assumer les différentes fonctions indiquées.

Par ailleurs, on peut aussi affirmer que la réglementation est très peu précise en ce qui concerne le mode d'exploitation et de contrôle des installations de traitement des déchets, en particulier des décharges. Le sentiment qui s'en dégage est qu'il n'y a pas encore une réelle volonté de remettre en cause cette filière, sans doute par manque de volonté politique et de moyens affectés. Il n'est peut-être pas possible, pour des raisons essentiellement économiques, mais pas nécessairement en fonction du contexte local et de la nature des déchets, de calquer les réglementations de type européen en la matière. Néanmoins, un minimum de prescriptions techniques semble tout de même indispensable.

L'institution de journées de propreté dans les villes confirme la démission de l'État, comptant sur les habitants pour organiser eux-mêmes une partie du service normalement dévolu au service public.

Chapitre 5

QUELLES FILIÈRES DE TRAITEMENT DES DÉCHETS POUR LES PAYS EN DÉVELOPPEMENT ?

AU VU DES CARACTÉRISTIQUES DES ORDURES MÉNAGÈRES PRODUITES dans les villes des zones tropicales humides d'Afrique et des pays en voie de développement en général (forte présence de matière organique biodégradable et un taux d'humidité élevé) et des contraintes socio-économiques de ces régions, on peut dire que l'incinération des déchets telle que pratiquée dans la plupart des villes des pays tempérés pour la production d'électricité ou de chaleur ne peut être appliquée avec efficacité dans les cas étudiés dans cet ouvrage, et ceci pour les deux raisons suivantes :

- les conditions climatiques de la zone équatoriale humide n'imposent aucun recours au chauffage des maisons, principal secteur d'utilisation de l'énergie produite par les usines d'incinération des villes tempérées;
- les débouchés potentiels de cette énergie sont également limités dans les industries.

Les filières de traitement biologique et les différentes filières de récupération matière restent alors les seules alternatives à étudier. Compte tenu de la forte présence de matière organique biodégradable dans ces déchets, les filières biologiques sont celles qui permettent de réduire la plus grande quantité de déchets à mettre en décharge (80 à 90 % du poids brut). Mais en zone sahélienne, la matière organique biodégradable représente moins de 40 % des déchets ménagers. Lorsqu'on exclut le sable, cette fraction reste encore prépondérante.

Le compostage permet de produire de l'amendement organique à partir des déchets : il peut être utilisé pour les besoins de fertilisation et il permettrait ainsi la réduction de la pression de l'homme sur les terres non encore défrichées. La méthanisation en réacteur permet d'obtenir du méthane qui peut être utilisé en remplacement du combustible fossile;

de plus, cette technique produit un « digestat » qu'on peut aisément stabiliser en compost pour l'agriculture. Ces filières paraissent en première analyse les mieux adaptées au contexte considéré dans cet ouvrage.

L'objectif poursuivi dans ce chapitre est d'arriver à aider au choix de filières de traitements les plus adaptées, avec prise en compte des critères environnementaux et économiques et dans le respect des contraintes environnementales et financières.

L'Analyse de Cycle de Vie (ACV) est un outil qui intègre la dimension holistique (car elle permet de faire une comptabilité analytique de tous les flux matières et énergies qui interviennent dans le cycle du process); il permet aussi de faire porter les efforts sur les points clés d'une filière (répartition justifiée des responsabilités) : on l'utilisera pour faire l'analyse environnementale des modes de traitement envisagés. Pour l'analyse, quatre systèmes potentiels de gestion des déchets ont été retenus :

- La collecte traditionnelle et la mise en décharge contrôlée sans récupération de biogaz : système 1. C'est le contexte de référence qu'on rencontre généralement dans toutes les villes des pays en développement.
- La collecte traditionnelle et la mise en décharge avec récupération de biogaz : système 2, la performance de ce système dépend des potentialités de récupération de biogaz de décharge. Ce potentiel varie entre 50 et 70 % lorsque les conditions techniques d'exploitation permettent de limiter les pertes de biogaz.
- La collecte traditionnelle, tri compostage des matières fermentescibles, valorisation agricole du compost et mise en décharge des refus : système 3. Dans ce système, on a travaillé uniquement avec les méthodes industrielles qui peuvent permettre d'arriver à une capacité de traitement comparable aux deux premiers systèmes.
- La collecte traditionnelle, tri méthanisation des matières fermentescibles (avec valorisation du biogaz), compostage du digestat et mise en décharge des refus : système 4. Ici encore, seule la méthode industrielle de méthanisation est traitée pour les mêmes raisons que ci-dessus.

La plupart des filières de traitement proposées ici ont été utilisées dans les villes des pays en développement.

OBJECTIFS ET CHAMP DE TRAVAIL

Faire une analyse environnementale de quatre systèmes de gestion de déchets retenus dans le cadre de ce travail consiste à analyser les conséquences des actions de ces systèmes sur les différents compartiments de la biosphère (eau, air, sol) ou à travers les différents effets environnementaux : toxicité, effet de serre, acidification, dégradation de la couche d'ozone, etc.

Pour ce faire, on s'appuiera sur le protocole normatif de l'ACV. Il est nécessaire de définir les objectifs et les frontières, de réaliser un inventaire (bilan matière énergie), de faire une évaluation des impacts potentiels et enfin d'interpréter les résultats pour les différents systèmes étudiés.

L'analyse du cycle de vie de systèmes de gestion des déchets a vocation à aider les décideurs à choisir entre différentes possibilités de gestion des déchets municipaux. Au-delà des systèmes de gestion, tels que définis au début de ce chapitre, il s'agira de rechercher les moyens à mettre en œuvre pour améliorer le système lui-même. Ces moyens pouvant être techniques (choix du type de véhicule de collecte, choix du mode d'organisation de la collecte, choix de procédés techniques à mettre en place) ou organisationnels (nombre et taille des installations, installation en unité centralisée ou éclatement en plusieurs petites unités). La variation de moyens techniques et organisationnels ne pourra être envisagée qu'à l'intérieur des quatre systèmes prédéfinis. L'étape dite « collecte traditionnelle » est commune à tous les systèmes de gestion à analyser. Cette étape comporte trois phases complémentaires : la précollecte, la collecte et le transport vers le lieu de traitement ou d'élimination.

Les analyses qui suivent devraient permettre de répondre aux questions suivantes : « Quels seraient les impacts socio-économiques et environnementaux sur une ville située en milieu tropical si : (i) tous les déchets collectés étaient d'abord compostés avant la mise en décharge des refus ? Ou (ii) étaient méthanisés avant la mise en décharge des refus ? Ou enfin si (iii) le biogaz qui se dégage après la mise en décharge des déchets bruts était récupéré et valorisé en énergie ? ». L'analyse de cycle de vie étant un outil dont la réalisation demande beaucoup de données, il est indispensable de définir dans ce chapitre introductif le champ et la frontière du système, de manière à pouvoir bien apprécier la nature des informations à rechercher.

Définition des frontières

Définir le champ de l'étude revient d'une part à donner une frontière aux systèmes étudiés et d'autre part à donner les précisions de l'étude. Il convient de rappeler que l'ACV, de par sa définition, a pour fondement l'extension maximale des frontières et se veut prendre en compte tous les flux matières et énergies pouvant intervenir dans le système étudié. Cela pose des problèmes compte tenu de la masse d'informations à collecter. Il est donc plus juste de limiter les frontières de l'étude en fonction des objectifs énoncés dans le paragraphe ci-dessus.

Il ne faut pas perdre de vue qu'en fonction de la complexité du problème posé chaque acteur en présence doit appréhender la gestion des

déchets en fonction de sa responsabilité propre et de son champ de compétences. Le tableau n° 33 donne un aperçu du champ de compétence des différents acteurs.

Tableau 33 : Champ de compétence des différents acteurs en fonction du problème à traiter

[Ngnikam, 2000]

Problème à traiter	Marge de manœuvre	Acteurs décisionnels
Choix du lieu d'implantation d'une unité de traitement	Politique	État, commune
Choix du procédé de traitement	Conception, Investissement, Exploitation	État, commune, prestataire de service, service technique des ministères, service technique de la commune.
Choix du procédé de collecte et de précollecte	Conception, investissement, exploitation	Commune, prestataire de service, service technique de commune

Les différentes visions exprimées par les acteurs sont complémentaires. Contrairement aux autres méthodes d'évaluation environnementale (comme par exemple l'observatoire qui privilégie les frontières territoriales), l'ACV d'un système de gestion des déchets doit être centrée sur l'étape de fin de vie, c'est-à-dire à partir du moment où les produits deviennent déchets jusqu'à leur stockage ultime en tenant compte des valorisations éventuelles. La figure n° 17, présente la frontière des différents systèmes de gestion envisagés depuis la production du déchet jusqu'au stockage (retour dans le milieu naturel) d'une part et les valorisations « énergie » et « matière » (retour de la matière vers le circuit économique) d'autre part.

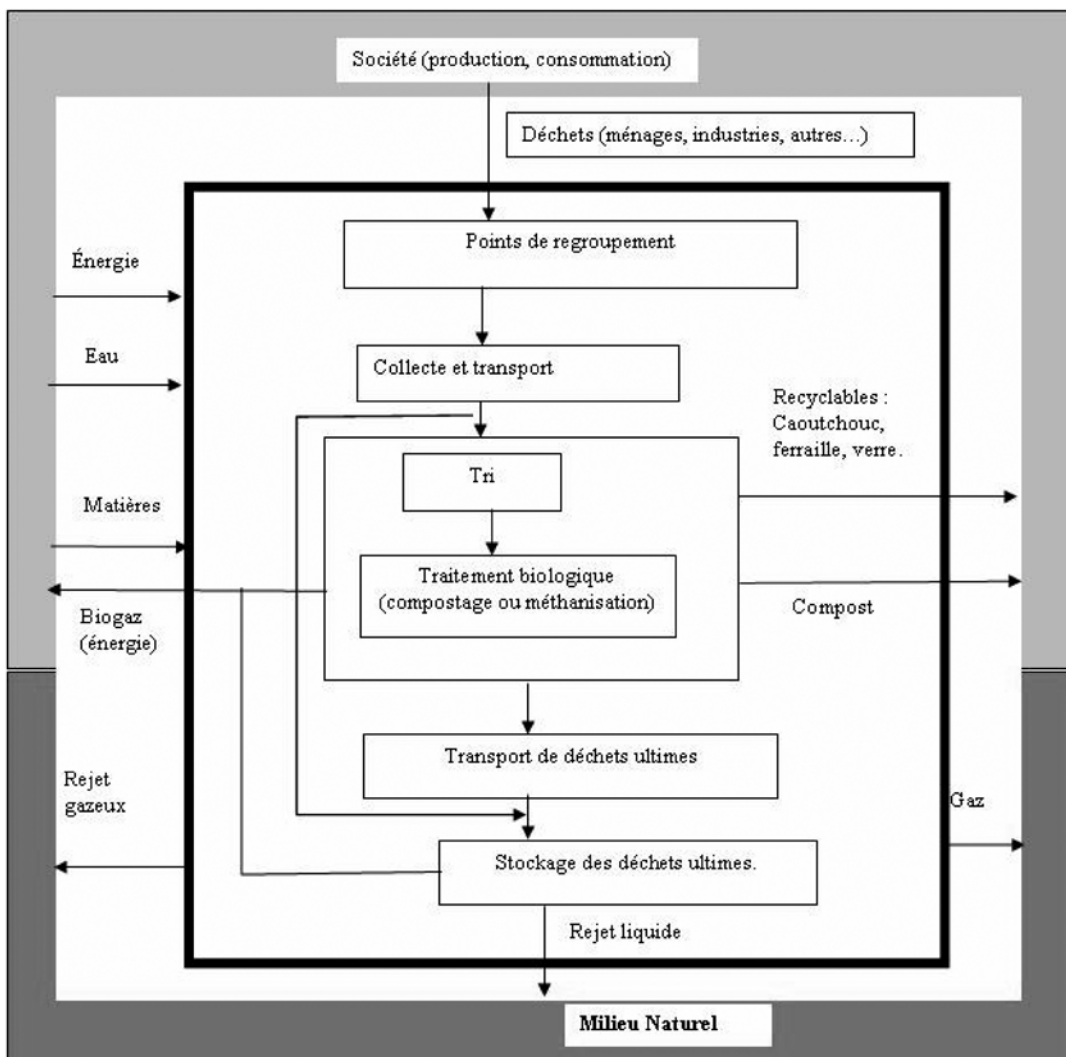


Figure 17 : Définition de la frontière des systèmes de gestion des déchets étudiés [Ngnikam, 2000]

La figure n° 17, présente la frontière des systèmes étudiés et permet d'identifier dès à présent les transferts de pollution pouvant exister entre le système et le milieu extérieur, que ce soit la société de production et de consommation ou le milieu naturel. On pourra ainsi mesurer à partir d'une comptabilité de flux entrant et sortant du système la plus-value que pourra apporter une valorisation matière (compostage) ou énergie (mé-

thanisation) par rapport à un système de référence où aucun traitement n'est effectué.

La définition de la frontière du système permet ainsi :

- d'identifier les informations nécessaires pour la réponse aux questions posées. Lorsqu'elles existent, ces informations sont dispersées chez différents acteurs ;
- de dégager les systèmes directement concernés par l'action étudiée ;
- de cerner les systèmes indirectement liés aux objectifs de l'action, qui sont encore non considérés ou considérés de manière floue.

Dans les contextes considérés dans cet ouvrage, il sera question de filtrer à partir de la définition des frontières du système les informations dont on a besoin. Par exemple, la manière dont la ménagère stocke les déchets dans la concession n'est pas intéressante. Par contre, on s'intéressera au déchet à partir du moment où il est entreposé hors de la concession.

Définition de l'unité fonctionnelle

La notion d'unité fonctionnelle dans l'analyse de cycle de vie est définie par l'intermédiaire d'une unité de fonction, de produit et de temps [Rousseaux, 1993]. Les quatre systèmes étudiés ici ayant pour but d'éliminer ou de traiter les ordures ménagères, l'unité produit la plus logique à prendre ici sont ces ordures. La fonction assurée peut être différente suivant le système étudié. La figure n° 18 présente les différentes fonctions que doivent remplir les quatre systèmes à étudier.

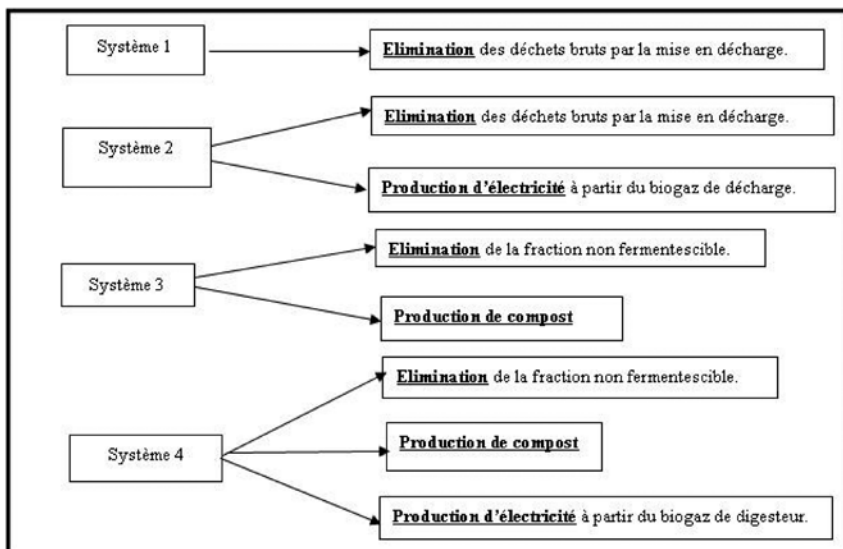


Figure 18 : Fonctions pouvant assurer les systèmes étudiés [Ngnikam, 2000]

Si pour le système 1 (collecte traditionnelle et mise en décharge des déchets bruts), une seule unité de fonction peut être prise en compte (élimination des déchets), tous les autres systèmes assurent au moins deux fonctions (élimination des déchets et production de la matière valorisable (compost) et ou énergie (biogaz)). Dans ce cas, on parle plutôt d'unité multi-fonctionnelle ou base multi-fonctionnelle. En effet, à chaque fonction assurée par le système, on peut associer une unité fonctionnelle définie par l'unité produit, l'unité fonction et l'unité de temps.

À partir de la figure n° 18, on peut dire que seule la fonction élimination est commune à tous les systèmes. Le but visé par cette opération étant de minimiser les impacts négatifs des déchets sur les populations et sur le milieu naturel, d'où l'objectif écologique qui est recherché. Par contre, les fonctions de production de compost ou de biogaz pour la valorisation énergétique, en plus de diminuer les impacts négatifs des déchets, permettent soit d'avoir un produit final utile pour augmenter la productivité des terres agricoles soit de produire de l'énergie. Malgré la diversité qui existe entre les différentes fonctions assurées par les systèmes, on peut dire que la fonction de « traitement » est fédératrice. Ainsi, on retiendra l'unité fonctionnelle suivante pour la suite du processus d'analyse :

Tableau 34 : Unités fonctionnelles retenues

Fonction	Unités fonctionnelles
Traitement des déchets	<ul style="list-style-type: none"> - Unité produit : 1 000 kg d'ordures ménagères et déchets assimilés - Unité fonction : traitement (mise en décharge, compostage ou méthanisation) - Unité de temps : par an

Le choix de cette unité fonctionnelle tient compte du fait que le flux de déchets est variable en composition et en quantité dans le temps et dans l'espace, en fonction du contexte socio-économique spécifique aux producteurs. En effet, à l'échelle d'une ville de plus d'un million d'habitants, l'Ademe recommande le tri d'au moins 2500 kg d'ordures prélevées dans cinq bennes provenant de secteurs différents (soit 500 kg par benne) pour avoir un échantillon de déchets représentant le gisement des ordures ménagères de la ville [Ademe, 1993]. Par ailleurs, en se basant sur la théorie d'échantillonnage de matière morcelée de Pierre Gy, Pineau (1995) a pu établir qu'un échantillon minimum d'environ 200 kg par benne est suffisant pour avoir la composition des déchets de la benne avec une marge d'erreur de moins de 10 %. À l'échelle d'une ville comme Yaoundé (1,2 million d'habitants en 1998), une quantité de 1 000 kg (c'est-à-dire

200 kg par benne x 5 bennes) d'ordures ménagères peut être représentative de l'ensemble du gisement.

L'unité de temps d'une année permet également de tenir compte de la variabilité saisonnière.

La définition de la frontière du système permet de mettre en exergue les flux d'échanges qui existent entre le système et l'extérieur. L'évaluation de ces flux se fera à l'étape d'analyse de l'inventaire présentée dans le chapitre suivant.

Le choix des options techniques à mettre en place est étroitement lié à la nature des déchets à traiter. Les ordures ménagères constituant l'intrant le plus important du système, il est nécessaire de connaître les paramètres fondamentaux qui permettront de caractériser les déchets. Les caractéristiques des déchets ménagers sont présentées dans le chapitre 3.

INVENTAIRE DES ENTRÉES ET SORTIES DES QUATRE SYSTÈMES DE GESTION DES DÉCHETS

Il s'agit dans ce paragraphe de faire une comptabilité analytique des flux de matières et énergies qui entrent ou sortent de chaque système. Le système pris de façon globale est très complexe. Il est nécessaire de le subdiviser en petites unités, ce qui permettra une appréhension plus claire et plus exploitable des différents procédés utilisés. L'évaluation globale des rejets de matières et du flux d'énergie nécessitera alors de connaître les relations entre les différents sous-systèmes. Pour répondre à cet objectif, la première partie de ce chapitre est consacrée à la description analytique des différents sous-systèmes afin de dégager tous les postes de consommation ou de rejet de matière ou d'énergie devant être comptabilisés dans le bilan. La deuxième partie sera donc consacrée à la réalisation des bilans matières et énergies des différents sous-systèmes.

Description des différents systèmes

Les quatre systèmes de gestion des déchets étudiés comportent quatre sous-systèmes. Il s'agit par ordre d'apparition de :

- La précollecte ;
- La collecte et le transport ;
- Le traitement (compostage ou méthanisation) ;
- La mise en décharge (avec récupération de biogaz ou non).

Chaque étape de la chaîne de traitement constitue un sous-système qui est en interaction avec les étapes ultérieures. Il convient donc de décrire chaque sous-système afin d'identifier les entrées et les sorties de matière

ou d'énergie. La phase de précollecte pendant laquelle le ménage regroupe ses ordures ménagères à domicile et les transporte à un lieu de regroupement ne sera pas prise en compte dans l'analyse. Par contre, on en tiendra compte si cette opération est assurée par un tiers.

Description technique des méthodes de collecte et de transport

Il s'agit de définir toutes les opérations qui se déroulent à l'étape de collecte et de transport des déchets jusqu'au lieu de traitement qui peut être la décharge (dans les systèmes 1 et 2), l'usine de compostage ou de méthanisation des déchets (systèmes 3 et 4).

L'étape de collecte traditionnelle des déchets décrite ici ne concerne que la collecte et le transport des déchets bruts du lieu de production jusqu'au site de traitement ou jusqu'à la décharge.

La précollecte

Le mode d'organisation de la précollecte peut avoir une influence sur le type d'aménagement du point de regroupement. C'est simplement à ce titre que sont présentés ici les modes de précollecte envisageables.

- description de différentes options envisageables

En tant qu'étape intermédiaire entre la production dans les ménages et les bacs de regroupement, elle doit tenir compte non seulement de ce qui se fait en amont, mais également de l'étape suivante. Son organisation doit prendre en compte les caractéristiques physiques du milieu et les données psychologiques et socio-économiques des populations concernées.

Trois schémas organisationnels de précollecte sont envisageables dans le contexte des villes des pays en développement. Le tableau n° 35 présente les différents scénarios de précollecte envisageables dans ce contexte.

Tableau 35 : Présentation des schémas de précollecte envisageables

Type de précollecte	Avantages	Inconvénients
<p>Apport volontaire des populations : Les populations transportent elles-mêmes les déchets qu'elles déversent dans des bacs prévus au niveau des points de regroupement</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➢ Implication réelle de la population ➢ Conception simple ➢ Coût direct nul pour la collectivité 	<ul style="list-style-type: none"> • Impose un effort d'éducation des populations afin qu'elles puissent non seulement le faire mais aussi s'autocontrôler • Impose une multiplication des points de regroupement afin de les rapprocher des populations • Ne peut être envisagé efficacement que dans les quartiers structurés
<p>Par des tiers rémunérés : Des particuliers (individus ou groupes d'individus regroupés en PME ou en association) collectent les déchets en porte à porte et les transportent manuellement ou à l'aide de petits matériels (brouettes, pousse, etc.) vers les points de regroupement</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Travail plus soigné • Meilleur rendement qui peut atteindre les 100 % même dans les zones enclavées • Réduction du nombre de points de regroupement puisque les « précollecteurs » peuvent parcourir des distances plus importantes (jusqu'à 1 km) • Peut être mis en œuvre dans tous les tissus urbains 	<ul style="list-style-type: none"> • Coût élevé puisqu'il faut payer les « précollecteurs » et acquérir du matériel • Fait moins appel à la dynamique populaire
<p>Apport volontaire des populations relayées par des tiers rémunérés : C'est une combinaison des deux formes ci-dessus ; les populations transportent les déchets jusqu'à des points de stockage de transit à partir desquels ceux-ci sont repris par des tiers jusqu'au point de regroupement bien aménagé et accessible aux véhicules de collecte</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Conciliation des avantages et inconvénients de chacun des modes ci-dessus : réduire le coût du service tout en améliorant sa qualité • Intéressant pour certaines zones sous-structurées particulièrement pauvres en voirie et où il est difficile d'aménager des points de regroupement 	<p>Il faut aménager, même sommairement, les points de stockage intermédiaires</p>

L'option de base qui est la précollecte par apport volontaire des populations est la plus facile à mettre en œuvre, puisqu'elle n'engendre pas de coûts supplémentaires pour la communauté. Cette option est néanmoins limitée, car les différents taux de collecte qu'on pourra atteindre à cause du problème d'accessibilité²¹ dans les parcelles de certains quartiers sont de l'ordre de :

21 Le critère d'accessibilité dans les parcelles a été mesuré pendant les enquêtes ménages, et les taux indiqués ici correspondent à la proportion des ménages qui peuvent avoir accès à un bac à ordures placé dans un rayon de 300 m.

- 20 à 50 % dans les zones périurbaines ;
- 80 % dans les marchés ;
- 85 % dans les quartiers structurés de moyen et de haut standing ;
- 60 % dans les quartiers à habitat spontané.

Cette méthode ne peut permettre d'atteindre qu'un taux de collecte total de moins de 50 % dans le contexte de Yaoundé. Pour atteindre un taux de couverture totale acceptable de 75 %, il serait intéressant de mettre en place un système de précollecte par des tiers rémunérés dans les quartiers spontanés, ce qui permettrait d'atteindre un taux de couverture de cette zone situé entre 80 et 90 %.

- les matériels de précollecte

Le type de récipient de précollecte est essentiellement fonction des moyens utilisés pour la collecte. On ne s'intéressera pas ici aux types de matériels utilisés par les ménages pour le regroupement des déchets à domicile, mais plutôt au type de récipient à mettre en place pour le regroupement des déchets avant la collecte. Le tableau n° 36 ci-dessous donne quelques indications sur ces matériels.

Tableau 36 : Matériels de collecte envisageables

Mode de précollecte	Type de récipients	Avantages	Inconvénients
Apport volontaire par les ménages	Demi-fûts (environ 100 litres)	<ul style="list-style-type: none"> - Technologie simple (matériels de récupération) - Manutention facile - Accessible aux enfants - Faible coût d'acquisition 	<ul style="list-style-type: none"> - Faible volume, donc nécessité d'un nombre important - Enlèvement plus lent, car manuel - Faible durée de vie (< 6 mois) - Fréquence de vidange élevée
	Conteneurs de 1 m ³	<ul style="list-style-type: none"> - Peu encombrant - Durée de vie plus importante (2 à 3 ans) 	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessite une manutention mécanique - Peu accessible aux enfants - Coût d'acquisition élevé
Par des tiers rémunérés	Bacs de 6 ou 16 m ³	<ul style="list-style-type: none"> - Volume plus important, donc nombre réduit - Durée de vie plus importante (moyenne 3 ans) - Rythme de remplissage faible 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût d'acquisition élevé - Encombrant, car il nécessite le double de sa surface au sol pour son enlèvement - Nécessité d'une manutention mécanique

Du fait du problème d'encombrement, les bacs de 6 à 16 m³ ne peuvent être déposés qu'à l'entrée des quartiers à habitat spontané. Leur emplacement doit être bétonné pour éviter les infiltrations de lixiviat et les glissements des véhicules de collecte en saison des pluies. Ce type de matériel nécessite une surface minimale de 50 m² pour éviter les embouteillages pendant leur chargement.

La collecte et le transport des ordures

Le schéma organisationnel et les moyens utilisés sont donc fonction de plusieurs paramètres parmi lesquels on peut citer :

- les types de matériel à disposer au point de regroupement ;
- les quantités de déchets à enlever ;
- la répartition spatiale des bacs ou des conteneurs de collecte ;
- les distances à parcourir jusqu'au point de traitement ;
- les caractéristiques physiques des zones à desservir.

Contrairement à la précollecte, cette étape utilise essentiellement des moyens mécaniques. Trois types de véhicules sont envisageables en fonction du matériel de précollecte utilisé. Le tableau n° 37, présente les avantages et les inconvénients de chaque type de véhicules de collecte, en fonction du type de récipient utilisé.

Tableau 37 : Types de véhicules de collecte et de transport des déchets en fonction de la nature des matériels de précollecte

Type de Véhicule	Type de matériels de précollecte	Avantages	Inconvénients
Bennes d'entreprise	Demi-fûts	<ul style="list-style-type: none"> - Faible coût à l'achat - Peut être acheté auprès des entreprises locales, les pièces détachées sont disponibles - Utilisation d'une main-d'œuvre importante pour son chargement (6 à 8 éboueurs) 	<ul style="list-style-type: none"> - Faible rendement en raison du faible volume de la benne - Chargement de la benne très pénible et long (3 heures en moyenne pour un volume de 3 à 4 m³). - Risque d'éparpillement des déchets pendant le transport
Bennes tasseuses	Demi-fûts ou conteneurs de 1 000 litres	<ul style="list-style-type: none"> - Gain sur le transport en raison du compactage - Gain de temps si le chargement est automatique - Pas de risque d'éparpillement des déchets pendant le transport 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût élevé à l'acquisition - Technologie quelque peu sophistiquée - Ce matériel qui est adapté uniquement pour le transport des déchets n'est pas commercialisé par des entreprises locales

... / ...

Type de Véhicule	Type de matériels de précollecte	Avantages	Inconvénients
Amplirolls ou porte coffres	Bacs de 16 m ³ ou de 6 m ³	<ul style="list-style-type: none"> - Volume plus important - Durée de chargement / déchargement plus faible - Adapté pour les déchets à forte densité et les déchets d'élagage 	<ul style="list-style-type: none"> - Rendement de transport faible (pas de compactage des déchets) - Non disponible sur le marché local

Les bennes tasseuses semblent être mieux adaptées à la collecte des déchets dans les zones où l'on peut entreposer des bacs de faible volume (demi-fûts ou conteneurs de 1 000 litres). Par contre, dans certaines zones des marchés (secteur de vente des produits vivriers par exemple) et dans les quartiers à habitat spontané où l'on a une production importante regroupée, il est plus indiqué d'utiliser les bacs de grand volume qui seront enlevés par les amplirolls ou les porte coffres. Les bennes d'entreprise ont une rentabilité de transport trop faible pour que leur utilisation soit envisagée. Ce type de véhicule a néanmoins l'avantage d'être disponible et peut en cas de besoin relayer les véhicules que l'on vient de citer.

Autres étapes de transport des systèmes considérés

Il s'agit ici du transport des produits issus du processus de traitement (compost) ou des déchets ultimes (refus des systèmes de traitement).

Transport des refus

Après les usines de traitement, les refus issus du tri doivent être acheminés à la décharge. Contrairement à l'étape de collecte et de transport, ces déchets présentent l'avantage d'être déjà regroupés en un seul point où ils peuvent être chargés dans des conteneurs de grande capacité.

Pour le transport des refus, on a besoin pour minimiser les coûts d'utiliser un conteneur de grande capacité. L'efficacité est améliorée si les déchets sont compactés, car la présence en grande quantité des refus légers, comme le plastique et les tissus, augmente considérablement leur volume.

Transport de compost

À partir des enquêtes menées auprès d'un échantillon de 250 utilisateurs de compost à Yaoundé, il a été constaté que :

- 80 % du compost acheté est utilisé dans la ville et ses environs (sur un rayon de 20 km) ;
- 20 % sont utilisés dans les zones agricoles voisines de Yaoundé (sur rayon de 25 à 80 km).

Avec les usines de compostage qui vont être mises en place, les quantités de compost produites seront trop importantes pour être absorbées

uniquement par les petits agriculteurs environnants. On pose l'hypothèse que le transport du compost produit par les usines se fera sur une distance moyenne de 70 km. Le compost pourra être transporté aussi par train, mais pour l'analyse, on envisagera comme unique moyen de transport les camions de 19 tonnes ayant une capacité de chargement de 12 tonnes. Compte tenu de la faible densité du compost (0,6), on considérera qu'un camion ne pourra transporter en moyenne que 5 tonnes par voyage.

Description technique du traitement par compostage

Bien que les principes méthodologiques de compostage restent les mêmes, en fonction de la quantité de déchets à traiter, on peut mettre en place des techniques plus ou moins sophistiquées, ce qui a une influence notable sur les entrées et sorties des matières et énergies du sous-système. Pour cette raison, on présente dans ce paragraphe le compostage à petite échelle pour lequel de nombreux essais ont été conduits dans le but de dégager des paramètres d'entrée et sortie de ce système de traitement. Les quantités de déchets pouvant être traitées par cette méthode étant limitées, c'est l'approche industrielle qui sera utilisée pour faire une évaluation à l'échelle de la ville.

Présentation générale du procédé artisanal de compostage

Dans les essais conduits, c'est le compostage en tas ou andains successifs qui a été utilisé. Les déchets ramassés sont accumulés en un ou plusieurs tas sur un site aménagé appelé **compostière**. La taille d'un tas varie de 1 m³ (environ 350 kg) de matière fermentescible à 5 m³ (environ 2 tonnes). La taille des andains dépend généralement des capacités d'approvisionnement en déchets bruts, des caractéristiques de ces déchets, de la surface du site de compostage et des conditions climatiques. Chaque andain est contrôlé et retourné périodiquement (en moyenne 4 fois au cours du cycle qui dure 3 mois).

En règle générale, la production -artisanale de compost s'opère selon les trois principales étapes suivantes :

- Les opérations de prétraitement : tri sélectif des déchets fermentescibles (éventuellement à domicile), admission, tri manuel des fractions non fermentescibles et récupération éventuelle, réduction des dimensions des particules (par hachage sommaire), conditionnement et mélange, formation du tas ou andain.

- Les opérations de traitement : suivi du procédé par mesure de la température dans les tas, du taux d'humidité et éventuellement du pH, retournement des andains, aération (ajout de matières structurantes si né-

cessaire), arrosage, protection des tas contre les eaux de pluie, le soleil et les animaux domestiques errants, etc.

- Les opérations de post-traitement : broyage éventuel du compost mûr, tamisage du compost, stockage et mise en sac, commercialisation.

Les opérations de prétraitement

L'objectif des opérations de prétraitement est de préparer la matière première initiale afin qu'elle puisse être compostée et conditionnée de manière optimale. Il faut au préalable séparer la fraction organique putrescible des matériaux inertes et mélanger les substrats biodégradables de façon à obtenir un rapport initial carbone sur azote proche de 30. Ceci pour faciliter une biodégradation naturelle du mélange. Le prétraitement inclut les opérations suivantes :

Le tri avant le compostage :

Ce tri est indispensable car les ordures ménagères à composter contiennent des substances inorganiques ou des éléments pouvant libérer des produits toxiques lors de la décomposition des déchets (piles, bactéries, pesticides, peintures, etc.). Il est recommandé d'effectuer le tri des non-fermentescibles lors des opérations de précollecte, c'est-à-dire au niveau des ménages ou au moment du tri sur le site de compostage.

Dans les essais conduits, le tri se passe uniquement sur le site de compostage. Le tri à la source, envisagé dans le quartier Melen II à Yaoundé au début des essais à été abandonné au vu de l'importance de la sensibilisation préalable qu'il fallait faire pour réussir ce mode de tri [Ngnikam, 1993].

Dans les unités décentralisées de compostage, le tri est en général une opération manuelle qui requiert une main-d'œuvre abondante. Ce tri peut se faire sur une table ou à même le sol par la séparation visuelle et manuelle des déchets. D'autres essais effectués au Burkina Faso ont utilisé le tamisage grossier des déchets bruts [Wass *et al.*, 1996]. La fraction de déchets ainsi triés peut être importante (10 à 20 % du poids initial) et doit être évacuée par camion jusqu'au point de transfert ou à la décharge.

Le broyage ou déchiquetage des déchets :

D'après Gotass (1956) et Mustin (1987), la granulométrie de la matière à composter joue un rôle important pour un approvisionnement optimal en air et en eau de la masse. En effet, plus le matériau est divisé, plus rapide et efficace est l'attaque des micro-organismes car plus grande est la surface de contact.

Dans les régions tropicales humides, la matière putrescible étant très humide (50 à 65 % d'humidité), la présence des particules de grandes tailles est souvent indispensable car elles fournissent une « matière structurante » facilitant l'aération de la matière en décomposition. C'est pour

ces raisons que l'on a choisi dans les essais de réduire uniquement la taille des plus gros matériaux (jambes de plantain, cageot de tomate, tronc de bananier, etc.) en les découpant à la machette.

Mélange, dosage et formation des andains :

Il s'agit à cette étape de faire un mélange de la matière à composter de manière à obtenir un rapport C/N optimal compris entre 30 et 35. Un mélange rationnel est indispensable pour obtenir cet équilibre entre des matières très riches en carbone comme les déchets pailleux et ceux moins riches en carbone comme les déjections animales, les épiluchures de tubercules et de fruits.

Dans les essais, ce mélange se fait manuellement pendant le tri ou lors de la formation des andains.

Les opérations de traitement

Cette étape est limitée aux retournements, au suivi des différents paramètres de compostage. Le retournement et la manutention du compost sont des opérations très coûteuses car elles consomment à elles seules près de 50 % de la main-d'œuvre qui représente 41 % du coût de production de compost par cette méthode. Ces opérations sont effectuées manuellement lors des essais. Cependant, elles peuvent aussi être conduites avec des moyens mécaniques.

Les opérations de post-traitement

Le broyage du compost :

Pour augmenter le rendement global de compostage et améliorer la granulométrie du compost final, il est conseillé de broyer le compost mûr avant le tamisage. Le broyage a été fait pendant les essais par un broyeur émetteur équipé d'un moteur à essence (puissance 3 cv). La capacité de ce broyeur indiquée par son fabricant est de 6 m³/heure (environ 3 t/h). Mais avec les difficultés de chargement, l'humidité du compost, la capacité pratique de ce broyeur est de 1 à 2 tonnes/heure²² lorsque le chargement est effectué par quatre ouvriers. Pour atteindre cette performance, le broyeur consomme en moyenne 2 litres d'essence et 20 cl d'huile moteur.

Tamisage et tri du compost :

Un premier tri des éléments lourds (cailloux, verre, céramique, etc.) est effectué automatiquement par le broyeur et les éléments fins (papier, plastique PEBD, etc.) sont séparés du compost par soufflage. Le compost mûr est tamisé à 8 mm, suivant les besoins des consommateurs qui sont en majorité des maraîchers. Dans les unités de compostage, les tamis manuels

²² Elle est de 1 tonne/heure lorsque l'humidité du compost est comprise entre 30 et 40 % et de 2 tonnes/heure si le taux d'humidité du compost est inférieur à 30 %.

habituellement rencontrés sont constitués de fils d'aciers tenus par un cadre en bois. Ces tamis ont l'avantage d'être bon marché et peuvent être adaptés à toutes les tailles. Cependant, ce tamisage nécessite beaucoup de main-d'œuvre. En effet, quatre manœuvres peuvent dans ces conditions tamiser 1 tonne par heure de compost préalablement broyé et ayant moins de 30 % de taux d'humidité. Mais à plus de 50 % de taux d'humidité, ce rendement dépasse rarement 200 kg/heure.

Un crible rotatif manuel ou à moteur constitue aussi une solution technique, mais elle est coûteuse à l'achat et ce matériel nécessite d'être importé.

Les refus de tamisage sont constitués essentiellement de la matière organique difficilement biodégradable (bois, noyau de mangue, coque d'arachide ou de pistache, noix de palmiste, etc.) et des autres matières non fermentescibles ayant échappé au premier tri (plastiques, verre, métaux, etc.). Les matières organiques difficilement fermentescibles sont réutilisées lors de la formation des nouveaux tas tandis que les matières non fermentescibles sont évacuées en décharge.

Stockage et emballage du compost :

Le compost prêt à l'emploi est stocké dans un hangar à l'abri du vent et de la pluie afin de maintenir la teneur en eau initiale et d'éviter la perte de matière par envol. Pour la vente, le compost est conditionné en sacs de 25 ou 50 kg qui sont remplis et fermés manuellement.

Description technique et identification des rejets générés par le système de compostage industriel

Le bilan matière énergie du compostage industriel dépend :

- du procédé de compostage qui est utilisé (la place du broyage dans la chaîne de traitement, la granulométrie du compost final, le système de tri qui est mis en place (tri manuel ou mécanique), etc.);
- du type d'équipement utilisé dans les différentes opérations de compostage.

D'où la nécessité de définir un procédé de compostage sur lequel le bilan sera effectué. La définition de ce système tient compte de la nature des déchets en présence, de la capacité d'adaptation locale aux technologies utilisées et du niveau de revenu de la collectivité chargée de prendre en charge le système.

Certains anciens procédés de compostage industriel mettent le broyage presque au début de la chaîne de traitement. Ces techniques présentent l'inconvénient majeur que les éléments indésirables peuvent être broyés et dispersés dans la masse des déchets, ce qui rend leur tri très difficile après cette opération. De plus, il y a un risque de distribution de métaux lourds contenus dans les piles ou les batteries dans la matière organique à com-

poster. Fort de ces insuffisances, les nouveaux procédés qui ont été mis en place annulent l'étape de broyage ou la placent à la fin du processus (après la fermentation des substrats organiques).

Compte tenu de la différence qu'il peut y avoir dans la nature des déchets rencontrés et notamment de la faiblesse du tissu industriel et du manque de personnel qualifié pour la maintenance des équipements, la chaîne de traitement à mettre en place dans les villes des pays africains doit recourir le moins possible à la mécanisation. Ce constat montre la nécessité d'analyser minutieusement les adaptations qu'on pourra apporter à une chaîne standard de traitement pour répondre à ces contraintes.

Choix de procédés adaptés au contexte considéré

Dans le contexte des pays en développement, et notamment en région tropicale humide, les déchets sont très humides et riches en matières organiques fermentescibles. Par ailleurs, le niveau d'industrialisation des pays de la région est faible. De ce fait, une usine de compostage avec une chaîne de tri mécanique aura vraisemblablement encore plus de mal à fonctionner. Ceci pour les raisons d'éloignement par rapport aux usines de fabrication de pièces de rechange et surtout à cause du faible niveau de développement économique du pays. C'est pour cette raison que les chaînes de traitement telles que proposées actuellement par les constructeurs doivent être relativement simplifiées pour être adaptées au contexte du pays.

Pour élaborer une chaîne simplifiée, on s'est basé une chaîne standard proposée par la société Gondard en 1994 dans le cadre d'une étude de pré faisabilité de l'installation d'une usine de compostage des ordures ménagères à Yaoundé [Vermande *et al.*, 1994]. Cette chaîne standard fonctionnant suivant le procédé Dano comprend essentiellement :

- une aire de réception des déchets avec un trommel pour assurer la dilacération des sacs et le criblage des constituants ;
- un hall de fermentation de la matière organique avec un retourneur d'andain ;
- un atelier d'affinage avec un second trommel nécessaire pour cribler à une maille plus fine le compost, un séparateur électromagnétique et une table densimétrique qui permet de séparer par exemple le verre.

La liaison entre les différents halls, ateliers ou appareils se fait grâce à des convoyeurs à bandes ou à des engins de levage (chargeur sur pneu, etc.). Une presse est prévue pour compacter les matériaux récupérés (papiers, matières plastiques, objets métalliques, etc.). Cette usine a une chaîne de production entièrement mécanisée et utilise peu de main-d'œuvre.

En Afrique, le coût de la main-d'œuvre est moins élevé que dans les pays occidentaux, et il est judicieux d'adapter la chaîne au contexte du

pays avec trois objectifs principaux : l'utilisation importante de la main-d'œuvre, la réduction du coût de production du compost et la réduction des problèmes de maintenance.

Compte tenu de ces contraintes, la société Gondard avait proposé à notre demande une nouvelle chaîne qui semble plus adaptée au contexte des villes du Cameroun en particulier et d'Afrique en général. En effet, le tri mécanique est remplacé par un tri manuel, ce qui permet d'améliorer le taux de récupération des matériaux et d'obtenir un compost de très bonne qualité grâce à une bonne séparation des objets indésirables. Ce procédé permettra d'obtenir un compost dont la valeur sera proche de celle qui a été obtenue par la méthode artisanale, c'est-à-dire moins chargé en métaux lourds et en éléments indésirables.

L'unité de compostage retenue pour l'évaluation comprendrait :

- un bac ou une fosse de réception des ordures avec trémie;
- un convoyeur à bande sur lequel défilent les ordures ménagères, dont les ouvriers assurent le tri;
- un convoyeur à bande pour le transport des ordures triées jusqu'aux aires de fermentation;
- une aire de fermentation avec un retourneur d'andain et des aires de mûrissement;
- une aire d'affinage (broyage et affinage) avec un broyeur et un crible mobile;
- une aire de stockage de compost.

Le transport des déchets entre les différentes aires se fera par l'intermédiaire de chargeurs à pneus.

Description des chaînes de traitement des déchets par méthanisation

Le procédé Valorga sur lequel on s'appuyera a d'abord été conçu dans le cadre national français des années quatre-vingt, pour traiter des ordures ménagères brutes, comme c'est le cas à l'usine d'Amiens. Le potentiel méthanisable correspond à la fraction fermentescible des ordures ménagères, à la fraction papier carton et dans le cas de la ville d'Amiens, à 75 % de la fraction fine, soit environ 68 % du poids initial des ordures ménagères [Valorga, 1995]. Dans le cas des villes de la région de l'Afrique du Centre et de l'Ouest, cette fraction méthanisable représente entre 70 et 85 % des ordures ménagères brutes.

L'installation de traitement des déchets ménagers d'Amiens est constituée :

- d'une chaîne primaire dont la finalité est la préparation de la matière qui sera introduite dans l'unité de méthanisation. Elle comprend les

fonctions essentielles de stockage et reprise des ordures, broyage, tri des métaux ferreux et d'autres inertes ;

- d'une unité de méthanisation qui assure la digestion anaérobie de la matière organique biodégradable préalablement triée à l'étape précédente. Elle comprend le malaxage de la matière organique, le système d'introduction dans les digesteurs, la digestion anaérobie avec production de gaz, le système d'extraction et de pressage du digestat ;
- d'une unité de séchage biologique et d'affinage de l'amendement organique ;
- d'une unité de valorisation du biogaz.

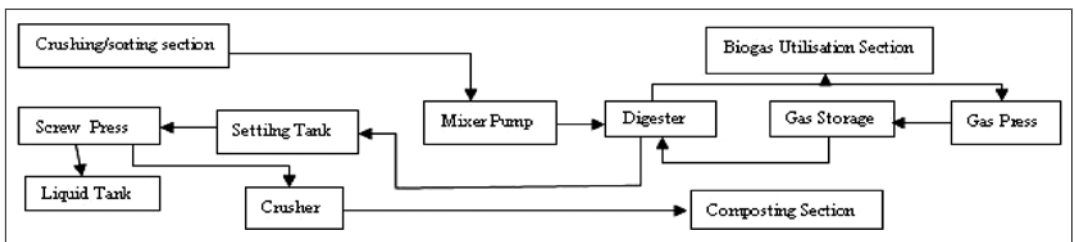


Figure 19 : Principales étapes de méthanisation des ordures ménagères suivant le procédé Valorga [Cecchi et al., 1988]

L'unité de méthanisation est au cœur du procédé Valorga et permet la digestion anaérobie de la partie fermentescible des ordures ménagères (figure n° 19). L'usine d'Amiens est équipée de trois digesteurs d'une capacité de 2 400 m³ chacun, lui conférant une capacité totale de traitement de 72 000 tonnes par an (environ 240 tonnes/jour). Avant d'être injectés dans les digesteurs, les déchets triés sont transformés en une boue épaisse à forte teneur en matière sèche après mélange et malaxage avec les jus de sortie largement éclaircis par filtration et centrifugation.

Le tableau n° 38 donne les principales caractéristiques de la digestion anaérobie à Amiens et Tilburg aux Pays-Bas où la société Valorga a installé une autre unité traitant des ordures ménagères préalablement triées à la source et mélangées à des déchets verts et à des déchets de restauration.

Tableau 38 : Principales caractéristiques de la digestion anaérobie dans les usines de méthanisation

Caractéristiques	Amiens (France)	Tilburg (Pays-Bas)
Température	37 - 40	37 - 40°C
pH	7 - 7,2	7 - 7,2
Temps de rétention	18 - 25 jours	24 jours
Charge organique	7,5 - 9	7,0 - 8,6 kg de MO sèche/m ³ /j
Teneur en CH ₄	54	55 %
Production de CH ₄	210 - 240	183 Nm ³ CH ₄ / tonne de MO sèche

Source : documents Valorga.

Le transfert et l'homogénéisation des matières sont favorisés par la recirculation de biogaz sous pression, à la base des digesteurs, constituant une spécificité du procédé.

Les produits digérés sont extraits du digesteur pour subir un pressage mécanique à vis d'où ressort un « pressat » à 55 % de matière sèche destiné à l'unité de séchage.

Les jus de pressage à 13 % de matière sèche sont d'abord tamisés pour descendre à 11 % de matière sèche, puis centrifugés pour obtenir un jus à 6 % de matière sèche. Ces jus clarifiés sont destinés à la dilution des ordures ménagères triées avant l'entrée dans le digesteur. La clarification des jus de pressage produit une boue envoyée comme le pressat vers l'unité de séchage biologique. Cette unité restera inchangée dans le système retenu pour l'analyse.

Le système appelé ici séchage biologique est en fait une opération de compostage classique utilisée pour amener ces produits à une siccité convenable et les stabiliser en vue de leur commercialisation en tant qu'amendement. Le pressât issu du digestat est à 55 % de matière sèche constituée par une matière organique moyennement fermentescible, à base de fibres ligno-cellulosiques associées à une fraction non négligeable de plastique et inertes. Après compostage, le produit est criblé sur un trommel de 12 mm et le non-passant est appelé refus combustible de deuxième génération (RC2). Le passant est encore affiné à l'aide d'un épierreur qui produit un refus de lourds inertes encore dénommé VCC. Le compost ainsi affiné est stocké pour être commercialisé.

Les boues de clarification des jus sont traitées à part. Elles sont plus pauvres en matière organique et leur traitement par compostage nécessite l'incorporation d'écorces d'arbre jouant le rôle de matière structurante. Après compostage, la matière est criblée à la maille de 20 mm, puis stoc-

kée avant d'être vendue. Les refus sont réinjectés en entrée, en mélange avec les boues, jusqu'à l'obtention d'une dégradation aérobie complète.

À sa sortie du digesteur, le biogaz est recueilli dans des bâches souples à pression et température atmosphérique avant valorisation énergétique (chaudière à vapeur); les différences de température et de pression entraînent la précipitation d'un condensat qui est récupéré pour être éliminé. Une fraction du biogaz est mise sous pression afin d'être re-circulée dans les digesteurs pour agitation de la matière.

Description des équipements et du fonctionnement d'une décharge

En plus de la description du système d'exploitation de la décharge, on présentera le bilan hydrique d'une décharge qui permet de quantifier le lixiviat qui pourra être produit par une unité fonctionnelle de déchets mis en décharge.

La construction d'une décharge inclut la pose d'une couche de fond étanche, la mise à disposition d'une infrastructure d'exploitation adéquate, ainsi qu'un système de captage de gaz et de lixiviat.

Dans le système d'exploitation, on considérera que les déchets sont répartis sur la décharge par un bouteur à pied de mouton. Un compacteur à pied de mouton assure le compactage des déchets jusqu'à l'obtention de la densité optimale voisine de 0,6. Un chargeur sur pneus assure la couverture des déchets avec du matériau peu imperméable (latérite dans le cas de Yaoundé) à raison de 3 heures de travail par jour. Ce matériau doit être préalablement excavé par un bulldozer.

Il est aussi entendu que le site de prélèvement des matériaux de couverture des déchets est proche des casiers en exploitation.

Élaboration des bilans matières énergies

Il s'agit dans cette partie, après avoir décrit les sous-systèmes, d'inventorier les flux de matières et d'énergies qui y interviennent. Pour faciliter l'exploitation du bilan, les matières dont les effets sur l'environnement sont similaires vont être regroupées. Toutes les données doivent être ramenées à l'unité fonctionnelle et les flux sortants du système seront ensuite recensés pour chaque milieu concerné (eau, air, sol) (figure n° 20).

Chaque fois que c'est possible, on donnera le niveau de précision des données recensées. La vérification du principe de la conservation de la matière sera la base fondamentale à la validation de ce bilan.

La figure n° 20, donne le principe de raisonnement pour l'élaboration des bilans matières et énergies de chaque sous-système.

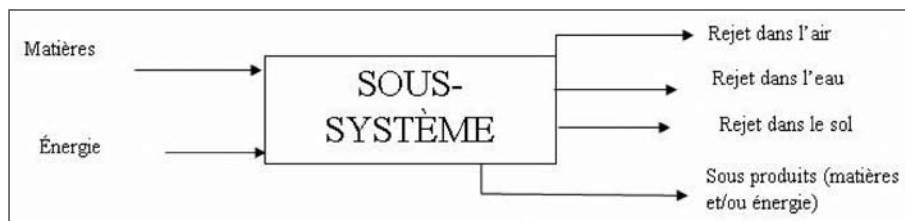


Figure 20 : Principe d'établissement des bilans matières énergies

Il est nécessaire d'établir d'abord des bilans pour les parties communes à tous les systèmes, notamment la précollecte, la collecte et le transport, avant de passer à l'élaboration des bilans des systèmes de traitement (compostage, méthanisation). À l'issue de ces bilans par sous-systèmes, une synthèse pour chacun des quatre systèmes retenus sera réalisée. Ce chapitre s'achève par une analyse de chaque bilan global. On ne prendra en compte que les émissions directes issues du système. Par exemple, pour le sous-système transport, il ne sera pas tenu compte des émissions liées à la fabrication du véhicule de collecte, ni à son usure, mais uniquement des émissions dues à son exploitation. Il en est de même de l'eau utilisée par le process pour laquelle il ne sera pas tenu compte des émissions ou de l'énergie utilisée pour le captage, le transport et la distribution.

Profil des données utilisées pour effectuer le bilan de l'étape de collecte et de transport des déchets

Les données nécessaires pour l'élaboration des bilans matières énergies de la phase collecte et de transport sont relatives aux déchets, au type de véhicule utilisé, à la consommation de carburant, aux distances de collecte et de transport, etc. Dans cette analyse, on prend une distance moyenne de transport de 15 km. La distance d'une rotation qui dépend de la nature du véhicule et de la manière par laquelle la collecte est organisée varie entre 32 et 45 km.

Nos investigations sur le terrain effectuées pendant une période de 10 jours permettent d'établir le ratio de consommation suivant en fonction du type de véhicule :

- 0,62 litres/km pour les bennes tasseuses (1,61 km/litre) ;
- 0,45 litres/km pour les amplirolls (2,22 km/litre).

La capacité de transport de chaque type de véhicule est présentée dans le tableau n° 39

Tableau 39 : Capacité de transport de chaque type de véhicule

Lieux de traitement	Type de véhicule	Capacité journalière de transport (t)	Tonnage collecté /km	Consommation de carburant (l*tonne ⁻¹ *km ⁻¹)	Distance parcourue par jour (km)	Consommation de carburant (l*tonne ⁻¹)
Décharge (16 km en moyenne)	Benne tasseuse	30,7	0,26	0,0202	118	2,38
	Ampliroll	25,4	0,15	0,0177	170	3
Usine de traitement (moyenne 10 km)	Benne tasseuse	38,4	0,436	0,0226	88	2
	Ampliroll	43,2	0,282	0,0104	153	1,6
Transport de refus (moyenne 15 km)	Semi-remorque	96,0	0,96	0,016	100	1,6

Ce tableau montre que les bennes tasseuses sont peu rentables en ce qui concerne la capacité de transport pour des courtes distances (38,4 tonnes par jour contre 43,2 tonnes pour un ampliroll). La consommation d'huile est estimée à 10 % du carburant. Pour estimer la consommation de carburant par tonne de déchets pour chaque système, la consommation de chaque type de véhicule a été pondérée par la quantité journalière de déchets collectés.

Les bennes tasseuses sont moins consommatrices de carburant sur des longues distances par rapport à l'ampliroll (2,38 litres/tonne contre 3 litres/tonne). Par contre, lorsque les distances de transport deviennent faibles, le transport des déchets par ampliroll est préférable, car on a simultanément une augmentation des quantités collectées et une diminution de la consommation de carburant (1,6 litres/tonne contre 2 litres/tonnes pour les amplirolls) en passant d'une distance moyenne de transport de 16 à 8,5 km.

Pour l'ampliroll, cette consommation est de 3 litres par tonne si le transport est effectué jusqu'à la décharge et 1,6 litres par tonne si le transport est effectué jusqu'à l'usine de traitement. En tenant compte de la proportion de déchets collectée avec chaque système de transport, soit 37,7 % pour les amplirolls et 62,3 % pour les bennes tasseuses, on pourrait avoir une consommation moyenne de carburant de 2,6 litres²³ (2,17 kg) par tonne de déchets transportés jusqu'à la décharge et 1,48 litres (1,24 kg) par tonne de déchets transportés jusqu'à l'usine de traitement.

23 2,6 litres = 0,377 x 3,01 litres + 0,623 x 2,383 litres.

Pour établir le bilan, il est important de connaître les facteurs d'émission de gaz en fonction du type de véhicule utilisé et la consommation de carburant. D'ores et déjà, il faut noter qu'il est très difficile d'obtenir des facteurs d'émission propres à chaque système de transport déterminé. Sur la base d'un modèle simplifié intégrant la vitesse de circulation du véhicule, l'âge, le système de maintenance et de combustion dans les moteurs, l'EPA (Environment Protection Agency), certains pays de l'OCDE ont déterminé des facteurs d'émission liés à chaque catégorie de véhicules dans les conditions de leur pays. Pour les pays en développement, aucune étude n'a été menée dans ce domaine. On utilisera dans la suite les facteurs d'émission donnés dans les pays du Nord pour les véhicules qui ont un système de contrôle non régulier et qui datent des années quatre-vingt.

Établissement du bilan matière énergie du système de traitement par compostage

On distingue ici le compostage artisanal tel que pratiqué sur le terrain du système de compostage industriel.

Profil des données utilisées pour l'établissement du bilan

Les données prises en compte ici sont le taux de matière fermentescible, l'eau et l'énergie nécessaire pour le broyage du compost. Dans le système artisanal de compostage, on fait plus recours à l'utilisation de la force humaine que mécanique. Cette énergie n'est pas comptabilisée.

La fraction des matières fermentescibles dans les déchets des 15 quartiers de Yaoundé se situe entre 85 et 94 % de la masse sèche des déchets bruts. Cette proportion reste stable tout au long de l'année. Donc pour 1 000 kg d'ordures ménagères, les quantités de refus de tri peuvent varier entre 60 et 150 kg, soit une moyenne de 105 kg par tonne de déchets bruts.

Pendant les essais menés à Yaoundé, il a fallu apporter environ 2,2 m³ d'eau pour un tas de 5 m³ de déchets en fermentation (environ 2 tonnes de matière organique), soit une moyenne de 1 100 kg d'eau par tonne de matière organique. Lorsqu'on ramène cette quantité d'eau aux quantités initiales de déchets (environ 2,2 tonnes d'OM brutes), la quantité d'eau apportée est de 1 000 kg/tonne de déchets bruts, soit environ 2,2 m³/tonne de matière sèche. Il faut rappeler que cette quantité d'eau est apportée uniquement pendant la saison sèche qui dure trois à quatre mois par an, car pendant la saison des pluies, il faut plutôt dans les conditions de Yaoundé lutter contre l'excès d'eau dans la masse de déchets. La quantité d'eau apportée est moins importante que celle utilisée dans les essais menés à Ouagadougou au Burkina Faso (2,7 m³/tonne de matière sèche) et à Cotonou

au Bénin (2,5 m³/tonne de matière sèche) [Wass *et al.*,1996], certainement à cause de l'humidité initiale des déchets plus élevée qu'à Yaoundé.

La quantité de compost finale est obtenue après le broyage, ainsi que les refus enregistrés à la fin du processus, sont mesurés à la fin du cycle (3 à 4 mois). Cette quantité, ramenée à la masse initiale des déchets, donne le rendement de compostage. Par ailleurs, les refus enregistrés après les opérations de broyage et de tamisage ont été aussi pesés. Les pertes d'eau lors du process sont obtenues par calcul à partir des paramètres mesurés.

Des essais de compostage sans broyage ont été également effectués. Dans ce cas, la taille de la maille du tamis étant plus importante, les coques d'arachide et de pistache passent à travers les tamis de 15 et 30 mm. Ce qui augmente la quantité de compost produit. Mais il faut signaler que la présence de ces matériaux dans le compost final fait perdre de la valeur à ce produit que les utilisateurs locaux comparent à la terre noire (sol végétal riche en humus de la zone de forêt). Ce type de compost ne trouve pas de débouché dans le contexte de Yaoundé et même dans les cinq autres villes du Cameroun où l'expérience est actuellement menée.

En ce qui concerne la consommation d'énergie, la mécanisation de ce procédé est limitée uniquement au broyage du compost final et au transport de celui-ci jusqu'au magasin de stockage. Cette dernière étape n'existerait pas si les magasins étaient situés sur le site de traitement des déchets.

En ce qui concerne le broyage, les mesures effectuées au cours des essais donnent une consommation moyenne du broyeur de 1 litre d'essence par tonne de compost fini. En tenant compte du rendement de compostage qui est d'environ 33 %, on obtient par conséquent une consommation de 0,33 litres d'essence, soit 247 g par tonne de déchets traités.

Pour le transport de compost fini jusqu'au magasin de stockage situé en moyenne à 8 km des sites de production, on a utilisé des camionnettes pouvant transporter jusqu'à une tonne. La consommation de carburant pour les sources mobiles comme les véhicules dépend :

- De la classe de transport ;
- Des conditions de conduite ;
- Du type de carburant qui est utilisé par le véhicule ;
- Du système de contrôle des émissions du véhicule (existence d'un pot catalytique par exemple) ;
- Du système de maintenance du véhicule ;
- De l'âge du véhicule.

Pour les véhicules fabriqués vers les années quatre-vingt et fonctionnant à l'essence, la consommation moyenne est de 5,1 km/litre [Giec, 1996] ou 0,196 litres/km (annexe n° 10). Donc sur la distance de 16 km parcourue en moyenne pour transporter une tonne de compost, le véhicule a

consommé environ 3,13 litres de carburant (essence), soit une moyenne de 1,05 litres (787,5 g) par tonne de déchets traités.

Profil des données utilisées pour l'élaboration du bilan matière énergie du compostage industriel

À défaut d'avoir des données sur les installations africaines, pour établir les bilans matières énergies du système de compostage industriel, on s'appuiera sur les données de la littérature, tout en gardant à l'esprit que le bilan matière énergie d'une usine de compostage dépend notamment du taux de matière organique fermentescible contenue dans les déchets initiaux, du type de la chaîne de traitement et du choix de la granulométrie du compost final.

Dans tous les cas, le bilan des usines de compostage installées dans les villes européennes donne essentiellement trois grands groupes de sous-produits [Brula *et al.*, 1995] :

- le compost qui représente 25 à 55 % de la masse entrante ;
- les pertes (CO_2 , H_2O) qui représentent 8 à 25 % de la masse entrante ;
- les refus de tri, de criblage qui représentent 40 à 65 % de la masse entrante.

Consommation des matières

Pour bien identifier les données utiles à la suite du processus, il est nécessaire d'identifier au préalable les postes d'entrée et de sortie de matière dans la chaîne de traitement à considérer.

Sortie de matière au niveau de la chaîne de tri manuel : ici on doit récupérer toutes les composantes indésirables pour le compost. Pour effectuer le bilan matière, on a considéré que l'efficacité du tri manuel est de 90 % pour les composants de plus de 20 mm de diamètre et 0 % pour les éléments fins (moins de 20 mm de diamètre)²⁴. Il faut rappeler que les ordures ménagères de Yaoundé contiennent :

- 14 % de refus grossier (taille supérieure à 20 mm) hormis le papier-carton ;
- 21 % de fines (éléments fins de taille inférieure à 20 mm)²⁵, ces éléments fins contiennent environ 60 % de matière organique (coques d'arachide, de pistache, des épiluchures de tubercules (pommes de

24 Les ordures de Yaoundé étant composées de 14 % de matières non fermentescibles de taille supérieure à 20 mm, la fraction de refus de tri sera alors de $0,9 \times 140 = 126$ kg. Par contre, la quantité de refus de deuxième tri est obtenue en prenant en compte les 10 % de déchet ayant échappé au premier tri, soit $0,1 \times 140 = 14$ kg, et les refus fins qui ont échappé au premier tri, soit $0,6 \times 0,2$ (fraction non fermentescible) $\times 210 = 25,2$ kg. La quantité de ces refus est alors de 39 kg.

25 En saison des pluies où l'humidité des déchets est voisine de 65 %, ces éléments fins sont entièrement liés à la matière organique, on enregistre moins de 5 % dans les ordures ménagères.

terre, macabo, etc.)), les autres éléments sont des métaux (capsules diverses), verre et plastique et la poussière qui représente environ 20 % du poids de cette fraction. Il ne resterait que 20 % de cette fraction qui ne pourraient pas être triés;

- 65 % de matière organique biodégradable de taille supérieure à 20 mm, y compris les papiers et les cartons;
- Compte tenu de l'hypothèse de départ, on pourra alors récupérer environ 13 % de la masse initiale des déchets à cette étape de traitement.

À cette étape, l'énergie pourra être consommée par les transporteurs à bande et la pelle mécanique qui sera chargée de remplir la trémie d'alimentation des convoyeurs.

Sortie ou entrée de matière sur les aires de fermentation : à la sortie de la chaîne de tri, les déchets sont repris soit par transporteur à bande soit par pelle mécanique jusqu'aux aires de fermentation. À ce niveau, la formation des andains se fait par un chargeur mécanique de même catégorie que celui qui alimente la trémie de la chaîne de tri. Un retourneur d'andain assure le retournement des tas en fermentation.

À cette étape, de l'eau est utilisée pour arroser les tas en fermentation, et parallèlement une quantité non négligeable de cette eau est évaporée ou utilisée par les micro-organismes pour assurer la biodégradation de la matière organique. Par unité de masse, on considérera que la quantité d'eau à fournir est égale à celle utilisée lors des essais de compostage artisanal. Il faut rappeler que cette quantité (1 000 kg/tonne d'OM) n'est pas très éloignée de celle qui a été utilisée dans l'usine de compostage de Medemblik aux Pays-Bas, soit 800 kg par tonne d'ordures ménagères brutes [Kowald *et al.*, 1989].

Entrée et sortie de matière sur les aires d'affinage : à cette étape, on utilise le crible mobile pour améliorer le tri des éléments n'ayant pas encore été complètement dégradés ou des éléments indésirables qui ont échappé au tri primaire, et le broyeur pour réduire la granulométrie du compost final. L'utilisation d'un broyeur à marteau comme ce sera le cas ici pourra améliorer davantage le rendement de compostage, car certains éléments qui ne pouvaient pas être broyés par l'émietteur utilisé dans les essais à petite échelle pourront l'être avec un broyeur à marteau. La granulométrie de compost retenue est de 10 mm.

Il y a ici une consommation d'énergie par le broyeur et le crible et des sorties de matière que sont :

- Le compost : on suppose qu'avec l'utilisation de ces équipements on pourra atteindre un rendement final de 40 % (au lieu de 34 % obtenu dans les essais à petite échelle), soit 400 kg de compost fin par tonne d'ordures ménagères brutes.

- Les refus de criblage : comme dans le cas des essais de compostage artisanal, ils seront composés de matières organiques difficilement biodégradables (bois, coques, feuilles, etc.), qui seront réutilisées pour la formation de nouveaux tas, et de matériaux non biodégradables ayant échappé au premier tri, qui seront évacués à la décharge. Cette dernière catégorie devrait être représentée par les 10 % de refus grossiers ayant échappé au tri primaire et par des refus fins qu'on n'a pas pu séparer lors du premier tri.

Les données sur la consommation d'énergie

La consommation d'énergie est très variable et dépend aussi de la chaîne de traitement et de la puissance des installations. Aucune des références bibliographiques consultées ne donne le bilan énergie d'une usine de compostage. Les quelques données obtenues sont très parcellaires. On peut citer à cet effet Mustin (1987) qui donne un ordre de grandeur de la consommation d'énergie d'une usine de compostage avec fermentation accélérée. Cette consommation énergétique est supérieure à 100 kWh par tonne de matière sèche. Ce qui veut dire que, dans les conditions de Yaoundé, le traitement par compostage accéléré d'une tonne d'ordures ménagères consommerait au minimum 50 kWh²⁶ par tonne d'ordures ménagères brutes.

Cette évaluation est d'autant plus complexe que la consommation d'énergie pour certains équipements de grande puissance comme le broyeur dépend de la granulométrie finale du déchet qu'on veut atteindre (figure n° 21).

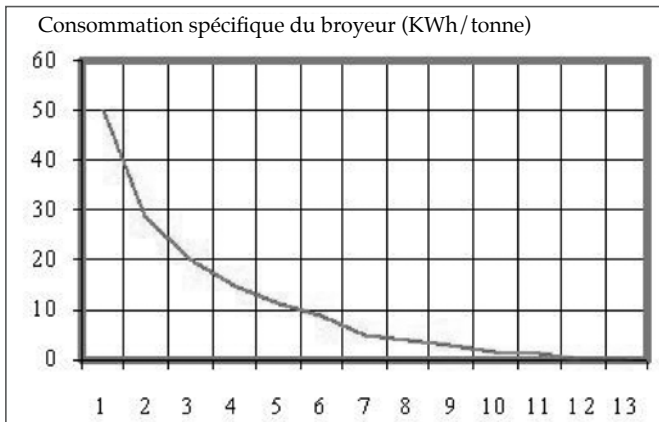


Figure 21 : Consommation d'énergie du broyeur en fonction de la taille du produit broyé.

D'après Diaz, Trezek et Savage (1981) cité par Mustin (1987)

26 50 kWh = 100 kWh * 50 % de matière sèche.

Plus la taille finale des particules broyées est faible, plus la consommation d'énergie est élevée.

Compte tenu des difficultés ci-dessus, pour évaluer les quantités d'énergies utilisées dans une usine de compostage, on est parti de la consommation finale d'énergie dans une usine de compostage pour arriver à la consommation par équipement. Les mesures effectuées dans quelques usines de compostage et de production de biogaz à partir d'ordures ménagères aux États-Unis donnent une consommation d'énergie électrique de 33 kWh/tonne de déchets pour le compostage et 132 kWh/tonne de déchets pour la méthanisation (tableau n° 40).

Tableau 40 : Consommation d'énergie électrique dans les installations industrielles de compostage et de méthanisation des ordures ménagères

[Raggi, 1994]

Étapes du process	Usine de compostage	Usine de méthanisation	Unité
Prétraitement	16	11	kWh/tonne de déchets
Traitement (aérobie ou anaérobie)	10	60	kWh/tonne de déchets
Post-traitement	6	6	kWh/tonne de déchets
Divers	1	1	kWh/tonne de déchets
Épuration de biogaz	0	54	kWh/tonne de déchets
Total	33	132	kWh/tonne de déchets
Production de biogaz	0	4,70	GJ/tonne de déchets
Vente d'énergie	- 1,98	5,45	\$/tonne de déchets

À partir des dépenses d'énergie des usines de compostage d'ordures ménagères aux États-Unis fournies par P. Raggi (1994) (soit 0,07 \$/kWh d'électricité et 0,95\$/gallon²⁷ de carburant), on a établi les données ci-dessous sur la consommation réelle d'énergie électrique et de consommation de gazole des engins de génie civil utilisés dans les usines de compostage (tableau n° 41).

²⁷ 1 gallon américain = 3,78 litres.

Tableau 41 : Consommation d'énergie pour trois usines de compostage aux États-Unis

(les données de base sont tirées de P. Raggi (1994))

Capacité de traitement	50 t/jour	200 t/jour	400 t/j
Dépenses annuelles d'électricité (\$US)	33 000	70 000	120 000
Consommation annuelle d'électricité (kWh)	471 429	1 000 000	1 714 286
Dépenses annuelles de carburant (\$US)	34 000	90 000	145 000
Consommation annuelle de carburant (litres)	135 284	358 105	576 947
Quantité de déchets traités (tonne/an)	15 000	60 000	120 000
Consommation d'électricité (kWh/tonne de déchets)	31,4	16,7	14,3
Consommation de gazole (litre/tonne de déchets)	9,07	6,05	4,8

En comparant les données des tableaux n° 40 et 41, on se rend compte que les consommations indiquées dans le tableau n° 40 sont celles d'une usine dont la capacité de traitement est inférieure à 100 tonnes d'ordures ménagères par jour.

Pour établir le bilan on partira des données des tableaux n° 40 et 41 en apportant les adaptations suivantes compte tenu du contexte de travail :

- l'usine de compostage à installer aura une capacité minimale de 200 tonnes d'ordures ménagères par jour en deux cycles de 8 heures ;
- l'étape de traitement se fait en fermentation lente, donc seul le retourneur d'andain doit consommer de l'énergie électrique pendant cette phase. On considère que la consommation d'énergie sera alors la moitié de celle qui est indiquée dans le tableau n° 41 ;
- dans le schéma simplifié retenu, la phase de prétraitement utilise moins d'équipement, car le tri est manuel. On suppose alors que la consommation d'énergie électrique est de moitié par rapport à la chaîne standard. La consommation d'énergie des deux systèmes proposés s'établit de la manière suivante (tableau n° 42) :

Tableau 42 : Consommation d'énergie pour deux types d'usine de compostage proposés

Étape	Type d'installation	Unité de compostage standard (Gondard)		Unité de compostage simplifiée	
		Électricité	Gazole	Électricité	Gazole
Prétraitement		8,1 kWh/t	2 litres/tonne	4,1 kWh/t	2 litres/t
Traitement aérobic		5,1 kWh/t	2 litres/tonne	2,6 kWh/t	2 litres/t
Post-traitement		3,1 kWh/t	2,05 litres/tonne	3,1 kWh/t	2,05 litres/t
Divers		1 kWh/t	0	1 kWh/t	0
Total		17,3 kWh/t	6,05 litres/t	10,8 kWh/t	6,05 litres/t

Profil des données à utiliser pour l'établissement du bilan matière énergie de la chaîne de traitement par méthanisation utilisant le procédé « Valorga »

Le tableau n° 43 présente les différentes fractions de matière qu'on pourra récupérer à chaque niveau de la chaîne dans le cas de l'usine d'Amiens et d'une usine utilisant un process simplifié de même type, installée à Yaoundé.

Tableau 43 : Différentes entrées et sorties de matières dans une usine de méthanisation utilisant le procédé Valorga

Composant	Amiens (efficacité 85 % de MO)	Yaoundé avec tri mécanique (efficacité 85 % de MO) ²⁸	Yaoundé avec tri manuel (efficacité 100 % de MO) ²⁹	Tilburg (tri à domicile)
Métaux ferreux	2,1 %	2,6 %	2,6 %	0
VCC	10,3 %	9,8 %	6,2 %	0
RC1	16,3 %	9,6 %	11,1 %	0
RC2	16,3 %	11,1 %	-	0
Biogaz	15 %	15,0 %	17,0 %	14,1 %
Condensat	0,4 %	0,4 %	0,4 %	0,7 %
Jus excédentaire	-	-	-	10,2 %
Boues	20 %	21,5 %	25,0 %	-
Compost				78,3 %
Pressat moins RC2	29,5 %	34,1 %	41,5 %	0
Total	109,9 %	104,1 %	103,8 %	103,3 %

En réalité, dans le cas de Yaoundé, les refus combustibles tout comme les inertes seront mis en décharge, car il n'y a pas de possibilité localement de valoriser la chaleur, toutes les conditions nécessaires n'étant pas réunies. Dans le bilan final, ils seront tous considérés comme refus de process. Quant à la quantité d'eau nécessaire, on tiendra compte de l'humidité initiale de la matière organique qui est voisine de 60 % à Yaoundé, la quantité d'eau à apporter permettra d'obtenir une teneur finale en matière sèche voisine de 25 à 30 % recommandée pour les substrats solides à méthaniser [Bonhomme, 1988]. Les pourcentages exprimés dans le tableau n° 43 sont rapportés à la masse des déchets introduits. C'est pour cela que le total donne plus de 100 %, la différence pouvant se justifier par la quantité d'eau qui est apportée.

Sur la base du bilan matière de l'usine de méthanisation de la ville d'Amiens, effectué pour 17 530 tonnes de déchets traités (période de janvier à avril 1994) [Brula et al., 1995], les entrées et sorties potentielles du flux matière seront simulées. Cette simulation est faite sur la base de la composition des déchets de Yaoundé et les résultats sont présentés dans le tableau n° 44.

Tableau 44 : Flux d'entrée et sortie de matières dans l'usine de méthanisation d'Amiens et simulation pour une unité industrielle installée à Yaoundé

Flux de matière	Usine d'Amiens		Unité de Yaoundé	
	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie
Eau de process (kg)	99	0	38	0
Ordures ménagères (kg)	1 000	0	1 000	0
Refus (kg)	0	429	0	173
Métaux ferreux (kg)	0	21	0	26
Pressat pour compostage(kg)	0	295	0	415
Boue compostable (kg)	0	200	0	250
Biogaz (kg)	0	150	0	170
Condensat	0	4	0	4
Total	1 099	1 099	1 038	1 038

28 Nous avons supposé que 15 % de la matière organique totale passe dans les VCC (30 %), les RC1 et RC2 (70 %). En plus, les 30 % d'éléments fins qui ne sont pas fermentescibles sont comptabilisés dans les RC2.

29 Nous avons supposé que 100 % de la matière organique de plus de 20 mm sont récupérés par le tri manuel, ce qui améliore la qualité des déchets qui passent dans les réacteurs et aussi le rendement.

Le devenir de chaque sous-produit issu de ce procédé dépend de sa nature et de sa composition chimique. Si les métaux ferreux de petites dimensions retrouvés dans les ordures ménagères trouvent facilement des débouchés à Amiens, ce n'est pas le cas pour Yaoundé, du moins pour l'instant. Donc pour le cas de Yaoundé, et en dehors des pressats et boues qui seront compostés, les autres-sous produits vont être mis en décharge. Le devenir de ces sous-produits en décharge dépend encore une fois de leur composition chimique.

Données énergétiques

Tout comme dans le système de compostage industriel, les postes de consommation d'énergie sont :

- Les systèmes de prétraitement : dans le cas du procédé Valorga, les systèmes de tri mécaniques, de transport interne des déchets et de réduction de la granulométrie utilisent uniquement de l'énergie électrique. La consommation d'énergie à cette phase est d'environ 11 kWh/tonne de déchets bruts pour une unité de capacité voisine de 50 à 100 tonnes d'ordures par jour.

- Le système de digestion anaérobie : dans cette partie, les postes de consommation d'énergie sont le malaxeur, la presse, la pompe d'introduction de matière, d'eau et de re-circulation de biogaz dans les cuves, la centrifugeuse et le tamis. Une seule bande transporteuse est utilisée dans cette étape. P. Raggi (1994) donne la consommation d'énergie de 60 kWh/tonne de déchets bruts. Par ailleurs, B. de La Farge (1995) indique que la consommation d'énergie pour le brassage de la masse dans le réacteur varie entre 1 et 5 kWh pour 100 kWh de biogaz produit. En d'autres termes, pour le cas de Yaoundé où l'on produirait entre 150 et 170 kg de biogaz par tonne de déchets bruts (1 260 à 1 430 kWh), on aura une autoconsommation d'énergie d'environ 35 kWh/tonne de déchets traitée, ce qui représente plus de la moitié de la consommation annoncée par P. Raggi (1994). Cette valeur peut être appliquée dans le contexte considéré.

- La phase de post-traitement de la boue et du pressat est identique à l'étape de compostage et d'affinage de compost décrite dans le procédé de compostage industriel. Il y a deux types d'énergies qui sont consommées à cette étape : l'énergie électrique et le gazole consommé par les engins de manutention (chargeurs). La consommation à cette étape est de 3 kWh/tonne de déchets et 2,05 litres de diesel par tonne de déchets (tableau n° 40).

- Le système d'utilisation du biogaz : l'utilisation du biogaz pour la production de chaleur est peut être envisagé dans certaines villes, mais il n'est pas envisageable pour le cas de Yaoundé. C'est la valorisation

en cogénération de chaleur et d'électricité (production d'électricité et d'eau chaude sanitaire pour les besoins de l'usine) qui est envisagée. Le rendement électrique des groupes électrogènes à biogaz varie entre 17 et 30 %, avec une moyenne de 25 % pour les groupes Totem avec le maximum de charge de fonctionnement [De La Farge, 1995].

Profil des données utilisées pour l'établissement de bilan matière énergie de la mise en décharge avec ou sans récupération du biogaz

La mise en décharge est l'une des étapes communes aux quatre systèmes de gestion des déchets qui sont analysés. Les deux composantes principales issues de la décharge sont le biogaz et les lixiviats.

La production de biogaz sera calculée à partir de la composition des déchets de Yaoundé en utilisant le modèle théorique proposé par l'IPCC. En ce qui concerne la production du lixiviat, le bilan hydrique de la décharge sera fait en utilisant les données pluviales de Yaoundé.

Pour le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC), la production du biogaz de décharge est fonction de la quantité de déchets entreposés, du mode de mise en décharge, de la fraction du carbone biodégradable contenu dans les déchets, de la quantité de carbone réellement dégradé. Sur la base de tous ces paramètres, le GIEC propose pour l'estimation de la production de méthane d'une décharge la formule suivante :

$$Q_{\text{ch}_4} = \text{Quantité de déchets produite} \times \text{Fraction de déchets mis en décharge} \times \text{Facteur de correction} \times \text{Fraction de carbone biodégradable du déchet} \times \text{Fraction de carbone organique biodégradable réellement dégradée} \times \text{Pourcentage de méthane dans le biogaz} \times \text{facteur de conversion.} \quad (12)$$

La production annuelle des déchets municipaux dans la ville est obtenue en multipliant le taux de production spécifique par le nombre d'habitants. Dans les villes des pays en développement, la production spécifique des déchets varie entre 0,6 et 1 kg de déchets par jour et par habitant.

La fraction de déchets mis en décharge : ce paramètre dépend du système de traitement qui est pris en compte. Ainsi, avec les systèmes 1 et 2 (collecte traditionnelle et mise en décharge des déchets avec ou sans récupération de biogaz), on peut atteindre un taux de collecte de 75 %. La fraction de déchets mis en décharge aménagée serait alors de 75 % lorsqu'un système de précollecte par des tiers rémunérés est mis en place

dans les quartiers spontanés. Par contre, si le système actuel d'exploitation est maintenu, la fraction des déchets mise en décharge serait de 60 % pour la décharge contrôlée. Mais les décharges non aménagées continueront à recevoir environ 25 % de la production totale des déchets de la ville.

Les facteurs de correction de méthane : ce facteur permet de pondérer le taux de production de biogaz en fonction des conditions de mise en décharge des déchets. Les facteurs par défaut proposés par le GIEC sont les suivants :

- 1 pour les décharges contrôlées ;
- 0,8 pour les décharges non aménagées dont la hauteur de déchets est supérieure à 5 m ;
- 0,4 pour les décharges sauvages de moins de 5 m de hauteur de déchets.

La décharge de Nkolfooulou dans laquelle les déchets vont être éliminés étant une décharge contrôlée, le facteur de correction est de 1.

Fraction de carbone organique biodégradable (COB) : Cette fraction dépend de la composition des déchets. La méthodologie du GIEC (1996) propose la formule suivante pour estimer la fraction de carbone biodégradable à partir de la composition sur sec des déchets :

$$\text{Fraction de COB} = 0,4 \times [\text{fraction (papier/carton + tissus)}] + 0,17 \times \text{Fraction (déchets de jardin)} + 0,15 \times \text{Fraction (déchets de cuisine)} + 0,3 \times \text{Fraction (bois et copeaux)}. \quad (13)$$

Dans le cas de Yaoundé, les déchets de jardin n'ont pas été séparés des déchets de cuisine. Mais la proportion de déchets de jardin est faible et existe uniquement dans les quartiers de haut standing. En appliquant la relation (16) à la composition des ordures ménagères de Yaoundé on obtient :

$$\text{Fraction de COB} = 0,4 \times 0,051 + 0,17 \times 0 + 0,15 \times 0,745 + 0,3 \times 0,015 = 0,137$$

Fraction de carbone organique biodégradable qui se dégrade réellement : c'est la fraction de carbone organique (% de COB) susceptible d'être transformée en biogaz après la mise en décharge. Tabasaran (1976) propose la formule empirique suivante pour estimer cette quantité de carbone :

$$\text{Fraction de carbone organique biodégradable effectivement dégradé} = 0,014 \times T + 0,28 \quad (14)$$

où T est la température du milieu exprimée en degrés Celcius.

Selon Bingemer et Crutzen (1987), la température dans la zone anaérobie de la décharge reste constante et est égale à 35°C. Ainsi à partir de la relation (14) on obtient une valeur de 0,77. Qui est le facteur par défaut proposé par le GIEC.

En appliquant la relation (15) aux valeurs de calcul précédent, on obtient la production de méthane de 70 kg/tonne³⁰ d'ordures ménagères brutes mises en décharge (environ 101 m³) dans les conditions de Yaoundé. Par ailleurs, les mesures effectuées sur les décharges d'ordures ménagères en Grande-Bretagne par l'ESTU (Energy Technology Support Unit) citées par Solagro (1993) donnent une valeur moyenne de biogaz émis de 222 m³ par tonne d'ordures ménagères à 50 % de méthane (soit environ 111 m³ de méthane (76,6 kg/tonne d'ordures ménagères entrantes)), cette valeur est plus proche des résultats des calculs. Pour la suite du travail, le taux de production de méthane par tonne de déchets est de 70 kg. Si l'on considère un taux de récupération réel de 70 %, qui est le potentiel maximal de biogaz de décharge pouvant être récupéré [CLIP, 1996], le potentiel de méthane récupérable serait de 49 kg/tonne (73 m³ de méthane) de déchets bruts mis en décharge, soit environ 146 Nm³ de biogaz par tonne d'ordures ménagères brutes.

La méthode de calcul utilisée suppose que la proportion de méthane est de 50 % dans le biogaz produit par les déchets. Cette proportion est vraisemblable si l'on se réfère à la composition du biogaz de décharge donnée dans la bibliographie (tableau n° 45).

³⁰ Production spécifique = 18 480/(production annuelle x fraction mise en décharge), soit 18 480/(438 000 x 0,6).

Tableau 45 : Composition de biogaz de décharge et de gaz de combustion de biogaz [Apostol, 1998; Brula et al., 1995]

Éléments	Avant la combustion			Après la combustion	
	Décharge de Flévy	Biblio générale (moyenne)	Décharges Rhône Alpes	Décharge de Flévy	Décharges Rhône Alpes
CH ₄ (% volume)	50	40	70	0,05	///
CO ₂ (% volume)	45	35	22,3	15	///
Oxygène (% volume)	///	5	1,6	///	///
Azote (%volume)	///	20	6,1	///	///
CO (mg/Nm ³)	22,5	///	///	125	///
SO ₂ (mg/Nm ³)	14,3	///	///	71,5	1,328
H ₂ S, autres organo-sulfurés (mg/Nm ³)	273,2	151,8	1.987	37.9	///
NO ₂ (mg/Nm ³)	0	///	///	41	///
HC halogénés (Cl, F) (mg/Nm ³)	250	40	328	10	35,1
Hydrocarbures non méthaniques	///	2 à 5 g/Nm ³	0,23 %	///	///
RSH exprimé en méthyle mercaptan)	///	///	6,26 mg / m ³		

La production de lixiviats est estimée au quart de la quantité d'eau de pluie qui tombe sur le site de la décharge [Ngnikam, 2000]. Dans le cas de Yaoundé par exemple, où il tombe en moyenne 1 600 mm de pluie par an, la quantité de lixiviats qu'on peut recueillir par unité de surface est de 0,4 m³. La quantité de lixiviats par tonne de déchets mis en décharge dépend de la hauteur des déchets en décharge et du taux de compactage.

Les plus grands postes de consommation d'énergie ici sont les engins qui sont utilisés pour l'exploitation de la décharge. Pour certains types d'engin comme par exemple les chargeurs sur pneus, la consommation moyenne est de 20 litres de carburant par heure (pour un engin âgé de 10 ans en moyenne). Pour les autres engins plus puissants, on a majoré la consommation du carburant de 25 %. Sur cette base, la consommation de carburant s'établit comme suit :

- Bouteur compacteur à pied de mouton : 25 litres/heure pour 8 heures par jour, soit 200 litres/j;
- Compacteur à pied de mouton : *idem* bouteur, soit 200 litres/jour;

- Chargeur sur pneus : 20 litres/heure, pour trois heures par jour, soit 60 litres/jour ;
- Bulldozer : 30 litres/heure à raison de 12 heures par semaine, soit environ 72 litres/jour.

La consommation totale de carburant est de 532 litres par jour, c'est-à-dire 446,9 kg pour 720 tonnes de déchets mis en décharge, soit 0,6 kg par tonne de déchets.

Pour tenir compte de la consommation due à la mise en place de réseau de collecte de biogaz et de lixiviats, cette consommation de base sera majorée de 30 %, la consommation finale du carburant serait alors de 0,806 kg/tonne de déchets. La consommation des huiles représente environ 10 % de carburant, soit en moyenne 0,08 kg/tonne de déchets.

L'énergie électrique est aussi utilisée dans les bâtiments d'exploitation de la décharge et par la pompe d'aspiration du biogaz. L'OFEFP (1998) a déterminé la valeur moyenne de consommation d'électricité pour l'exploitation des locaux à 0,15 kWh/tonne de déchets et 1,35 kWh/tonne de déchets pour le fonctionnement de la pompe à gaz. Les mêmes ratios sont retenus dans les calculs (tableau n° 46).

Tableau 46 : Consommation d'énergie pour la mise en décharge avec récupération de biogaz ([OFEFP, 1998] pour les données de la Suisse)

Poste de consommation	Yaoundé (OM)	Suisse (OM)	Type de combustibles
Mise en place des déchets, compactage, pose de système de drainage et récupération de biogaz	0,806 kg/t	1,09 kg/t	Gazole pour les engins de génie civil
Exploitation de la pompe à gaz	1,35 kWh/t	1,35 kWh/t	Électricité du réseau
Huile EL pour chauffage	0	0,038	Huile lourde
Électricité pour l'exploitation des locaux	0,15 kWh/t	0,15 kWh/t	Électricité basse tension
Huiles pour les engins	0,08 kg/t	///	Huile moteur

En absence d'une étude de faisabilité pour l'utilisation de biogaz comme source d'énergie pour des usines situées à côté du site, on retiendra l'utilisation du gaz pour la production d'électricité qui serait utilisée en partie pour satisfaire les besoins de fonctionnement de l'unité et le surplus injecté dans le réseau et pour la production de chaleur.

Cette forme d'utilisation nécessite la mise en place d'un groupe électrogène fonctionnant au biogaz (c'est-à-dire qui doit consommer le biogaz et produire de l'électricité et de la chaleur). Le rendement électrique d'une telle installation varie entre 25 et 30 %. Pour les calculs, le rendement retenu est de 25 %. Ainsi, à partir d'une tonne d'ordures ménagères qui produit 70 kg de méthane ($PCI = 9,42 \text{ kWh/m}^3$ à 15°C et à la pression atmosphérique), on a une production d'énergie théorique de 955,6 kWh. Après utilisation dans le groupe électrogène, on peut s'attendre à une production d'électricité de 239 kWh.

Le taux de récupération de biogaz étant de 70 %, on aura une production d'énergie électrique de 170 kWh/tonne.

ANALYSE COMPARATIVE DES BILANS

Il s'agit ici de regrouper les différents bilans partiels qui ont été faits pour donner un aperçu général des différents systèmes étudiés. Le tableau n° 47 présente le bilan global.

Tableau 47 : Présentation des bilans matières et énergies des différents systèmes

	Composant	Système 1	Système 2	Système 3	Système 4
Entrées	Ordures ménagères (OM)	1 000	1 000	1 000	1 000
	Eau de pluie et de process (kg)	133,3	133,3	1 033,6	61,65
	Gazole (kg)	2,79	2,98	8,72	5,75
	Huiles (kg)	0,28	0,3	0,87	0,57
	Électricité (kWh)	0,15	1,5	10,8	74
Sorties	Rejet dans l'eau (lixiviats) (kg)	33,3	33,3	8,4	6
	Condensat (kg)	0	0	0	4
	Rejets dans l'air (kg)				
	- Vapeur d'eau	100	100	25,5	17,75
	- Gaz issu de combustion de gazole (kg)	9,12	9,81	28,5	18,9
	- Gaz issu de la fermentation des déchets	0	0	1 145	180,5
	- Biogaz (dont méthane)	280 (70)	231 (21)	0	119,1 (0)
	Rejet dans le sol				
	- Huiles de vidange (kg)	0,28	0,3	0,87	0,57
	- Déchets mis en décharge (kg)	1 000	1 000	252	203
Sous-produits					
- Énergie (kWh)	0	170	0	176	
- Compost (kg)	0	0	400	489	

Le système 1 dit « de référence » est celui qui est actuellement utilisé pour la gestion des déchets municipaux de Yaoundé. Pour effectuer ce bilan, seule une petite modification a été apportée à l'étape de précollecte, en instituant le système de précollecte par des tiers rémunérés dans les quartiers spontanés (quartiers peu accessibles) de la ville pour augmenter le taux de collecte de 60 % (qui est le taux maximum actuel) à 75 %.

Une comparaison des flux d'entrée des différents systèmes permet de mettre en évidence ceux qui sont les plus consommateurs d'énergie et de matière. La quantité d'énergie utilisée par les différents systèmes est d'autant plus importante lorsqu'on passe d'un système à l'autre. La consommation de gazole par exemple est équivalente dans les deux premiers systèmes (environ 3 kg/tonne d'ordures ménagères). Mais l'introduction d'une unité industrielle de compostage dans la chaîne actuelle de gestion des ordures ménagères fait tripler la consommation de gazole. Cette consommation est plus concentrée à l'étape de compostage. La consommation d'énergie électrique est aussi importante. On atteint une valeur de 10,8 kWh/tonne de déchets. Le quatrième système « collecte traditionnelle, méthanisation et mise en décharge » a une consommation électrique beaucoup plus élevée (74 kWh/tonne de déchets). La consommation de gazole est peu importante par rapport au système 3 « collecte traditionnelle, compostage et mise en décharge », mais elle représente presque le double de la consommation par rapport au système de référence.

Une analyse verticale de chaque système de gestion des déchets permet de situer l'importance de chaque étape dans la consommation d'énergie.

Ainsi pour le système 1, l'étape de collecte et de transport consomme environ 78 % de gazole (2,17 kg/tonne de déchets), contre seulement 22 % pour la mise en décharge (0,62 kg/tonne de déchets). La consommation d'énergie électrique est limitée ici uniquement pour l'exploitation du pont bascule et du local de gestion de la décharge, elle ne représente que 0,15 kWh/tonne de déchets.

Le système 2 présente presque le même profil de consommation d'énergie par étape, soit 2,17 kg/tonne pour la collecte et le transport et 0,81 kg/tonne de déchets bruts pour la mise en décharge, soit respectivement 73 et 27 % de la consommation totale de carburant dans ce système. La consommation d'énergie électrique est un peu plus importante ici à cause des opérations de dégazage et de valorisation énergétique du biogaz qui entraînent une surconsommation de 1,35 kWh/tonne de déchets bruts, ce qui donne une consommation globale de 1,5 kWh d'électricité par tonne de déchets.

Dans le système 3, c'est l'étape de compostage qui consomme le plus d'énergie (gazole et électricité). En effet, pour une consommation totale de 8,7 kg de gazole par tonne de déchets, l'étape de compostage consomme à elle seule 5,1 kg (soit 58 % de la consommation totale), suivie du transport de compost avec 2,14 kg de gazole par tonne de déchets (24,5 % de la consommation) et la collecte et le transport de déchets bruts (1,24 kg par tonne, 14,2 % de la consommation). La consommation d'énergie à l'étape de mise en décharge des refus reste marginale avec 0,15 kg de gazole par

tonne de déchets. La consommation d'électricité de ce système est concentrée uniquement à l'étape de compostage. Dans le cas où l'unité de compostage serait installée sur la décharge, on passerait d'une consommation de gazole de 8,7 à 9,65 kg/tonne de déchets, due à l'augmentation des distances de transport.

Dans le système 4, au cas où l'unité de traitement serait installée en ville, c'est l'étape de transport du compost qui consomme près de 45 % de gazole (2,61 kg/tonne de déchets), suivie de l'étape de compostage du digestat avec (1,72 kg/tonne de déchets, 30 % de la consommation) et de la collecte et du transport des déchets bruts. Mais dans le cas où l'unité de traitement serait installée sur la décharge, l'étape de collecte et de transport des déchets sur l'échelle de consommation vient juste après la phase de méthanisation des substrats avec 2,17 kg de gazole/tonne de déchets. Dans ce deuxième cas, la consommation totale du système passe de 5,75 à 6,7 kg/tonne de déchets. Ce système consomme plus d'énergie électrique que les autres et l'étape de méthanisation consomme à elle seule 96 % de cette énergie. Le reste étant utilisé dans l'unité de séchage biologique (compostage des digestats).

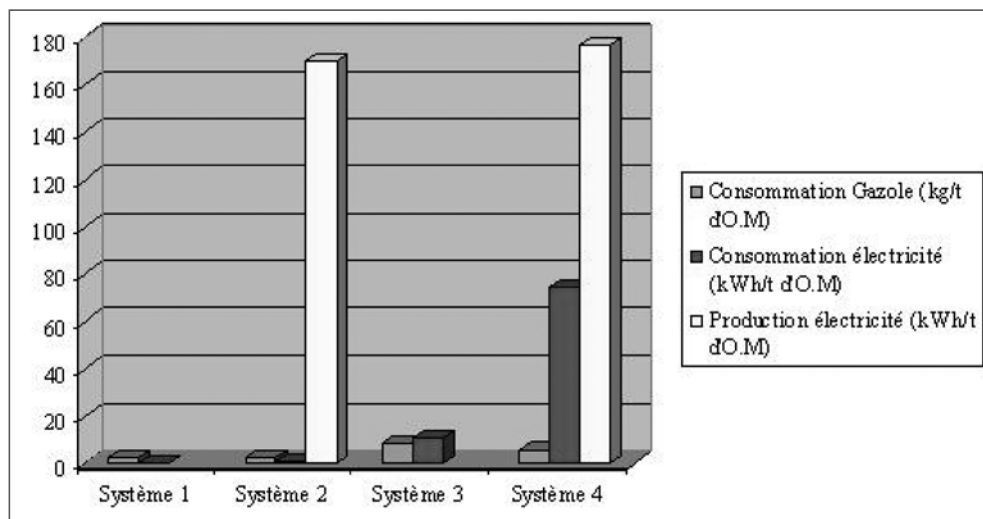


Figure 22 : Comparaison de la consommation et de la production d'énergie des différents systèmes

On peut conclure à l'issue de cet inventaire concernant la consommation énergétique que le système 3 représente trois fois celui du système de référence. Contrairement à ce qu'on pouvait croire, c'est l'étape de com-

postage qui demande beaucoup plus de carburant pour le fonctionnement des engins de manutention. Même une mécanisation de la chaîne de tri n'affecte pas les quantités de carburant utilisées à cette étape de la chaîne.

La consommation d'énergie électrique est plus importante pour le système 4, suivi du système 3 avec une consommation respective de 74 et 10,8 kWh/tonne de déchets traités. Mais le système 4 produit environ 175 kWh électrique par tonne de déchets. Son bilan énergétique est positif contrairement aux systèmes 1 et 3. La mécanisation de la chaîne de tri modifie la consommation pour le compostage, car on passerait à ce moment à environ 17 kWh par tonne de déchets traités, par contre elle n'a aucune influence pour la méthanisation, car 96 % d'énergie électrique consommée ici se fait lors de l'étape de méthanisation. Le système 2 a un bilan énergétique très positif, car tandis que la consommation est limitée à 1,5 kWh par tonne de déchets traités, on produit environ 170 kWh électrique. L'électricité consommée à Yaoundé provenant des centrales hydroélectriques, les émissions gazeuses dues à cette consommation sont nulles.

Cet inventaire a permis de dégager les flux matières et énergies issus de chaque système. L'étape de classification et d'évaluation des impacts qui va suivre permettra de mesurer les différents impacts potentiels de ces polluants dans leurs différents milieux récepteurs.

ÉVALUATION DES IMPACTS DES REJETS DES DIFFÉRENTS SYSTÈMES

Il s'agit à cette étape d'analyser et d'évaluer les impacts sur les milieux récepteurs des différents rejets solides, liquides et gazeux inventoriés à l'étape ci-dessus. Pour cela, on va une fois de plus s'appuyer sur le protocole normatif de l'ACV pour faire d'abord une classification des impacts potentiels et ensuite procéder à une évaluation en utilisant les outils mathématiques disponibles.

Dans la première partie de ce chapitre, les différents flux matières et énergies sortant des systèmes doivent être regroupés en classe d'impact afin de faciliter leur caractérisation qui sera faite dans la deuxième partie.

Classification des flux issus de l'inventaire par classe d'impact

Les flux issus de l'inventaire seront classés par type d'impact auquel ils participent. En effet, cette méthode de classification prend en compte le phénomène de transfert de pollution, mais pour sa mise en œuvre, il faudrait éviter les redondances ou bien les oublis. Ainsi, pour chaque substance issue de l'inventaire, on va définir la catégorie d'impact à laquelle elle peut participer en s'appuyant sur les six classes d'impact définies par Rousseaux (1998) et les sous-classes qui sont liées (tableau n° 48).

Tableau 48 : Classification des flux matières et énergies des différents systèmes

N°	Classe d'impact	Sous-classe	Flux concernés
1	Épuisement des réserves naturelles		Consommation de produits pétroliers (gazole, huiles)
2	Effet de serre		Méthane, CO ₂ issus de la consommation de carburant, CO, etc.
3	Dégradation de la couche d'ozone		Aucun gaz généré par les systèmes
4	Toxicité et écotoxicité	Toxicité : homme, faune, flore, écosystème	Les différentes substances contenues dans le lixiviat, les huiles de vidange
		Acidification	Certains gaz émis lors de la combustion de carburant (SO ₂ , N ₂ O)
		Eutrophisation	Certaines substances contenues dans le lixiviat (NO, NO ₃ ⁻ , N, NH ₄ ⁺ , P, PO ₄ ³⁻)
5	Nuisances	Bruits	Mouvement des véhicules et des engins d'exploitation des décharges et des unités de traitement
		Odeur	Gaz malodorants émis lors de la mise en décharge
		Visuel	Rien à signaler
6	Altération physique des écosystèmes		Émissions des composés organiques volatils (COV), de poussière

Une seule substance peut entraîner plusieurs impacts suivant le milieu dans lequel elle est rejetée. Le lixiviat par exemple peut avoir un impact sur la toxicité et l'écotoxicité. Tandis que la combustion de carburant génère des gaz qui peuvent avoir des effets sur l'eutrophisation, l'acidification et l'effet de serre. Suivant la nature des substances rejetées par les systèmes qui sont étudiés, on n'a aucune substance pouvant porter atteinte de manière directe à la couche d'ozone. Cet impact n'est donc pas à prendre en compte dans l'analyse. Les impacts visuels et les odeurs, même s'ils existent, sont difficiles à évaluer car ils sont liés à chaque personne. Il n'en sera pas tenu compte dans l'analyse qui va être effectuée. La consommation de l'eau par les différents systèmes peut avoir une influence sur la désertification. Mais la ville de Yaoundé étant située dans la zone tropicale humide, cet impact est négligeable sur le plan local.

En définitive, en fonction de la spécificité des systèmes qui sont étudiés et du contexte local, on va prendre en compte, pour caractériser les impacts des quatre systèmes sur l'environnement, uniquement les trois classes d'impacts suivantes :

- L'épuisement des ressources naturelles ;
- L'effet de serre ;
- La toxicité et l'écotoxicité avec les trois sous-classes qui lui sont liées (la toxicité sur les hommes, la faune et la flore, l'acidification et l'eutrophisation).

En plus de ces trois groupes d'impact, on tiendra aussi compte de l'espace occupé en décharge par les déchets. Ainsi, plus la quantité de déchets mis en décharge est élevée, plus le système sera pénalisé.

Caractérisation des impacts

Il sera question ici de quantifier les contributions potentielles des différents flux des systèmes aux différentes classes d'impact retenues. Pour cela, on se limitera uniquement aux deux niveaux d'évaluation suivants :

Niveau 1 : évaluation du ou des impacts d'une substance (j) du sous-système (i) du cycle de vie étudié : cette évaluation est réalisée à partir d'indicateurs d'impact (I_{ij}) définis dans la deuxième partie de ce travail.

Niveau 2 : évaluation de la classe d'impact pour chaque sous-système i du cycle de vie étudié. Il s'agit d'agréger pour chaque classe d'impact les évaluations d'indicateurs d'impact obtenues pour chaque sous-système i.

Pour chaque impact retenu, les précisions sur les méthodes de calcul des indicateurs permettent de mieux comprendre les modèles mathématiques retenus pour le calcul des indicateurs dans les cas considérés.

L'épuisement des ressources naturelles

Cet impact est caractérisé par trois indicateurs que sont :

- la consommation de la matière ;
- l'état des réserves ;
- la renouvelabilité de la matière.

La consommation de la matière (M_i) par le sous-système (i) est évaluée à partir de la relation suivante :

$$M_i = \sum_j m'_{ij} \quad (15)$$

avec : M_i = quantité de matière consommée par le sous système (i)
 m'_{ij} = masse de la matière première j, consommée par le sous-système i

La contribution à l'épuisement des réserves naturelles (T_i) est donnée par la relation suivante :

$$T_i = \frac{\sum_j m'_{ij} x_1 / a_j}{\sum_j m'_{ij}} \quad (16)$$

avec : a_j = période d'abondance de la ressource naturelle j

La non-renouvelabilité des matières premières consommées (N_i) est donnée par la relation suivante :

$$N_i = \frac{\sum_j m'_{ij} x (1 - \frac{1}{t_j})}{\sum_j m'_{ij}} \quad (17)$$

avec t_j : temps relatif de renouvellement de la matière première j

Pour les systèmes étudiés, seul le pétrole contribue à l'épuisement des ressources naturelles, parce que l'énergie électrique utilisée par les systèmes fonctionnant à Yaoundé serait de source hydraulique, donc renouvelable.

La masse M_i est donnée par le bilan matière énergie de chaque système. Quant à la période d'abondance a_j et au temps relatif de renouvellement de la matière t_j , Finnveden (1994) propose les valeurs suivantes pour le pétrole :

$$a_{\text{pétrole}} = 40 \text{ ans et } t_{\text{pétrole}} = 10\,000 \text{ ans}$$

En utilisant ces paramètres dans les relations ci-dessus, on obtient la contribution à l'épuisement des réserves naturelles et à la non-renouvelabilité de la matière pour les différents systèmes étudiés (tableau n° 49).

Tableau 49 : Évaluation de la perte de matière première par les différents systèmes étudiés

Désignation	Système 1	Système 2	Système 3	Système 4
Quantité de pétrole utilisée (M'i en kg)	3,07	3,28	9,6	6,32
Contribution à l'épuisement des ressources naturelles (Ti en an)	0,025	0,025	0,025	0,025
Renouvelabilité de la matière (Ni)	1	1	1	1

Plus la consommation de matière première est importante, plus le système est pénalisé. Sur cette base on peut dire que les systèmes 1 et 2 sont plus éco-compatibles que les systèmes 3 et 4. Chaque système étudié contribue pour 2,5 % à l'épuisement des matières premières. On peut dire sur la base de cette classe d'impact que le système 3 avec une consommation de pétrole de 9,6 kg par tonne de déchets traité est le plus défavorable, suivi des systèmes 4, 2 et 1. Comme ce sont uniquement les produits pétroliers qui ont été pris en compte dans cette évaluation, l'indice de renouvelabilité de la matière est de 1 pour chaque système, car la matière prise en compte n'est pas renouvelable.

L'effet de serre

Les systèmes de traitement des déchets étudiés génèrent une quantité importante de gaz à effet de serre tels que : le gaz carbonique (CO₂), le méthane (CH₄), le peroxyde d'azote (N₂O). D'autres gaz produits lors du traitement des déchets agissent de façon indirecte sur l'effet de serre, ce sont : le monoxyde de carbone (CO), les hydrocarbures non méthaniques (HC), les oxydes d'azote (NO_x). Cet impact évalue l'apport des gaz produits par les systèmes sur l'équilibre radiatif naturel de la terre.

Pour évaluer la contribution d'une substance rejetée par le système à l'effet de serre, on utilisera les potentiels de réchauffement global définis par l'IPCC. La contribution à l'effet de serre d'une substance gazeuse (j), émise par le sous-système (i) est donnée par la relation :

$$I_i = M_i \times GWP_i \quad (18)$$

avec : I_i (kg équivalent CO₂) : Indicateur de la contribution à l'effet de serre du système i
 m_{ij} (kg) : masse de la substance gazeuse j à effet de serre émise par le système i

GWP_j (sans dimensions) : Global Warming Potential du gaz à effet de serre j

Seuls les effets sur le court terme (période de 20 ans) qui correspond à la durée moyenne d'évolution d'une tonne de déchets mise en décharge seront calculés. Le dernier rapport de l'IPCC donne les GWP pour divers gaz à effet de serre à effet direct ou indirect. Le tableau n° 50 présente ces potentiels pour les gaz émis lors du traitement ou de l'élimination des déchets ménagers pour les horizons temporels 20, 100 et 500 ans [IPCC, (1996)].

Tableau 50 : Potentiel de réchauffement global (PRG) des divers gaz à effet de serre (émis par les systèmes étudiés) par rapport au gaz carbonique pour des horizons temporels de 20, 100 et 500 ans et avec une incertitude de + 35)

Substances	Horizon 20 ans	Horizon 100 ans	Horizon 500 ans	Temps de séjour (années)
Gaz carbonique	1	1	1	120
Méthane (CH ₄)	62	21	7,5	14,5±2,5
Oxyde nitreux (N ₂ O)	290	320	180	120
Monoxyde de carbone (CO)	2	2	1	
Oxyde d'azote (NO _x)	150	40	14	
Hydrocarbures non méthaniques (NMVOC)	28	8	3	

Pour déterminer la contribution à l'effet de serre des différents systèmes étudiés, on va retenir l'horizon temporel de 20 ans. Ainsi, à partir des données du tableau n° 50 et de la relation (18), on peut calculer l'impact global d'effet de serre pour les différents systèmes étudiés. Les masses m_{ij} des gaz à effet de serre sont fournies par le bilan matière énergie de chaque système (tableau n° 51).

**Tableau 51 : Contribution à l'effet de serre
(kg équivalent CO₂ par unité fonctionnelle)
des différents systèmes étudiés**

Désignation	Système 1	Système 2	Système 3	Système 4
Gaz carbonique issu de la combustion de gazole	8,9	9,5	27,8	18,34
Méthane (CH ⁴)	4 340,0	1 305,0	0,12	2,85
Oxyde nitreux (N ² O)	0,06	0,07	0,2	0,13
Monoxyde de carbone (CO)	0,12	0,17	0,32	0,26
Oxyde d'azote (NO ^x)	17,9	20,0	61,5	40,6
Hydrocarbures non méthaniques (NMVOC)	0,6	0,68	1,31	1,09
Total	4 367,58	1 335,42	91,25	63,27

La mise en décharge sans récupération du méthane apparaît comme la solution la plus émettrice de gaz à effet de serre ; elle conduit à une émission de 4,4 tonnes équivalent gaz carbonique (tECO₂) par tonne de déchets traités. Les émissions de méthane non récupéré sont à l'origine de cette forte production. Avec la récupération de 70 % de méthane émis, on réduit les émissions nettes de gaz à effet de serre dues à la mise en décharge de 3 tECO₂, soit 68 % des émissions initiales.

La méthanisation en digesteur et le compostage permettent quasiment de supprimer les émissions de gaz à effet de serre si la totalité de la matière organique contenue dans les déchets est récupérée. La mise en place d'une chaîne de tri manuel avant la fermentation des déchets peut permettre d'atteindre cet objectif. Par contre, une installation avec tri mécanique, qui ne permet de récupérer que 85 % de la matière organique, conduirait à une production de gaz à effet de serre de 0,65 tECO₂ pour le compostage et 0,4 tECO₂ pour la méthanisation en réacteur par tonne de déchets traités, ce qui reste toujours très faible par rapport au système de référence.

Si le compost produit est utilisé pour l'amendement des terres agricoles, cela pourrait, dans les conditions de Yaoundé, permettre de réduire la déforestation. Ce qui contribuerait à l'augmentation du stock de carbone dans le sol et dans la biomasse sur pied. Ce paramètre ne sera pas retenu compte tenu des incertitudes sur les utilisations futures du compost et sur la rentabilité agricole de cet amendement.

En définitive, suivant ce critère, le système 1 (collecte traditionnelle et mise en décharge) serait le moins éco-compatible, suivi du système 2 (collecte traditionnelle et mise en décharge avec récupération de biogaz). Les

systèmes 3 et 4 sont plus éco-compatibles selon ce critère, parce qu'ils permettent d'annuler pratiquement les émissions de gaz à effet de serre.

Toxicité et écotoxicité

Les systèmes de gestion des déchets étudiés émettent des substances toxiques soit sur le sol, dans l'eau (lixiviats) ou dans l'air (poussières, SO_2 , NO_x , etc.). Pour l'évaluation de cet impact, on va prendre en compte les trois sous-classes que sont la toxicité et l'écotoxicité, l'acidification et l'eutrophisation.

Évaluation de l'impact toxique et écotoxique

Les huiles usagées à Yaoundé sont récupérées par les ménages, par les artisans pour le traitement du bois de charpente ou des bois de construction divers. Avec cette utilisation, on peut dire que l'impact toxique et écotoxique des huiles usagées est négligeable.

Les lixiviats sont rejetés sans aucun traitement dans le milieu naturel. Dans ces conditions, les risques les plus élevés sont à craindre sur les invertébrés aquatiques, les plantes aquatiques et les poissons. Quant à la toxicité humaine ou animale terrestre, les éléments présents dans les lixiviats, surtout les métaux lourds, peuvent être à l'origine de la contamination des animaux, suite à la consommation de l'eau polluée. Certains métaux bio-accumulateurs comme le mercure, l'arsenic, le plomb constituent un risque éventuel de contamination des herbivores qui peuplent les bassins versants des ruisseaux qui vont drainer les lixiviats de la décharge.

On utilisera dans ce document l'évaluation de l'impact toxique et écotoxique, une méthode à score [Rousseaux, 1993] dans la mesure où elle n'est pas compensatoire. La figure présente la méthode utilisée pour l'évaluation des scores d'impact écotoxique potentiel.

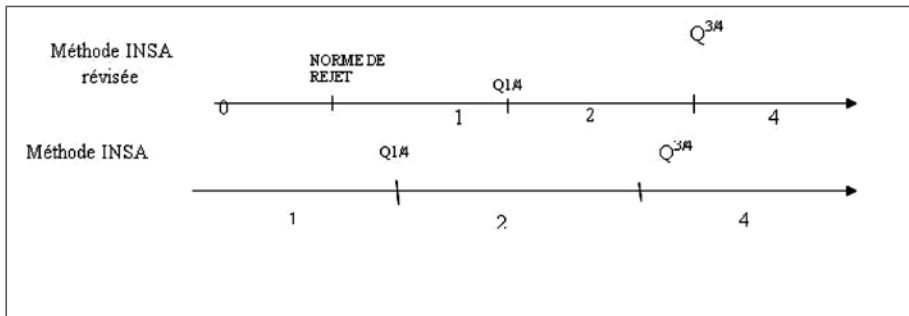


Figure 23 : Proposition de nouvelle échelle de notation de paramètre « quantité rejetée »

En effet, dans la méthode « Insa », la quantité de polluant rejetée reste le seul paramètre dont la note dépend des résultats de l'inventaire. Les autres paramètres d'exposition et d'effet dépendent uniquement de la nature chimique de la substance. La modification introduite ne pénalise que les polluants dont la quantité totale rejetée par unité fonctionnelle est inférieure à la quantité maximale autorisée par la norme. Ainsi, si un système rejette par exemple moins de 2 mg de cuivre dans la nature par tonne de déchets et par an, la note retenue pour le paramètre « quantité rejetée » sera de « 0 », car la norme française retenue ici tolère pour le lixiviat jusqu'à 2 mg de cuivre par litre. Par contre, cette note serait de « 1 », si la quantité rejetée par unité fonctionnelle était supérieure à 2 mg.

Évaluation des notes d'exposition

La quantité rejetée est fournie par l'inventaire. Il faut alors pour chaque système calculer la quantité de chaque substance chimique rejetée dans le milieu naturel à partir de la composition moyenne du lixiviat et de la quantité totale rejetée (par exemple, 33,3 kg pour les systèmes 1 et 2). Le résultat de ce calcul permet d'avoir pour chaque système la quantité totale de substance rejetée (Q) qui est obtenue en sommant toutes les substances retrouvées dans chaque effluent.

Pour les systèmes 3 et 4, on a plutôt retenu la composition moyenne du lixiviat de refus de tri des usines de compostage, issu des essais de lixiviation en casiers expérimentaux pendant une durée de 14 à 18 mois. Ces résultats permettent alors d'établir les quantités totales rejetées « Q » présentées dans le tableau n° 52. La plus grande valeur est obtenue pour les systèmes 1 et 2 qui rejettent 1 216,5 g de substances par tonne de déchets, tandis que les systèmes 3 et 4 ne rejettent respectivement que 73,4 et 52,3 g de substances par tonne de déchets traités.

Tableau 52 : Détermination de Q, $Q^{1/4}$ et $Q^{3/4}$ pour les différents systèmes étudiés

	Système 1	Système 2	Système 3	Système 4
Q (g/tonne de déchets)	1 216,5	1 216,5	1 216,5	1 216,5
$Q^{1/4}$ (g/tonne de déchets)	304,1	304,1	304,1	304,1
$Q^{3/4}$ (g/tonne de déchets)	912,4	912,4	912,4	912,4

Les quantités de substances rejetées sont très faibles pour les systèmes 3 et 4 à cause de la réduction de la quantité des déchets à mettre en décharge. Par ailleurs, les refus mis en décharge ne contiennent pas de matière organique susceptible de rejeter dans le milieu certains polluants organiques.

À partir de ce paramètre quantité de substance rejetée, on se rend compte que les systèmes 1 et 2 sont très polluants, contrairement aux systèmes 3 et 4 qui rejettent 16 à 24 fois moins de substances polluantes dans le milieu naturel. Le rapport est de l'ordre de 6 % de rejet pour le système 3 et 4 % pour le système 4. La note des autres paramètres d'exposition (dégradation et persistance) dépend uniquement de la nature de la substance rejetée. Le facteur d'exposition (Ex) et le facteur d'effet (Ef), se calculent en utilisant la relation :

$$\text{Ex ou Ef} = \frac{\sum \text{scores obtenu}}{(\sum \text{scores maxima} - \sum \text{scores minima})} \quad (19)$$

Le facteur d'exposition varie de « 0 » pour la plupart de substances organiques, qui se dégradent rapidement dès le rejet dans le milieu naturel, à 0,43 pour certains métaux lourds comme le mercure qui a la possibilité de passer dans les chaînes alimentaires par le processus de bioconcentration.

Évaluation des paramètres d'effet

Le score de tous les paramètres d'effet dépend uniquement du potentiel toxique ou écotoxique de la substance. Le facteur d'effet (Ef) varie entre « 0 » pour des substances peu toxiques comme les polluants organiques, certains métaux (sodium, calcium, potassium, etc.) et 0,63 pour certains métaux lourds très toxiques comme le mercure, l'arsenic et le cuivre. Pour certains métaux ayant une toxicité qui dépend de leur forme chimique, la forme chimique la plus toxique a été retenue pour cette évaluation.

Évaluation de l'impact toxique et écotoxique de chaque système

À partir des scores pour les paramètres d'exposition et d'effet, le bilan toxique et écotoxique a été établi sur les effluents générés par les systèmes de traitement étudiés en utilisant la formule suivante :

$$I_j = (E_{xj})^{0,6} \times (E_{fj})^{0,4} \quad (20)$$

Ce potentiel « I_j » est calculé pour chaque substance rejetée par le système. Quatre paramètres permettent de caractériser le potentiel toxique et écotoxique global de chaque système. Ce sont :

- Le potentiel maximal (Pmax) qui est la valeur maximale de I_j ;
- Le potentiel moyen (Pmoyen) qui donne la moyenne arithmétique des I_j ;
- Le potentiel médian (Pmédian) qui donne la médiane des valeurs de I_j ;
- Enfin, le nombre de substances rejetées par le système (n).

Le tableau n° 53 présente le résultat du calcul de tous ces paramètres pour les quatre systèmes étudiés.

Tableau 53 : Paramètres caractérisant les potentiels toxiques et écotoxiques des quatre systèmes étudiés

Paramètres toxiques et écotoxiques	Systèmes 1 et 2	Systèmes 3 et 4
Pmax	0,50	0,39
Pmoyen	0,14	0,08
Pmédian	0	0
N	22	22

Au vu des résultats de cette simulation, les systèmes 3 et 4 sont plus éocompatibles que les systèmes 1 et 2. Les systèmes 1 et 2 (collecte traditionnelle et mise en décharge des déchets bruts avec ou sans récupération de biogaz) sont pénalisés par le fait qu'ils rejettent dans la nature des effluents non traités, dont la concentration moyenne est de loin supérieure aux valeurs de base admises par les normes européennes. La note d'exposition de certaines substances comme la DCO et la DBO qui sont émises en grande quantité est atténuée par leur biodégradabilité.

Le potentiel écotoxique des substances rejetées varie entre 0 et 0,50 avec une moyenne de 0,14. L'effet le plus redouté est celui des substances bio-accumulatrices comme le mercure, le cadmium, les phénols et dans une certaine mesure le nickel et le zinc.

Les systèmes 3 et 4 sont presque identiques. On observe une baisse sensible de la note d'exposition, due surtout au fait que les systèmes de traitement permettent de réduire la quantité de certaines substances polluantes comme les métaux lourds, dont les quantités rejetées sont de loin en dessous de la norme. La baisse de la quantité de déchets à mettre en décharge, qui entraîne aussi une diminution de la quantité de lixiviat

produit, est le facteur principal qui justifie cette bonne performance. Le potentiel écotoxique de ces deux systèmes varie entre 0 et 0,39 avec une moyenne de 0,08; on peut dire que les effluents générés par ces systèmes sont faiblement toxiques par rapport aux deux premiers.

Il est important de préciser la limite de l'approche d'évaluation utilisée ici. En effet, bien qu'étant peu compensatoire, la méthode utilisée repose sur l'hypothèse suivant laquelle le potentiel toxique et écotoxique des effluents dépend du potentiel toxique et écotoxique des substances qui les composent. Cette hypothèse n'est pas toujours vérifiée, dans la mesure où il peut y avoir des phénomènes de synergie ou d'antagonisme entre certaines substances lorsqu'elles se retrouvent ensemble. Mais l'approche utilisée, même si elle ne permet pas de rendre fidèlement compte de la toxicité d'un effluent par rapport à une espèce ou un milieu donné, peut néanmoins permettre de classer différents effluents entre eux.

Même si certaines substances émises par les systèmes de traitement des déchets étudiés ont un potentiel écotoxique pouvant être nul, elles ont néanmoins un potentiel d'acidification ou d'eutrophisation qui n'est pas négligeable.

Acidification

Il s'agit d'évaluer le risque d'acidification causée par le rejet de gaz soufré ou azoté dans l'atmosphère. L'approche de l'acide équivalent sera utilisée pour évaluer cet impact. Selon Guinée *et al.*(1992), la contribution à l'acidification d'une substance j émise par le sous-système i est donnée par la relation suivante :

$$I_i = \sum_j m'_{ij} \times AP_j \quad (21)$$

avec : I_i (kg équivalent SO_2) : contribution à l'acidification du système i

m_{ij} (kg) : masse de la substance j émise par le système i

AP_j (sans dimension) : potentiel d'acidification de la substance j

Guinée *et al.*(1992) ont évalué des valeurs de AP pour les composés soufrés et azotés les plus courants (tableau n° 54).

**Tableau 54 : Potentiel d'acidification (AP)
des principales substances acides**

[Guinée et *al.*, 1992]

Substances	SO ₂	NO	NO ₂	NH ₃	HCl	HF
AP	1	1,07	0,70	1,88	0,88	1,60

À partir des données du tableau n° 54 et des émissions de gaz acidifiant pour chaque système de traitement étudié, on a calculé la contribution à l'acidification de chaque système de traitement. Les résultats sont présentés dans le tableau n° 55 ci-dessous.

**Tableau 55 : Contribution à l'acidification des effluents émis
par les différents systèmes de traitement envisagés (g équivalent SO₂)**

Substances	Système 1	Système 2	Système 3	Système 4
SO ₂	11,97	23,2	37,4	36,4
NO _x	83,7	93,5	287,6	189,8
Total	95,7	116,7	325,0	226,2

Le système 3 (collecte traditionnelle, compostage et mise en décharge des refus) est celui qui contribue le plus à l'acidification, suivi du système 4. Ce sont les émissions de NO_x dues au transport de compost et à la manutention des déchets qui pénalisent ce système. Mais dans l'ensemble, la contribution à la l'acidification des différents systèmes reste faible. Cette méthode d'évaluation surévalue la contribution de chaque substance à l'acidification du moment où elle considère que tous les gaz acidifiants qui sont émis par les systèmes contribuent à 100 % à l'acidification de l'air, ce qui n'est pas toujours vrai. Cette méthode a néanmoins le mérite de permettre de comparer avec moins de risque d'erreur les systèmes entre eux sur la base de ce paramètre.

Eutrophisation

Il existe plusieurs méthodes pour évaluer la contribution d'une substance à l'eutrophisation. Nous allons utiliser la méthode de l'équivalent phosphore proposée par Guinée et al.(1992). Suivant ces auteurs, la contribution à l'eutrophisation des substances *j* émises par le système *i* est donnée par la relation suivante :

$$I_i = \sum_j m'_{ij} \times NP_j \quad (22)$$

avec : I_i (kg équivalent PO_4^{3-}) : contribution à l'eutrophisation du système i
 m_{ij} (kg) : masse de la substance j émise par le système i
 P_j (sans dimension) : potentiel d'eutrophisation de la substance j

Cette approche suppose que le milieu naturel dans lequel la substance est rejetée est en équilibre. Guinée *et al.*(1992) ont déterminé le potentiel d'eutrophisation pour les composés phosphorés et azotés qui seuls participent à ce phénomène (tableau n° 56).

Tableau 56 : Potentiel d'eutrophisation (NP) des principales substances azotées et phosphorées

[Guinée *et al.*, 1992]

Substance	N	NO	NO ₂	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	P	PO ₄ ³⁻
NP	0,42	0,20	0,13	0,10	0,33	3,06	1,00

La contribution à l'eutrophisation de chaque système de traitement a été calculée à partir des données du tableau n° 56 et des émissions de substances azotées et phosphorées de chaque système de traitement étudié. Les résultats sont présentés dans le tableau n° 57.

Tableau 57 : Contribution à l'eutrophisation des systèmes étudiés (g équivalent PO₄³⁻)

Substances	Système 1	Système 2	Système 3	Système 4
NO _x	15,5	17,4	53,4	35,2
N	19	19	0	0
NO ₃ ⁻	0,004	0,004	0	0
NH ₄ ⁺	17,5	17,5	0,61	0,43
Total	52	52	54	35,6

Tout comme dans le cas de l'acidification, la contribution à l'eutrophisation est très faible. On note toujours une contribution du système 3 plus élevée que les autres. Mais dans ce cas, l'écart enregistré est très peu signi-

ficatif (moins de 4 % entre les systèmes 4 et 1). Donc on peut dire que les trois premiers systèmes sont presque équivalents. La limitation des rejets due aux transports est compensée pour les systèmes 1 et 2, par une augmentation des substances eutrophisantes provenant des lixiviats. Tandis que, dans les systèmes 3 et 4, la contribution au phénomène d'eutrophisation est due essentiellement au rejet de NO_x à partir de la consommation de carburant. Tout comme pour l'acidification, cette méthode de calcul surévalue la contribution d'une substance à l'eutrophisation, mais par contre permet de faire un classement de manière satisfaisante entre les différents effluents.

Impact du confinement des déchets

Il s'agit maintenant d'évaluer uniquement l'impact du stockage des déchets sur l'occupation du sol. Cet impact est exprimé par le volume occupé par les déchets en décharge par unité fonctionnelle. Il se calcule en divisant la masse totale des déchets mis en décharge par la densité après compactage. Cette densité sera alors de 0,6 pour les déchets bruts et 0,4 pour les refus de tri (tableau n° 58).

Tableau 58 : Volume des déchets mis en décharge en fonction des systèmes étudiés (m³)

Désignation	Système 1	Système 2	Système 3	Système 4
Densité à la décharge	0,6	0,6	0,4	0,4
Quantité de déchets mis en décharge (tonne)	1	1	0,252	0,203
Volume occupé (m ³)	2,5	2,5	0,63	0,51

Concernant cet impact, les systèmes 1 et 2 sont très pénalisés, parce que par tonne de déchets traités, il faudrait réserver au moins 2,5 m³ d'espace en décharge. Cet espace n'est que de 0,6 m³ pour le système 3 et 0,51 m³ pour le système 4. Ces deux derniers sont alors plus écocompatibles.

Après avoir évalué la contribution des flux de l'inventaire aux différents impacts environnementaux, la question qui se pose actuellement est celle de savoir comment répartir les différents systèmes étudiés. Cette question fait l'objet de la phase d'évaluation de l'ACV qui sera traitée dans le chapitre suivant.

COMPARAISON DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES DIFFÉRENTS SYSTÈMES

L'objectif poursuivi à cette étape du travail est de partir des critères environnementaux définis à l'étape d'évaluation pour aboutir à un résultat synthétique sur les différents systèmes, afin de rédiger ensuite à l'intention des décideurs les recommandations sur le ou les systèmes le plus respectueux de l'environnement. Pour ce faire, on s'appuiera sur les procédures d'analyse multicritère.

Les actions potentielles retenues pour l'évaluation sont les quatre systèmes de gestion des déchets solides retenus dans le cadre de ce travail à savoir :

- La collecte traditionnelle et la mise en décharge des déchets bruts, cette action sera désignée par a_1 ;
- La collecte traditionnelle et la mise en décharge des déchets bruts avec valorisation du biogaz de décharge, c'est l'action a_2 ;
- La collecte traditionnelle, le compostage et la mise en décharge des refus, c'est l'action a_3 ;
- La collecte traditionnelle, la méthanisation en réacteur, le compostage des digestats et la mise en décharge des refus, c'est l'action a_4 .

Donc l'ensemble A des actions potentielles contient quatre éléments $\{a_1, a_2, a_3, a_4\}$. Dans la suite de ce chapitre, on cherchera à établir les actions les plus respectueuses de l'environnement suivant les critères qui seront établis dans le paragraphe suivant.

Les critères retenus pour l'évaluation sont les quatre classes d'impact environnemental et les deux sous-classes qui ont été définies dans le chapitre 4, à savoir :

- L'épuisement des ressources naturelles (consommation de pétrole) (critère c_1);
- L'effet de serre (critère c_2);
- L'acidification (critère c_3);
- L'eutrophisation (critère c_4);
- L'impact toxique et écotoxique (critère c_5);
- Le volume occupé par les déchets en décharge (critère c_6).

Évaluation des actions potentielles suivant les différents critères (matrice d'évaluation)

Le sens de préférence retenu pour l'évaluation de chaque action est décroissant. C'est-à-dire que plus les valeurs de l'impact sont faibles, meilleure est la performance environnementale de l'action suivant ce critère. Tous les critères que nous avons retenus sont évalués en valeur cardinale.

nale, mais avec des unités différentes. Pour l'analyse qui va suivre, chaque critère a été évalué plutôt avec des valeurs ordinales, c'est-à-dire un coefficient sans unité dont l'importance dépendra de la valeur d'impact du critère de référence, ceci dans le but d'effectuer des calculs mathématiques entre les impacts (critères dont les unités sont différentes). Le tableau n° 59 présente la matrice d'évaluation des quatre actions potentielles suivant les critères ci-dessus.

Tableau 59 : Matrice d'évaluation

Action \ Critères	Épuisement des ressources naturelles (c_1)	Effet de serre (c_2)	Acidification (c_3)	Eutrophisation (c_4)	Effet toxique et écotoxique (c_5)	Quantité de déchets mis en décharge (c_6)
Système 1 (a_1)	2	400	10	5	8	10
Système 2 (a_2)	2	100	10	5	8	10
Système 3 (a_3)	5	10	30	5	6	4
Système 4 (a_4)	4	10	20	4	6	3
Poids	5	20	5	5	20	5

Cette matrice est composée en ligne par les actions (a_i) et en colonnes par les critères dont l'intersection donne l'évaluation $g_j(a_i)$ de l'action a_i suivant le critère c_j .

Pour l'évaluation du critère « épuisement des ressources naturelles », la seule ressource naturelle prise en compte étant le pétrole, seule la quantité de pétrole consommée par unité fonctionnelle par chaque système (action potentielle) constitue un élément différenciateur. Pour ce critère, une échelle de notation variant de 1 à 5. La note 1 est retenue pour une consommation de pétrole de 0 à 2 kg par unité fonctionnelle, tandis que la note « 5 » sera retenue pour une consommation de 8 à 10 kg de pétrole par unité fonctionnelle.

Pour l'évaluation du critère « effet de serre », la note retenue pour chaque action correspondra au 10^e de la quantité de gaz à effet de serre émise. La note finale retenue sera la valeur de ce calcul arrondie à la dizaine ou la centaine la plus proche. Le même principe de notation est retenu pour les critères « acidification » et « eutrophisation », mais dans ces deux cas, on retient le 10^e des émissions avec un arrondi à l'unité.

L'impact toxique et écotoxique est caractérisé par quatre paramètres : le potentiel maximal (Pmax), la médiane (Pmédian), la moyenne (Pmoyen) et le nombre de polluants rejetés dans le milieu naturel (n). Pour effec-

tuer la transformation de la valeur de ces paramètres en valeur ordinaire, l'amplitude retenue est de 1 à 5 pour chaque paramètre. Le tableau n° 60 donne la méthode de notation de ces différents paramètres.

Tableau 60 : Méthode de notation de l'impact toxique et écotoxique

Plage de variation	Pmax	Pmoyen	Pmédian	n	
0 à 0,2	1	1	1	< 10	0
0,2 à 0,4	2	2	2	10 à 20	1
0,4 à 0,6	3	3	3	20 à 30	2
0,6 à 0,8	4	4	4	30 à 40	3
0,8 à 1	5	5	5	> 40	4

Le critère quantité de déchets mis en décharge permet d'évaluer le besoin en espace à prévoir en décharge pour chaque action potentielle. Cette quantité varie entre 200 kg et 1 000 kg. La notation varie de 1 à 10; la note 1 pour une quantité de déchets mis en décharge de 0 à 100 kg et la note 10 pour les quantités de déchets mis en décharge de 900 à 1 000 kg.

Choix des poids des différents critères et des seuils

Pondération des critères

L'importance accordée à chaque critère dépend de l'acteur en présence. Ainsi, pour le responsable du ministère de l'Environnement, les impacts globaux comme l'effet de serre et la dégradation de la couche d'ozone seront probablement plus importants, parce qu'il est plus sensibilisé aux conventions internationales que le Cameroun a ratifiées. Par contre, les acteurs locaux comme les populations et la commune ne sont intéressés quasiment que par les impacts locaux, comme la salubrité du milieu, l'occupation de l'espace en décharge et la consommation de carburant. Pour retenir l'importance à attribuer à chaque critère, cinq acteurs ont été rencontrés séparément, parmi lesquels, un maire (commune urbaine de Yaoundé VI), un responsable des services techniques de la communauté urbaine de Yaoundé, le responsable du programme Changement climatique au ministère de l'Environnement et des Forêts et deux chefs de ménages. Le poids maximal accordé à chaque critère par acteur est de « 5 ». Le jugement de chaque acteur dépend de l'importance qu'il accorde au critère. Ainsi, on a retenu à l'avance quatre plages de qualification du cri-

tère, à savoir : très important, important, peu important et sans avis sur le critère. La note retenue pour chaque qualification est la suivante :

- Très important « note 5 » ;
- Important « note 3 » ;
- Peu important « note 2 » ;
- Sans avis « note 1 ».

À partir de ces discussions, les différents critères ont été classés par ordre d'importance décroissante selon l'avis de ces cinq acteurs. Ainsi, l'impact « effet de serre » et « l'impact toxique et écotoxique » sont les plus importants, ils obtiennent tous deux une note globale de « 20 », tandis que les acteurs n'ont aucun avis sur les autres critères qui obtiennent tous une note de « 5 ». Le critère « occupation de l'espace en décharge » ne suscite aucun intérêt pour les acteurs, parce qu'il n'y a aucune contrainte d'espace autour de Yaoundé. Les acteurs pensent donc qu'on pourra facilement trouver de l'espace à aménager comme décharge dans le moyen terme. Les impacts « acidification » et « eutrophisation » sont très peu connus des différents acteurs rencontrés, sauf le responsable du ministère de l'Environnement qui affirme être au courant de ces phénomènes.

Choix des seuils

Les méthodes Electre retenues pour l'évaluation des actions font recours à plusieurs paramètres :

- le seuil d'indifférence pour chaque critère « q_j » qui peut être interprété comme la marge d'incertitude minimale liée aux calculs des valeurs de la matrice d'évaluation ;
- le seuil de préférence stricte p_j qui peut être interprété comme la marge maximale d'erreur liée aux calculs des valeurs de la matrice d'évaluation ;
- le seuil de veto v_j , pour le critère C_j est la valeur de la différence $g_i(a_i) - g_i(a_k)$ à partir de laquelle il apparaît prudent de refuser toute crédibilité au surclassement de l'action a_i par l'action a_k , même si tous les autres critères sont en concordance avec ce surclassement.

En plus de ces différents seuils, la méthode Electre III introduit la notion de seuil de discrimination qui permet de distinguer si tel surclassement est plus crédible que tel autre. Celui-ci a été introduit à cause de la part de l'arbitraire que recèle la formule définissant le degré de crédibilité.

Les seuils d'indifférence q_{iu} retenus représentent les 5 % de la valeur médiane prise sur chaque critère, les seuils de préférence 10 % et les seuils de veto 70 % de la valeur médiane de chaque critère. Par la suite, on fera varier ces différents seuils pour l'analyse de la sensibilité des résultats ob-

tenus. Le tableau n° 61 donne les différentes valeurs de ces seuils pour les critères retenus.

Tableau 61 : Seuils d'indifférence, de préférence et de veto pour les différents critères retenus

Critères	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	c ₅	c ₆
Valeur médiane	3	55	15	5	7	7
Seuil d'indifférence	0,15	2,75	0,75	0,25	0,35	0,35
Seuil de préférence stricte	0,3	5,5	1,5	0,5	0,7	0,7
Seuil de veto	2,1	38,5	10,5	3,5	4,9	4,9

La méthode Electre III va être utilisée pour l'évaluation des différentes actions potentielles, On évaluera par la suite les actions potentielles avec la méthode Electre IS, qui est de type α , juste en guise de comparaison pour vérifier que les solutions dégagées dans la première approche restent valables.

Utilisation de la méthode Electre III pour l'évaluation des actions

Établissement des matrices de concordance par critère

Les éléments $C_j(a_i, a_k)$ de la matrice de concordance par critère sont calculés à partir de la relation suivante :

$$\begin{aligned}
 C_j(a_i, a_k) = 0 & \Leftrightarrow p_j < g_j(a_k) - g_j(a_i) \\
 C_j(a_i, a_k) = \frac{g_j(a_i) + p_j - g_j(a_k)}{p_j - q_j} & \Leftrightarrow q_j < g_j(a_k) - g_j(a_i) \leq p_j \\
 C_j(a_i, a_k) = 1 & \Leftrightarrow g_j(a_k) - g_j(a_i) \leq q_j
 \end{aligned}
 \tag{23}$$

D'une manière générale, les valeurs des matrices de concordance par critère obtenues sont soit « 0 » soit « 1 ». Ceci est dû au fait que l'écart entre les évaluations des actions suivant les critères retenus est soit presque nul, soit très important. Les actions a_1 et a_2 se comportent presque de la même façon, sauf pour le critère « effet de serre ».

Détermination de la matrice de concordance globale

Ces indicateurs indiquent dans quelle mesure il y a une concordance avec l'hypothèse « l'action a_i surclasse l'action a_k ». Les éléments C_{ik} de cette matrice sont obtenus par la relation suivante :

$$C_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^m P_j * c_j(a_i, a_k)}{\sum_{j=1}^m P_j} \quad (24)$$

P_j étant le poids de chaque critère et $c_j(a_i, a_k)$ les indices de concordance suivant le critère C_j

Tableau 62 : Matrice de concordance globale

	a_1	a_2	a_3	a_4
a_1	X	0,67	0,25	0,17
a_2	1	X	0,17	0,17
a_3	0,83	0,83	X	0,33
a_4	0,83	0,83	0,67	X

Les résultats de ce calcul, présenté dans le tableau n° 62, montrent qu'il existe une concordance certaine de l'hypothèse suivant laquelle « l'action a_2 surclasse l'action a_1 ». Par contre, pour les couples d'actions (a_3, a_1) , (a_3, a_2) , (a_4, a_1) , (a_4, a_2) , la concordance de l'hypothèse de surclassement de (a_1, a_2) par (a_3, a_4) est très forte (83 %), tandis que l'hypothèse de surclassement de (a_3, a_4) par (a_1, a_2) est beaucoup plus faible (entre 17 et 25 %). L'hypothèse suivant laquelle « a_4 surclasse a_3 » concorde aussi à 67 %. Pour que ces hypothèses de surclassement restent valables, il faudrait aussi que les couples d'actions retenues satisfassent au test de discordance.

Détermination de la matrice de discordance par critère

Les éléments $d_j(a_i, a_k)$ de ces matrices sont déterminés suivant les relations suivantes :

$$\begin{array}{l}
 d_j(a_i, a_k) = 1 \quad \Leftrightarrow \quad v_j < g_j(a_k) - g_j(a_i) \\
 d_j(a_i, a_k) = \frac{g_i(a_k) - g_j(a_i) - p_i}{v_j - p_j} \quad \Leftrightarrow \quad p_j < g_j(a_k) - g_j(a_i) \leq v_j \\
 d_j(a_i, a_k) = 0 \quad \Leftrightarrow \quad g_j(a_k) - g_j(a_i) \leq p_j
 \end{array} \quad (25)$$

Les résultats de ce calcul permettent déjà de dégager les hypothèses de surclassement très probables de celles qui sont très peu probables. En effet, plus l'indice de discordance pour un couple d'actions (a_i, a_k) est proche de 1, plus la probabilité de surclassement de l'action a_k par l'action a_i est faible. Par exemple, l'hypothèse de surclassement de l'action a_1 par a_3 est très faible car l'indice de discordance pour ce couple d'actions est de 1 pour les critères $(c_1, c_3, c_4 \text{ et } c_6)$, il en est de même du couple d'actions (a_4, a_1) , (a_1, a_2) , (a_1, a_3) , (a_1, a_4) , (a_2, a_3) et (a_2, a_4) . Par contre, il est plus probable que l'hypothèse suivant laquelle « a_2 surclasse a_1 » soit vérifiée, car pour tous les six critères retenus, l'indice de discordance de ce couple d'actions est nul, tandis que l'indice de concordance globale est égal à « 1 ». La méthode Electre III introduit la notion de crédibilité de surclassement par l'indice de crédibilité, qui allie la notion de concordance et de discordance.

Relation de surclassement flou

La méthode Electre III suppose toujours qu'il existe une relation de surclassement entre deux actions potentielles. Mais cette relation est floue. L'indice de crédibilité permet alors de préciser si une relation de surclassement est plus crédible qu'une autre. Les éléments δ_{ik} de la matrice de crédibilité sont exprimés par la relation suivante :

$$\delta_{ik} = C_{ik} \prod_{j \in F} \frac{1 - d_j(a_i, a_k)}{1 - C_{ik}} \quad (26)$$

F^* est la famille des critères pour lesquels l'indice de discordance est supérieur à l'indice de concordance globale. Le degré de crédibilité n'est donc pas autre chose que l'indice de concordance C_{ik} affaibli par les indi-

ces de discordance $d_j(a_i, a_k)$. Mais $d_j(a_i, a_k)$ contribue à cet affaiblissement si et seulement s'il est supérieur à C_{ik} . Par ailleurs, s'il existe un seul critère tel que l'indice de discordance sur ce critère est égal à 1, alors le degré de crédibilité sera nul, quelle que soit l'importance relative de ce critère.

Le tableau n° 63 donne la matrice de crédibilité pour les différentes actions potentielles.

Tableau 63 : Matrice de degré de crédibilité

	a_1	a_2	a_3	a_4
a_1	X	0	0	0
a_2	1	X	0	0
a_3	0	0	X	0,005
a_4	0,0003	0,0003	0	X

Au regard des résultats de ce calcul, on peut dire que l'hypothèse « a_2 surclasse a_1 » est crédible à 100 %, tandis que l'hypothèse « a_1 surclasse a_3 » n'est pas crédible. Bien que l'indice de concordance globale des couples d'actions (a_3, a_1), (a_3, a_2), (a_4, a_1) et (a_4, a_2) soit très fort, la crédibilité pour que le couple d'actions (a_3, a_4) surclasse les actions (a_1, a_2) est nulle ou très faible (0,03 %).

L'importance moyenne de la valeur de l'indice de crédibilité d'un couple d'actions par rapport à un autre ne détermine pas de manière absolue que la première relation de surclassement est plus crédible que la deuxième, ceci à cause du caractère arbitraire de détermination des éléments permettant le calcul des indices de crédibilité (l'utilisation de l'interpolation linéaire par exemple). Autrement dit, il n'est pas possible d'admettre que dès l'instant où δ_{ik} est supérieur à δ_{em} , le surclassement de a_k par a_i est strictement plus crédible que le surclassement a_m par a_e . L'introduction du seuil de discrimination permet d'établir qu'une relation de surclassement est plus crédible qu'une autre.

Exploitation de la relation de surclassement flou

Le but de cette étape est, en se fondant sur la relation de surclassement floue, d'arriver à un classement des actions. À partir des indices calculés dans les étapes précédentes, c'est-à-dire les indices de concordance, de discordance et de crédibilité, on établit les relations de surclassement en suivant certaines règles. Ainsi, pour distinguer si tel surclassement est plus crédible que tel autre, on utilise la fonction $S_{dis}(\lambda)$, appelée seuil de discrimination et définie mathématiquement par :

Si $\delta_{ik} = \lambda$ et $\delta_{em} = \lambda - \eta$, avec $\eta > Sdis(\lambda)$, alors le surclassement de a_k par a_i est strictement plus crédible que le surclassement de a_m par a_e .

Pour l'application on retiendra le seuil de discrimination linéaire décroissant $Sdis(\lambda) = 0,3 - 0,15*\lambda$; on pourra dans l'analyse de la sensibilité changer ce seuil pour avoir son influence sur le résultat obtenu.

Distillation descendante et ascendante

L'objectif visé ici est de construire dans un premier temps deux pré-ordres totaux différents. Pour cela, on introduit trois nouvelles notions qui sont la puissance, la faiblesse et la qualification d'une action. La puissance d'une action étant le nombre d'actions qui sont surclassées par cette dernière. La faiblesse est donnée par le nombre d'actions qui surclassent l'action étudiée. La qualification est égale à la puissance moins la faiblesse.

Pour avoir la puissance ou la faiblesse de chaque action, on fait appel à un processus itératif, dont l'algorithme est présenté sur la figure n° 24. Selon qu'on recherche un sous-ensemble d'actions de plus en plus réduit, ayant une qualification maximale ou minimale, on parle de distillation descendante ou ascendante.

La distillation descendante permet d'établir avec une grande certitude que l'action a_2 surclasse l'action a_1 . Par contre, les actions a_1 , a_3 , a_4 sont au même niveau. Donc le résultat de la distillation descendante se présente de la façon suivante :



D'un autre côté la distillation ascendante permet d'établir que l'action a_1 est la moins bien classée tandis que les actions a_2 , a_3 et a_4 sont incomparables. Sur la base des résultats de la distillation ascendante, on peut donc établir le résultat suivant :



Sur la base des résultats d'analyse avec la méthode Electre III, on peut dire avec une grande certitude que l'action a_2 , c'est-à-dire « la collecte tra-

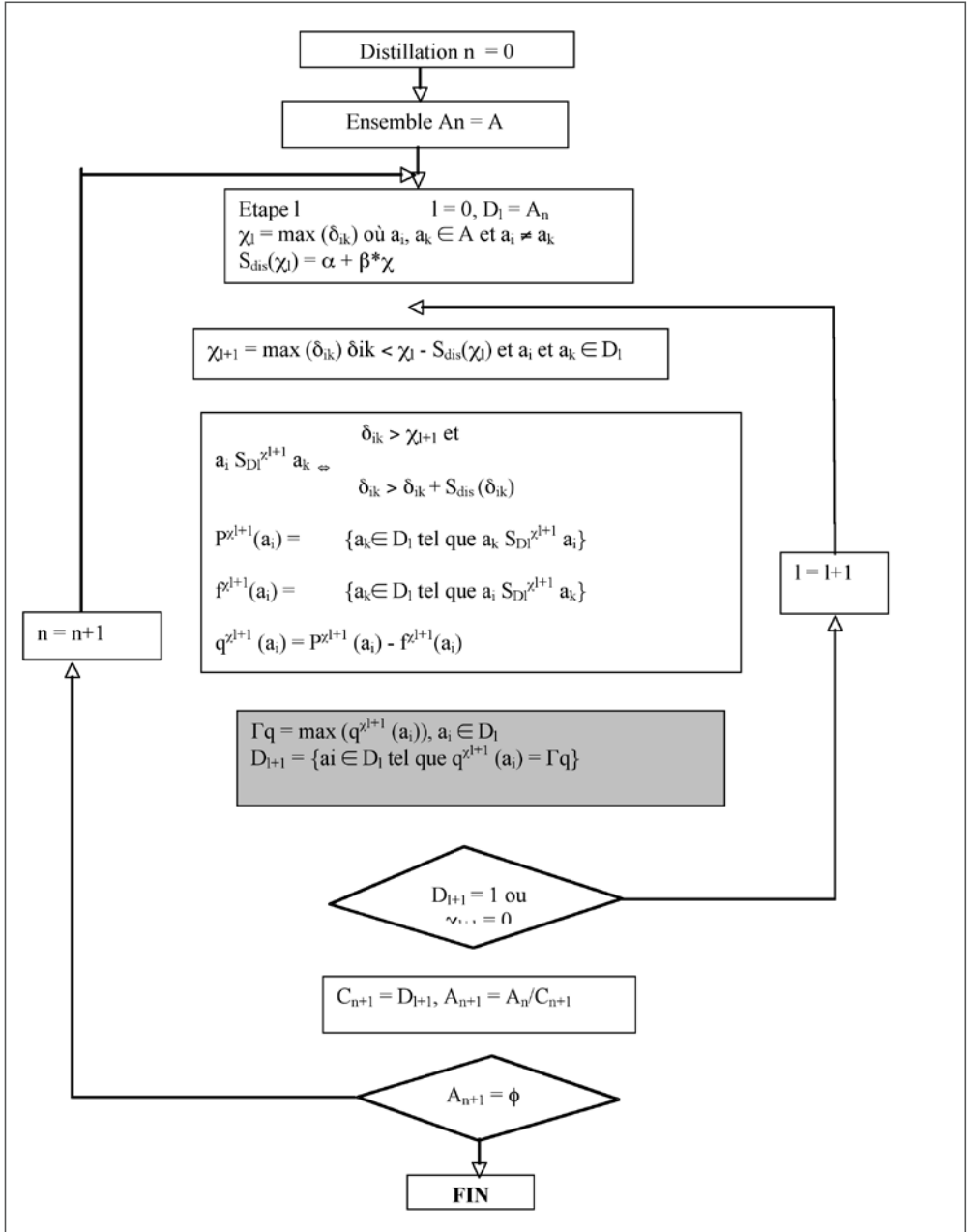


Figure n°24 : Algorithme de la distillation descendante [ROY, 1985].

ditionnelle, la mise en décharge des déchets bruts et la récupération de biogaz de décharge » est plus écopropable sur la base des six critères environnementaux retenus que l'action a_1 , c'est-à-dire « la collecte traditionnelle et la mise en décharge des déchets bruts ». Par contre, on ne peut rien affirmer en ce qui concerne les actions (a_3 , a_4) et a_2 . La distillation ascendante permet par contre de dire que le couple d'actions (a_3 , a_4) peut être préféré à a_1 , sans que cette hypothèse ne soit très stable. À aucun moment de la réflexion, la méthode Electre III ne permet d'établir une relation de surclassement entre les actions a_3 et a_4 . La figure n° 25, ci dessous donne une représentation graphique des résultats d'Electre III.

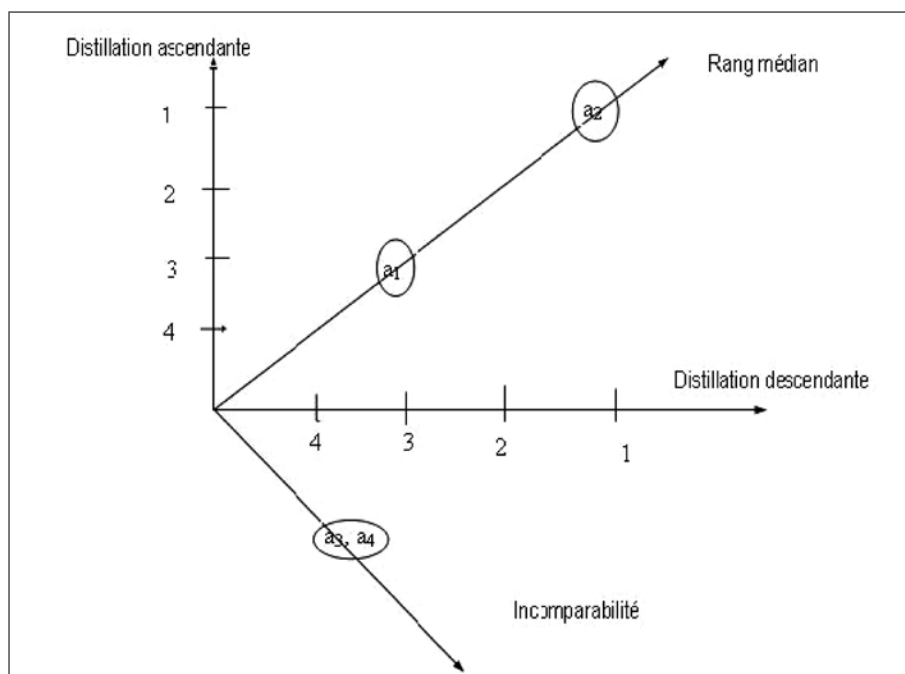


Figure 25 : Représentation graphique des résultats d'analyse suivant la méthode Electre III

L'analyse de sensibilité de cette solution montre qu'elle est très stable. En effet, en faisant varier différents seuils, c'est-à-dire le seuil d'indifférence de 5 à 2,5 % de la valeur médiane, le seuil de préférence stricte de 10 à 7,5 % et le seuil de véto de 70 à 50 % de la valeur médiane, le résultat obtenu pour la méthode Electre III reste identique. Quand on maintient les premières valeurs de seuil en faisant varier le seuil de discrimination en prenant $S_{dis}(\lambda) = 0,2 - 0,15*\lambda$, on obtient le même classement.

Pour l'analyse de la robustesse, nous avons doublé les poids de chaque critère. La solution obtenue reste encore stable après les distillations ascendantes et descendantes. Donc le résultat obtenu est stable et robuste.

Dans le paragraphe ci-dessous, en maintenant les mêmes valeurs seuils utilisées pour Electre III, on va procéder à l'évaluation des quatre actions potentielles en utilisant la méthode Electre IS, c'est-à-dire que nous recherchons cette fois-ci la ou les meilleures actions dans l'ensemble des actions potentielles. L'objectif recherché étant de savoir si les résultats obtenus par la méthode Electre III restent stables quand on utilise une autre méthode d'évaluation.

Utilisation de la méthode Electre IS pour l'évaluation des actions

La démarche méthodologique de la méthode Electre IS est semblable à celle d'Electre I, à la différence que la première approche utilise plutôt les pseudo-critères. Les matrices de concordance et de discordance par critère sont définies de la même façon que dans Electre III, sauf qu'ici on ne fait pas d'interpolation linéaire. Les indices de concordance globale sont définis aussi de la même façon que dans Electre III. De plus, la méthode Electre IS introduit la matrice de discordance globale. Les seuils de concordance par critère sont les mêmes que ceux déterminés dans la méthode Electre III.

L'indice de discordance par critère $d_j(a_i, a_k)$ s'obtient par la relation suivante :

$$d_j(a_i, a_k) = 0 \text{ si } g_j(a_k) - g_j(a_i) < v_j(a_i, a_k) - q_j(a_i, a_k) - \frac{1 - C(a_i, a_k)}{1 - c} \quad (27)$$

$$d_j(a_i, a_k) = 1 \text{ sinon.}$$

C'est le seuil de concordance.

Les indices de discordance globale sont donnés par la relation suivante :

$$D(a_i, a_k) = 0, \text{ si } d_j(a_i, a_k) = 0, \text{ pour tout } j \text{ et } D(a_i, a_k) = 1 \text{ sinon.}$$

À partir des matrices de discordance par critère, on obtient la matrice de discordance globale qui est présentée dans le tableau n° 64.

Tableau 64 : Matrice de discordance globale

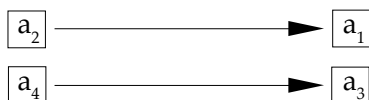
	a_1	a_2	a_3	a_4
a_1	X	1	1	1
a_2	0	X	1	1
a_3	1	1	x	1
a_4	1	1	0	X

D'après les résultats de ce calcul, les indices de discordance globale sont nuls simplement pour les couples d'actions (a_2, a_1) et (a_4, a_3), donc il est possible que l'action a_4 surclasse a_3 et a_2 surclasse a_1 . Pour certifier si ces hypothèses sont vraies, il faudrait comparer les valeurs des indices de concordance C_{21} et C_{43} au seuil de concordance retenu. Si l'on retient un seuil de concordance de 0,65, l'hypothèse de surclassement de a_1 par a_2 et a_3 par a_4 est vraie.

Établissement des relations de surclassement flou

L'action a_i surclasse l'action a_k si et seulement si $C(a_i, a_k) \geq c$ et $D(a_i, a_k) = 0$.

Les indices de concordance globale $C(a_i, a_k)$ sont ceux calculés dans la méthode Electre III. Si l'on retient la valeur de $c = 0,65$ le graphe de surclassement obtenu est le suivant :



Dont on peut dire que, pour un seuil de concordance de 0,65, l'action a_2 surclasse l'action a_1 et l'action a_4 surclasse l'action a_3 . Le noyau est donc composé des actions a_2 et a_4 .

Analyse de la sensibilité et de la robustesse

Le seuil de concordance pour le couple d'actions (a_4, a_3) est de 0,67. Donc la relation de surclassement de a_3 par a_4 est vraie uniquement pour les valeurs de $c \leq 0,67$. Ce surclassement reste fragile. Par contre, une variation des seuils d'indifférence, de préférence stricte et de veto dans les mêmes proportions que dans Electre III n'affecte pas le résultat final.

En faisant varier du simple au double le poids de chaque critère retenu, on obtient pour la matrice de concordance globale la valeur de « 1 » pour le couple d'actions (a_2, a_1) et « 0,67 » pour le couple d'actions (a_4, a_3); donc le classement effectué ci-dessus reste valable.

Analyse des différents systèmes sur le plan environnemental

Pour chacune des deux méthodes utilisées, trois groupes d'actions peuvent se dégager : les actions les moins bonnes, les actions intermédiaires et les meilleures actions. Au terme de l'analyse par la méthode Electre III, il est certain que l'action a_2 est strictement préférable par rapport à l'action a_1 , qui de surcroît est la plus mauvaise des quatre, d'après les résultats de la distillation ascendante. Par contre, la méthode Electre IS permet le regroupement des quatre actions en deux sous-ensembles : le noyau constitué des actions a_2 , a_4 et ensuite les actions moins classées que sont a_3 , a_1 . Ce noyau résiste moins à la sensibilité du moment où, pour un seuil de concordance de plus de 0,67, l'action a_4 n'appartient plus au noyau. Ce qui réduit le noyau simplement à a_2 . Ce résultat est alors identique à celui obtenu dans Electre III. Par ailleurs, l'utilisation simultanée des deux méthodes Electre III et IS a permis d'établir une hiérarchisation entre deux actions qui étaient jugées incompatibles par la première approche. En définitive, on peut classer les actions étudiées dans trois grands groupes :

Celles qui sont unanimement reconnues comme les moins bonnes : la collecte traditionnelle (a_1) et le compostage industriel (a_3) des déchets.

La collecte traditionnelle et la mise en décharge des déchets bruts pratiquée actuellement dans la plupart des villes des pays en développement est reconnue comme la moins bonne action du point de vue environnemental. Cette pratique est pénalisée surtout par la forte émission de méthane après la mise en décharge, le fort impact toxique et écotoxique des déchets après la mise en décharge dû au rejet sans aucun traitement de lixiviat dans le milieu naturel, et l'importance du volume occupé par les déchets en décharge. Même pendant les étapes intermédiaires de calcul, cette action ne semble pas être préférée aux trois autres bien que la consommation de carburant reste faible. S'il est établi clairement que l'action a_1 est la moins bonne, l'action a_3 (compostage industriel de déchets) se trouve aussi parmi les plus mauvaises, mais sans qu'on arrive à aucun moment du processus à établir un surclassement entre a_1 et a_3 . La collecte traditionnelle, le compostage et la mise en décharge des refus, apparaît aussi comme l'une des actions les moins bonnes d'une manière générale si l'on prend l'ensemble des six critères. Dans la méthode Electre III, la matrice de concordance globale montre qu'il y a une forte concordance pour l'hypothèse suivant laquelle les actions a_3 et a_4 sont préférées aux actions a_1 et a_2 . Mais l'analyse de la discordance permet de faire tomber cette hypothèse. En effet, les actions a_3 et a_4 sont fortement pénalisées par la consommation abusive de carburant (9 kg par tonne de déchets pour a_3) contre 3 kg seulement pour les actions a_1 et a_2 . Cette consommation entraîne une émission plus importante de gaz

acidifiants (SO_2 , NO_x ...) d'où la discordance des actions a_3 et a_4 par rapport aux actions a_1 et a_2 pour ce critère.

L'analyse du degré de crédibilité montre aussi que, pour l'ensemble des critères, la crédibilité pour que l'action a_4 soit préférée à a_1 et a_2 est très faible (0,03 %), cette hypothèse n'est plus confirmée lorsqu'on passe les actions au seuil de discrimination. Par ailleurs, les actions a_3 et a_4 sont meilleures pour les critères « effet de serre » et « l'impact toxique et écotoxique ».

Action intermédiaire : la méthanisation des déchets en réacteur suivant le process Valorga (a_4)

La méthode Electre III permet à l'étape de distillation ascendante et descendante de classer les actions a_3 et a_4 comme des actions intermédiaires. Mais ce classement reste très peu stable. L'utilisation de la méthode Electre IS confirme la tendance dégagée par Electre III, mais si l'on fixe le seuil de concordance global en dessous de 67 %, l'action a_4 , c'est-à-dire « la collecte traditionnelle, la méthanisation en réacteur, le compostage du digestat et la mise en décharge de refus », est préférée à l'action a_3 , c'est-à-dire « la collecte traditionnelle, le compostage et la mise en décharge des refus ». On peut donc dire que l'action a_4 occupe une position intermédiaire, avec une faible stabilité. Dans ce cas, l'action a_4 a bénéficié de la faible consommation de carburant par rapport à l'action a_3 , tandis que les émissions de gaz à effet de serre et le volume de déchets mis en décharge sont presque les mêmes. La position occupée par cette action peut changer directement si l'on sort du contexte de Yaoundé où l'énergie électrique est obtenue à partir des centrales hydro-électriques. Une production de l'électricité à partir des centrales à gaz ou des centrales thermiques avantagerait l'action a_3 par rapport à a_4 qui consomme sept fois plus d'énergie électrique par tonne de déchets traités (74 kWh/tonne, contre 10,8 kWh/tonne pour l'action a_3).

L'action qui avec une robustesse affirmée est considérée comme la meilleure : la collecte traditionnelle couplée à la récupération et recyclage de biogaz de décharge (l'action a_2).

Cette action résiste très bien à l'analyse de sensibilité et de robustesse quelle que soit la méthode d'analyse utilisée, donc quelles que soient les hypothèses retenues, cette action sera toujours la meilleure par rapport aux autres actions. L'utilisation de la méthode Electre IS permet d'affirmer, avec une sensibilité moins forte, que l'action a_4 dans certaines conditions est préférée par rapport l'action a_3 et dans ces conditions les actions a_2 et a_4 qui appartiennent au noyau mathématique ne sont pas comparables. La récupération de biogaz de décharge qui entraîne la baisse significative des émissions de gaz à effet de serre produits après la mise en décharge des

déchets bruts, permet d'améliorer les performances de l'action a_2 . Cette action bénéficie par ailleurs des mêmes avantages que l'action a_1 , c'est-à-dire une faible consommation de carburant entraînant un taux d'émission des gaz acidifiants très faible.

Coûts des différents systèmes de gestion des déchets

Deux indicateurs ont été retenus pour l'évaluation économique et financière des unités de traitement. Il s'agit du coût de revient et du coût total des investissements. Le calcul du coût de revient intègre les dépenses fixes de fonctionnement, les charges variables (assurances, électricité, eau, communication, etc.) et les bénéfices de l'entreprise. Pour les systèmes qui assurent en même temps la fonction de dépollution et de production d'amendement organique et/ou d'énergie, nous avons tenu compte de la vente de produits issus de la valorisation des déchets.

Le prix de vente de compost retenu (10 €/t) est issu de la synthèse des prix appliqués dans les unités de compostage de petite taille existant dans les villes du Cameroun et représente aussi le prix commercial de ce produit calculé à partir de sa composition en éléments nutritifs majeurs (NPK) [Ngnikam, 2000]. Le prix de vente d'électricité produite à partir des centrales à biogaz est de 0,023 €/kWh et correspond au coût de production actuel d'énergie à partir des centrales hydro-électriques de la Société nationale d'électricité [Ngnikam, 2000].

Le tableau n° 65 présente le coût de revient du traitement des ordures ménagères et le coût d'investissement pour l'ensemble des quatre systèmes retenus. Ces paramètres ont été ramenés à l'unité fonctionnelle, c'est-à-dire la tonne d'ordures ménagères, pour avoir une base commune de comparaison.

Tableau 65 : Coût de revient de traitement des ordures ménagères et investissement pour les quatre systèmes de gestion retenus
[Ngnikam, 2000]

	Investissements (€ ³ /t of MSW)	Coût de revient (€/t of MSW)
Système I	16,92	15
Système 2 (50 %)	32,0	19
Système 2 (70 %)	33,5	18
Système 3	99,6	28
Système 4	195,85	47

Pour chaque système, le prix indiqué dans ce tableau prend en compte les étapes de précollecte, collecte, transport, traitement et mise en décharge des résidus finaux.

Sur la base des deux critères d'analyse retenus, on peut affirmer que le système 4 (méthanisation en réacteur) est de loin le moins attractif sur le plan économique, car il requiert des investissements 10 fois plus importants que le système de collecte traditionnelle pratiqué à Yaoundé, et les charges de fonctionnement sont trois fois plus élevées. Même en doublant le prix de vente des sous-produits issus de ce système de traitement, il reste le moins avantageux par rapport aux trois autres. La figure n° 26 permet de mettre en exergue ces résultats.

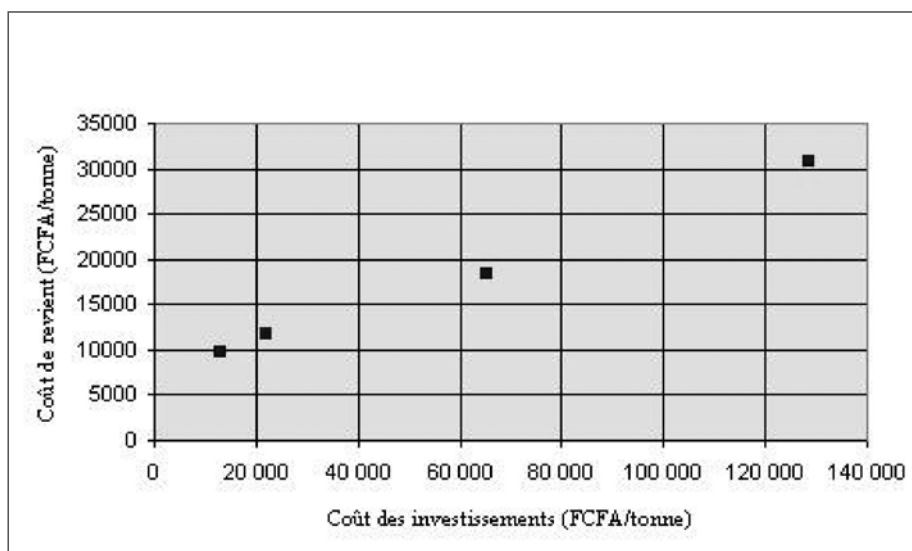


Figure 26 : Classement des différents systèmes en fonction du coût d'investissement et d'exploitation

Par ailleurs, l'introduction d'une unité de compostage centralisé dans le système traditionnel de gestion des déchets double pratiquement le coût de gestion et multiplie le coût des investissements par 5. Ce système est plus coûteux que les deux premiers. On peut dire avec certitude que sur la base de deux critères retenus, à savoir le coût des investissements et le coût de gestion, le système 3 occupe au mieux une position intermédiaire (même si l'on vendait toute la production de compost à 23 € la tonne, ce qui n'est pas possible dans les conditions économiques et sociales actuelles de la plupart des villes des pays en développement).

Le système 2 se trouve dans une position très contrastée, car les investissements sont comparables à ceux du système de référence, tandis que les coûts de gestion, même dans les conditions très défavorables, sont très proches des coûts obtenus dans le système 1.

La collecte traditionnelle, la mise en décharge avec une récupération du biogaz pour une valorisation électrique sont une option intéressante dans le contexte des villes des pays en développement : les coûts d'investissement sont modestes par rapport aux autres modes de traitement (tableau n° 65), et l'on pourrait, dans certaines conditions, rentabiliser les investissements.

Par ailleurs, en tenant compte des réductions des émissions de gaz à effet de serre des différents systèmes de traitement, le tableau n° 66 permet d'établir que le coût de réduction des émissions des gaz à effet de serre est modeste pour le système 2 et élevé pour les systèmes 3 et 4.

Tableau 66 : Coûts de réduction des émissions de gaz à effet de serre pour les différents systèmes [Ngnikam, 2002]

	Réduction de GES (t ECO2)	Coût de traitement (€/t d'OM)	Coût additional (€/t d'OM)	Coût de réduction de GES (€/t ECO2)
System 1	0	15	0	0
System 2 (50 %)	1,05	19	4,2	4
System 2 (70 %)	1,35	18	3	2,2
System 3	1,77	28	13,3	7,5
System 4	2	47	32	16

Le coût de réduction des émissions de gaz à effet de serre de chaque système est calculé en prenant le système 1 comme référence. Ainsi la mise en décharge avec récupération de biogaz et sa valorisation pour la production d'électricité apparaît comme la solution qui permet de réduire les émissions de GHG à faible coût. En fonction de l'efficacité de la récupération, le coût de réduction peut varier entre 2,2 €/tCO₂E, si 70 % du potentiel de méthane est récupéré pour produire de l'électricité en substitution aux combustibles fossiles, et 4 €/tCO₂E, si le système mis en place ne permet de récupérer que 50 % du potentiel (figure n° 26). Si l'électricité produite est vendue à 0,047 €/kWh, qui ne représente que 80 % du prix de vente d'énergie moyenne tension (0,058 €/kWh), le système 2 permet de

dégager un bénéfice si 70 % du biogaz est récupéré. Dans ce cas, le coût de réduction des émissions de GHG est nul. Le compostage industriel apparaît comme une solution intermédiaire, puisqu'il permet de réduire les émissions de GHG à un coût de 7,5 €/tCO₂E, soit environ trois fois le prix de réduction des émissions du système 2. La méthanisation en réacteur apparaît comme la solution la plus défavorable sur le plan économique, avec un coût de réduction des émissions de 16 €/tCO₂E (figure n° 27).

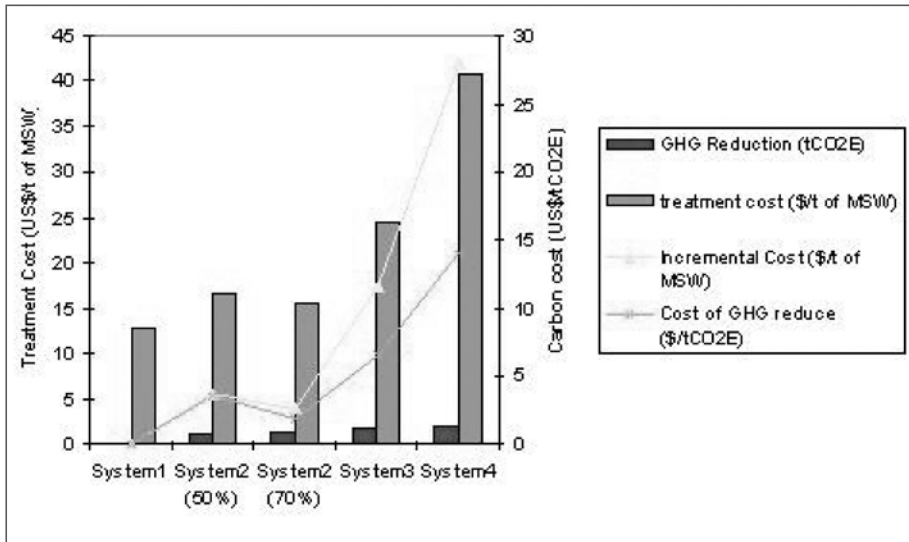


Figure 27 : Coût de traitement et coût de réduction des émissions de GES pour les divers traitements des déchets retenus [Ngniakm, 2002]

La méthanisation en réacteur, même s'il est plus attrayant sur le plan environnemental, n'est pas durable dans le contexte des pays en développement, car par rapport à la mise en décharge il faut investir 10 fois plus d'argent pour mettre en œuvre cette solution et son fonctionnement coûte aussi plus cher. L'activité de compostage peut être encouragée dans le cas où le compost produit dans les unités peut trouver un débouché permanent en agriculture. Néanmoins, les investissements nécessaires pour mettre en œuvre cette solution sont plus élevés. Le compostage à petite échelle, tel que nous l'avons pratiqué dans les villes camerounaises, permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre à un coût plus faible. Cette solution devient bénéfique dans le cas où l'on prend en compte dans l'analyse l'ensemble des coûts évités : notamment la réduction des coûts

de collecte et de transport des déchets au cas où les unités sont installées non loin des habitations [Ngnikam, 2000].

COMPARAISON ÉCONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTALE DES DIFFÉRENTS SYSTÈMES

Il s'agit ici de faire une évaluation globale des systèmes de gestion des déchets solides retenus sur un double plan environnemental et économique. D'un point de vue environnemental, les quatre systèmes ont été analysés sur la base de six critères en utilisant les outils d'analyse multicritère d'aide à la décision. Les deux indicateurs économiques retenus ont aussi permis d'évaluer de manière séparée les systèmes d'un point de vue économique.

Pour évaluer les systèmes d'un point de vue économique et environnemental, on a choisi de confectionner deux matrices de performances. La première matrice est définie en ligne par la performance environnementale de chaque système (donnée par le rang occupé à l'issue de l'analyse multicritère) et en colonne par le montant unitaire des investissements pour mettre en place le système (figure n° 28). La deuxième matrice est définie en ligne par la performance environnementale de chaque système et en colonne par le coût de gestion (figure n° 29).

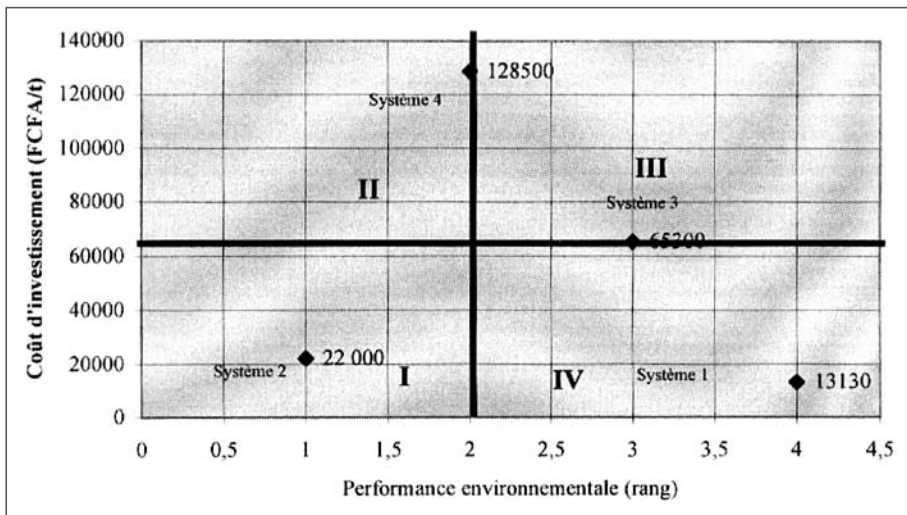


Figure 28 : Performance environnementale et coûts des investissements des systèmes étudiés

Un système sera considéré comme économiquement viable suivant l'indicateur « coût des investissements » si le montant total des inves-

tissements est inférieur à un certain seuil fixé en fonction de la capacité financière de la collectivité locale qui sollicite l'investissement. Un seuil arbitraire a été retenu soit « six fois le budget annuel actuel de la municipalité ». Pour les villes africaines par exemple, qui ne mobilisent que 3 € à 4,6 € par habitant et par an, ce seuil serait compris entre 18 € et 27,5 €. Pour le cas spécifique de la ville de Yaoundé, qui mobilise 5,8 € par habitant et par an, le seuil serait de 34,75 € par habitant. L'unité fonctionnelle retenue étant la tonne d'ordures ménagères, il faudrait pour atteindre cette quantité réunir la production annuelle de 2,74 habitants au taux de 365 kg par an (pour un taux de production de 1 kg par habitant par jour). Le seuil d'investissement serait alors de 95,3 € par tonne de déchets. Au-delà de ce seuil, la ville devrait se surendetter pour mobiliser les investissements nécessaires pour mettre en place l'unité de traitement.

La performance environnementale de chaque système est déterminée par le rang qu'il occupe à l'issue de l'analyse multicritère. Le seuil correspondra aux deux actions qui arrivent en tête du classement à l'issue de l'analyse multicritère. La matrice de variation du coût d'investissement en fonction de la performance environnementale peut donc être divisée en quatre zones (figure n° 28) :

La zone I correspond aux actions qui affichent une bonne performance environnementale et économique suivant l'indicateur « coût d'investissement ». Le système 2 est situé dans cette zone ; en effet, il arrive en tête du classement de l'analyse multicritère et le montant des investissements qu'il faudrait mobiliser pour le mettre en place est modeste (33,5 € par tonne de déchets), soit moins de 35 % du seuil.

La zone II regroupe les actions ayant une bonne performance environnementale et qui nécessitent pour leur mise en œuvre des coûts d'investissement élevés. Ces actions, bien que présentant certains avantages environnementaux, auront du mal à être mises en œuvre dans notre contexte de travail. Le système 4, qui appartient à cette zone, demande un coût d'investissement de 196 € par tonne d'ordures ménagères traitées, soit environ 76 € par habitant pour l'exemple de Yaoundé. Les villes des pays en développement auront du mal à mobiliser des financements pour mettre en œuvre un tel système. En somme, le système 4, bien que présentant dans certaines conditions (production de l'électricité utilisée par le système dans les centrales hydro-électriques) des avantages sur le plan environnemental, se trouve pénalisé du point de vue économique.

La zone III concerne les actions qui ont une performance environnementale médiocre et nécessitent un coût d'investissement élevé pour leur mise en œuvre. Les actions de cette zone sont donc répulsives sur les deux aspects économiques et environnementaux. Le système 3, qui appartient

à cette zone, demande un coût d'investissement moins important que le système 4 (99,6 €/tonne). Le compostage artisanal, bien qu'ayant un coût de revient plus réduit, ne peut pas être mis en œuvre à l'échelle des grandes villes, car il nécessiterait beaucoup d'espace (1 000 m²/tonne de déchets traités).

La zone IV regroupe les actions qui ont une mauvaise performance environnementale, mais qui demandent peu d'investissement pour la mise en œuvre. Le système 1 appartient à cette catégorie d'actions. Son coût d'investissement est faible (de l'ordre de 20 € par tonne de déchets traités) et peut facilement être mobilisé.

Par rapport à l'indicateur « coût de gestion du service », les seuils doivent être fixés de façon à permettre à la collectivité d'être en mesure d'assurer un fonctionnement durable du système. C'est ainsi que, pour qu'un système soit jugé performant économiquement suivant ce critère, il faudrait que son coût d'exploitation ne dépasse pas les recettes propres générées par la collectivité locale concernée, soit 5,8 € par habitant et 17,4 € par tonne pour le cas de Yaoundé. Le choix de ce seuil suppose que l'État continuera à subventionner le service de collecte des déchets de la ville; sinon il faudra réviser les montants et la forme de recouvrement de la taxe d'enlèvement des ordures ménagères pour atteindre un niveau de recettes voisin de ceux des villes de Douala ou Abidjan, soit 15 € par habitant et par an. Le seuil retenu ici représentera environ le tiers des recettes annuelles de la ville. Le seuil de performance environnementale reste stable. La figure n° 29 présente la répartition des quatre systèmes suivant leur performance environnementale et le coût de gestion.

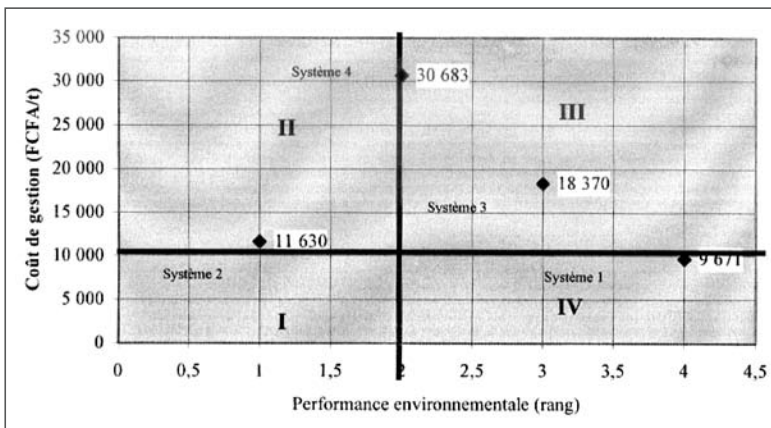


Figure 29 : Performance environnementale des différents systèmes étudiés en fonction des charges d'exploitation

Tout comme dans le cas précédent, le graphique de la performance environnementale en fonction du coût de gestion peut être divisé en quatre zones.

La zone I dans laquelle sont regroupées les actions qui affichent une bonne performance environnementale avec un coût d'exploitation faible. Le système 2 est reconnu comme le plus performant sur le double plan environnemental et économique. Le coût d'exploitation, calculé en prenant une hypothèse pessimiste de vente d'électricité (17 FCFA/kWh), est comparable à celui du système de référence.

La zone II concerne les actions ayant une bonne performance environnementale, mais nécessitant un coût de gestion élevé. Le système 4, qui appartient à cette zone, demande pour son exploitation 47 € par tonne d'ordures ménagères traitées, soit environ 17,3 € par habitant. Même au cas où la ville arriverait à tripler son niveau actuel de recettes, elle n'arriverait pas à couvrir les charges d'exploitation de ce système si la totalité des ordures ménagères de Yaoundé était traitée par cette filière.

La zone III correspondant aux actions qui ont une performance environnementale médiocre et nécessitent une charge d'exploitation élevée. Le système 3, appartenant à cette zone, demande une charge d'exploitation moins importante que le système 4 (28 €/tonne, soit 10,4 € par habitant). Il faudrait doubler le niveau actuel des recettes de la ville pour couvrir l'ensemble des charges d'exploitation de ce système, si la totalité des déchets était traitée par la filière de compostage.

La zone IV regroupe les actions qui ont une mauvaise performance environnementale, mais dont la charge d'exploitation est faible. Comme pour le critère précédent, le système 1 est le plus économique mais porte plus atteinte à l'environnement que les trois autres.

Au vu de cette analyse, le système 2 est le plus performant sur les plans économique et environnemental. Par rapport aux autres systèmes, il requiert peu d'investissement et son coût de gestion peut être, dans certaines conditions, plus favorable que le système de référence. Même dans l'hypothèse où seule la vente de l'électricité constituerait la source de recettes de l'unité de méthanisation, le coût de gestion résultant (17,7 €/tonne) reste modeste. Le système 4 qui, dans les conditions de Yaoundé, a une performance environnementale acceptable est pénalisé par son coût économique.

CONCLUSION

LE SERVICE D'ENLÈVEMENT DES ORDURES MÉNAGÈRES est un service public qui doit être rendu à tous. Pour des raisons d'équité et d'efficacité, une intervention sur la gestion des déchets solides urbains ne doit pas se limiter à un ou plusieurs quartiers, mais viser la desserte de tous les habitants. Ainsi, la précollecte organisée par des tiers (PME, association) est une alternative efficace pour augmenter le taux de desserte et couvrir l'ensemble de la ville y compris les quartiers pauvres.

Le premier facteur de durabilité d'une organisation du service d'enlèvement des ordures ménagères est celui de la durabilité de son financement. Les études de cas menées et les expériences fournies par la bibliographie montrent que les collectivités publiques (communes, État) restent de très loin la première source de financement du service. Le paiement direct du service par les usagers ne peut jouer qu'un rôle marginal à moins qu'il s'inscrive dans une planification et un système d'organisation bien étudié qui intègre, outre les acteurs de la société civile, les communes et l'État. Dans les villes où une telle organisation a accompagné les actions des PME et des associations, on est arrivé à financer jusqu'à 50 % le coût de gestion des ordures ménagères directement par les usagers. Il faut préciser qu'on ne peut mobiliser efficacement le financement direct des usagers qu'à l'amont de la filière, c'est-à-dire à la précollecte et à la gestion des points de stockage intermédiaire.

L'objectif d'un service de collecte des déchets est d'enlever et de neutraliser les quantités les plus grandes possibles à un coût réduit et dans un horizon temporaire donné. Cela implique que le service rendu soit mesuré en quantités enlevées plutôt qu'en volume ou surface du territoire desservi et que les autres résultats de valorisation ou de recyclage ne soient pas considérés comme des objectifs mais restent des retombées. Le nettoyage du domaine public, souvent considéré comme secondaire par rapport à la collecte, devrait constituer un objectif à part entière au sein d'un système de gestion des ordures ménagères, du fait de son impact ma-

jeur sur l'image urbaine et des effets induits sur la durabilité du système (crédibilité de la gestion du service, rôle éducatif).

Pour favoriser l'évolution des pratiques populaires relatives aux ordures ménagères, l'autorité publique ne doit pas se limiter uniquement aux activités de sensibilisation, qui sont certes nécessaires mais pas suffisantes. L'usage de l'autorité et de la sanction en matière d'hygiène étant devenu plus difficile depuis l'avènement de la démocratie dans la plupart des pays de la région, il convient d'imaginer des solutions plus réalistes, tenant compte des intérêts bien compris des différents partenaires. Par exemple, la rémunération des collecteurs au volume de déchets déposés dans les bacs permet de limiter le nombre de dépôts sauvage dans les quartiers.

Sur le plan environnemental et économique, il est préférable, dans le contexte des villes africaines, de ramasser les déchets en vrac pour les mettre en décharge et par la suite de récupérer et valoriser le biogaz qui est produit. Il faut préciser que cette solution se dégage comme meilleure uniquement par rapport aux quatre systèmes qui ont été analysés dans cet ouvrage. Par ailleurs, la mise en place d'un système efficace de traitement des lixiviats de décharge permettra de réduire le potentiel écotoxique de ce système, qui est actuellement l'une de ses faiblesses. La collecte traditionnelle et la mise en décharge des déchets bruts, telles qu'elles sont pratiquées actuellement dans toutes les villes d'Afrique de l'Ouest et du Centre, s'accompagnent d'une importante émission de gaz à effet de serre. Le compostage industriel, qui à priori semblait être le système le plus adapté, compte tenu de la forte présence de matière organique biodégradable, est pénalisé à cause de l'importance des investissements à mobiliser, d'un coût de gestion excessif et surtout de la forte consommation de carburant lors de la manutention et du transport du compost.

Le compostage à petite échelle constitue par ailleurs une solution plus intéressante sur le plan économique et environnemental, car il requiert des investissements plus modestes et le coût de traitement est beaucoup plus faible; il se limite essentiellement à la main-d'œuvre, qui est bon marché dans le contexte considéré. Mais la limite essentielle d'un tel système est qu'il demande trop d'espace, difficile à trouver dans les grandes villes comme Yaoundé, Cotonou, Ouagadougou, Libreville ou Dakar.

Une des limites de l'approche utilisée dans l'analyse est qu'elle est centrée uniquement sur les entrées et sorties matières et énergies des systèmes. On n'a pas pris en compte dans l'analyse les bénéfices agronomiques du compostage, qui représentent l'un des points positifs de ce système. En effet, le manque d'information sur la productivité des terres agricoles de la région fertilisée au compost nous a limités aux étapes de production de compost et de son transport jusqu'au lieu d'utilisation.

Les conclusions dégagées du travail présenté dans cet ouvrage sont aussi valables dans les autres grandes métropoles des pays tropicaux d'Afrique où la situation économique et sociale est comparable à la ville de Yaoundé. En effet, plusieurs autres grandes villes de la région comme Accra au Ghana, Abidjan en Côte d'Ivoire, Kinshasa au Congo, etc., sont aussi alimentées à partir des centrales hydro-électriques. Il est aussi important de noter que les résultats obtenus dans ce travail peuvent également servir de base aux négociateurs africains dans le cadre de la mise en œuvre des mécanismes financiers de la Convention cadre des Nations unies sur le changement climatique. En effet, les évaluations environnementales et économiques qui ont été faites permettent de dégager clairement dans le secteur des déchets les projets de développement à fort impact carbone pouvant servir de base de négociation pour la mise en œuvre des projets du MDP.

REMERCIEMENTS

Cet ouvrage est le fruit de dix années de travail de terrain et fait la synthèse des expériences de gestion des déchets solides municipaux dans les villes africaines. Ces travaux ont été rendus possible grâce à la contribution de plusieurs institutions au Cameroun, en Afrique et même à l'étranger.

Nous tenons à remercier toutes ces institutions qui ont soutenu financièrement les travaux de recherche ayant conduit à la publication de cet ouvrage. Nous pensons particulièrement au partenariat pour le développement municipal et au programme Solidarité Eau (PS – Eau) qui grâce au programme de recherche « gestion durable des déchets et de l'assainissement urbain » nous ont permis d'avoir les informations sur les expériences de gestion des déchets des autres villes et nous ont permis de réaliser les études de cas de précollecte au Cameroun. Nous remercions également le ministère français des Affaires étrangères qui a soutenu financièrement nos travaux de recherche action sur le terrain à travers le programme cité plus haut. Nous sommes reconnaissant au Service de coopération et d'action culturelle (SCAC) de l'ambassade de France au Cameroun qui a contribué à la réalisation des inventaires de déchets non ménagers dans la ville de Yaoundé, nous donnant ainsi l'opportunité d'expérimenter sur une ville les méthodes d'analyse proposées dans cet ouvrage. Le SCAC a par ailleurs financé les opérations de compostage artisanal dans les villes de Yaoundé, Garoua, Bafoussam, Nkongsamba et Bafang à travers le Fonds spécial de développement mis en place en 1994 après la dévaluation du franc CFA, nous donnant ainsi l'opportunité d'expérimenter les conditions de succès de ces techniques de traitement des déchets dans les villes du Cameroun.

Au Cameroun, la Communauté urbaine de Yaoundé, la Communauté urbaine de Douala nous ont appuyé pour la réalisation des campagnes de caractérisation des déchets dans ces deux villes. Par ailleurs le ministère de l'Environnement et des Forêts, à travers la réalisation des inventaires de gaz à effet de serre du Cameroun, nous a donné l'opportunité

de tester les techniques d'échantillonnage des déchets dans sept autres villes du Cameroun. La société Hygiène et Salubrité du Cameroun (HY-SACAM) nous a permis d'utiliser les sites de Douala et Yaoundé comme terrain d'expérimentation des travaux ayant conduit à la publication de cet ouvrage. Que ces acteurs trouvent à travers cette publication, nos remerciements sincères.

Nous ne saurons finir ici sans citer certaines personnes dont la contribution a été déterminante pour l'aboutissement de ce travail, sans être exhaustif, nous pensons spécialement à : Paul Vermande qui a accepté de préfacier cet ouvrage et nous a soutenu en permanence depuis 1992, Maguy Vermande qui a fait la relecture du manuscrit, Christophe Le Jallé et le réseau du programme Solidarité Eau (PSEau) et Félix Adegnika du partenariat pour le développement municipal (PDM) qui ont facilité la collecte des informations dans les autres villes d'Afrique de l'Ouest et de l'Afrique Centrale. Un remerciement spécial à Arthur Riedacker de l'Institut national de recherche agronomique (INRA), Henri Bosko Djeuda et tous les autres collègues du laboratoire Environnement et Science de l'Eau de l'École nationale supérieure polytechnique qui ont contribué activement aux travaux ayant conduit à la rédaction de cet ouvrage. Merci à tous ceux ou celles qui ont contribué indirectement à la rédaction de cet ouvrage.

Nos remerciements sont adressés également à l'Agence universitaire de la francophonie (AUF) et à son nouveau réseau de recherche « Environnement et développement durable » qui a contribué à l'édition cet ouvrage. Le pôle éditorial multimédia de l'université de technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM) qui édite cet ouvrage.

Emmanuel Ngnikam et Émile Tanawa

BIBLIOGRAPHIE

- ABUHGIIENDO ROLLAND TUM. *Maîtrise des entrées et sortie d'un centre de stockage d'ordures ménagères : cas de la décharge contrôlée de Nkolfoulou à Yaoundé*. Mémoire de fin d'étude d'ingénieur de conception option Génie civil de l'École nationale supérieure polytechnique de Yaoundé. Yaoundé 2004, 68 p.
- A.G.H.T.M. *Les résidus urbains : Collecte - Traitement - Nettoyement des voies publiques*. Collection I.P.E. (Industrie - Production - Environnement). Paris (France) : Technique et Document, 1975. 713 p.
- A.G.H.T.M. *Les résidus urbains : Collecte - Nettoyement des voies publiques*. Paris : Lavoisier, 1988. Vol. 1, 375 p.
- A.G.H.T.M. *Les résidus urbains : Traitement et Valorisation*. Paris : Lavoisier, vol. 2, 1988, 437 p.
- ACA. *Étude de pré-investissement du projet de collecte et de traitement des ordures ménagères dans la ville de Yaoundé*. Yaoundé : Société Nationale d'Investissement (SNI); avril 1994. 92 p. + annexes. Étude financée par l'ONUDI, projet n° SF/CAM/89/001.
- ADEME. *Modecom, Méthodologie de caractérisation des ordures ménagères*. Angers (France) : Agence de l'environnement et de la maîtrise d'énergie, Connaître pour Agir, guides et cahiers techniques, 1993, 60 p.
- ADEGNIKA F. et NGNIKAM E. *Étude sur la mise en place d'un système pérenne de collecte et de valorisation des déchets solides urbains à Libreville*. Étude commandée par le Projet forêt environnement, ministère de l'Économie forestière, des Eaux, de la Pêche, chargé de l'Environnement et de la Protection de la nature. Libreville, mars 2002, 93 p.
- AFD (Agence Française de Développement). *Revue comparative des modes de gestion des déchets solides dans différentes villes de la zone de solidarité prioritaire. Note de synthèse*. Paris, octobre 2001, 24 p.
- ADJAME N. *Contribution de la gestion et du traitement des déchets ménagers par compostage dans les conditions tropicales : Étude de cas de quelques quartiers de la ville de Cotonou - Bénin*. Mémoire ingénieur, École polytechnique fédérale de Lausanne (Suisse) : Institut du génie de l'environnement, 1994, 68 p.
- ANONYME. Methodology for evaluation of potential action to reduce the environmental impact of chemical substances. SETAC Europe, 1992, p. 73 -80.
- ANONYME. « La valorisation des déchets ménagers : installation de compostage pour déchets biologiques de Medemblick, Pays-Bas, rapport d'un voyage d'études ». In : *La lettre du Cadre territorial : La valorisation des déchets ménagers*, 1994, 27 p., réf 126 - 92-L.
- ANONYME. *Bilan des installations de traitement des ordures ménagères dans les villes marocaines*. Chapitre 3, Les installations de compostage, 1995, p. 35-67.
- BAMBARA A.R. « La collecte des ordures ménagères par les communautés de base à Wodogo : Du projet pilote aux micro-projets ». *Info CREPA (Centre régional pour l'eau potable et l'assainissement)*, oct.-nov.-déc. 1994, n° 6, p. 7-10.
- BAMBARA A.R. « Le centre de traitement des ordures ménagères de Tohoué ». *Info CREPA (Centre régional pour l'eau potable et l'assainissement)*, oct.-nov.-déc. 1994, n° 6, p. 11-12.
- BCEOM. *Rapport provisoire sur la rationalisation de la gestion des déchets solides à Ndjamena (Tchad)* : commune urbaine de Ndjamena et ministère français de la Coopération, juillet 1991, 140 p.
- BENANI M. « Bilan et perspectives d'une action à un niveau national, le cas du Maroc ». In : *Actes du Colloque international, Gestion des déchets ménagers dans les pays en développement*, 9-11 septembre 1987. Paris : RECCOOP, 1987, p. 147-160.
- BENGALY S. et DIARRA Yacouba. *Diagnostic des installations du biogaz au Mali*. Bamako (Mali) : AFRITEC, Rapport de mission (non publié), 1997, 8 p.
- BERTOLINI G., MORVAN B., BERTOLINI F. *L'organisation du tri des ordures ménagères dans les pays en développement*. Rapport d'étude réalisée pour le compte de l'ADEME, CEMAGREF, Rennes (France), mai 1996, 70 p. + annexes.
- BINGEMER H.G. and CRUTZEN P.J. « The production of methane from solid waste ». *Journal of Geophysical Research*, 1987, vol. D2, p. 2181-2187.
- BINTOU A. *Compostage et méthanisation des déchets et substrats végétaux disponibles en zone sahélienne et dans la ville de Ndjamena*. Thèse de doctorat (3^e cycle) : Faculté des sciences exactes de l'université de Ndjamena - Tchad, 1995, 150 p.

BLANC A. et ROUSSEAU P. *Electre IS appliquée à l'analyse du cycle de vie des systèmes énergétiques*. 43^e Journées du groupe de travail européen « Aide multicritère à la décision », Brest, France, 1996, p. 1-17.

BLANC-SOMMEREUX I. Assessment of the environmental impacts in life cycle analysis. Paper presented at the 3rd International Wood Preservation Symposium : INERIS (Institut de l'Environnement Industriel et des Risques), Halatte (France), Feb. 1995, 14 p.

BONHOMME M. « La fermentation méthanique associée à la combustion des refus : une valorisation énergétique intéressante des déchets urbains ». *Technique moderne*, jan.-fév. 1988, n° 1-2, p. 49-54.

BOUTIN et MOLINE. « Health and safety aspects of compost preparation and use ». In : DE BERTOLDI M., FERRANTI M.P., L'HERMITE P. et ZUCCONI F. (eds.) : *Compost : Production, Quality and Use*. Brussels and Luxembourg : Elsevier Applied Science, 1987, p. 1117-1125.

BRULA P., NAQUIN P. et PERRODIN Y. *Étude bibliographique des rejets des différentes techniques de traitement de résidus urbains*. Vol. 1 : *L'incinération et la décharge*. Lyon (France) : INSA Valor, Division Polden, ADEME (Angers), 1995 (a), 54 p.

BRULA P., NAQUIN P. et PERRODIN Y. *Étude bibliographique des rejets des différentes techniques de traitement de résidus urbains*. Vol. 2 : *Le compostage et la méthanisation*. Lyon (France) : INSA Valor, Division Polden, ADEME (Angers), 1995 (b), 74 p.

CAMOBRECO V., HAM R., BARLAZ M., REPA E., FELKER M., ROUSSEAU C., RATHLE J. « Life-cycle inventory of a modern municipal solid waste landfill ». *Waste Management & Research, printed in UK*, 1999, n° 17, p. 394-408.

CIEH. *La filière biogaz - compost en Haute-Volta. Les travaux et réalisations du CIEH*. Ouagadougou (Burkina Faso) : CIEH, 1983, 10 p. Plaquette de présentation.

CIPCRE. *Projet pilote de compostage décentralisé des ordures ménagères dans la ville de Bafoussam* : (CIPCRE), 1997, 70 p. Rapport d'exécution de projet (non publié).

CIPRE. *Valorisation des déchets plastiques de Yaoundé (Cameroun)*. Plaquette de présentation du projet d'organisation d'une collecte sélective à vocation socio-économique. GRET, Coopération française. Yaoundé, 1998, 24 p.

CLIP. « Déchets énergie, environnement : Étude prospective du potentiel de déchets mobilisables à des fins énergétiques en France à l'horizon 2020 ». *Les cahiers du CLIP*, juillet 1996, n° 5, 98 p.

CPSS et AFVP. *Rapport de clôture du projet de compostage des ordures ménagères et maraîchage périurbain à Garoua*. Garoua : AFVP, Mission française de coopération, 1997, 36 p. + annexes.

DALZELL H.W., BIDDLESTONE A.J., GRAY K.R. et THURAIRAJAN K. *Soil management : compost production and use in tropical and subtropical Environment*. FAO, Soil Bulletin n° 56. Rome, Italy : Food and Agriculture Organisation of the United Nations, 1987, 83 p.

DE BERTOLDI M., FERRANTI M.P., L'HERMITE P. et ZUCCONI F. *Compost : production, quality and use*. Brussels and Luxembourg : Elsevier Applied Science, 1987, 163 p.

DE BERTOLDI M., VALLINI G. et PERA A. *The biology of composting : A review, Waste Management and Research*, 1983, vol. 1, p. 157-176.

DE BERTOLDI M., ZUCCONI F. and CIVILINI M. « Temperature, pathogen control and product quality ». *Biocycle*, February 1988 n° 7, P 43-50.

DE LA TORE LOZANO I. *Contribution à l'étude cinétique de la phase acidogène de la fermentation méthanogène*. Thèse : Génie Biochimie, Institut national des sciences appliquées de Toulouse, 1979, 207 p.

DE LAUZANNE R. *Les exigences de qualité pour la commercialisation des composts d'ordures ménagères*. Symposium international « Valorisation des déchets ». Paris, 22-24 avril 1986, p. 45-46.

DE LE CROIX P., SAINT JOLY C. « Anaerobic digestion of Municipal Solid Waste with Valorga Process, Industrial results ». In : *The seventh International Conference on Solid Waste Management and Secondary Materials*. Philadelphia. Nov. 10-13, 1991, 6 p.

DE MUYNCK M., NYNS E.J et PALZ W. *Installation de biogaz en Europe. Un guide pratique. (Énergies renouvelables. Recherche sur l'énergie auprès des communautés européennes)*. Bruxelles : Pyc Édition. 1987, 65 p.

DEWALLE F.B., CHIAN E.S., HAMMERBERG E. « Gas production from solid wastes landfills ». *Journal of the environmental Engineering Division*, 1988, vol. 104. p. 415-432.

- DJEUDJEU KEMETCHA B. *Contribution à l'expertise d'une décharge dans un PED : cas de la décharge contrôlée de Nkolfoulou*. Mémoire de fin d'étude d'ingénieur, ENSP/LESEAU. Septembre 2005. 107 p. + annexes.
- DIALLO S. et COULIBALY Y. « Les déchets urbains en milieu démuni à Bamako ». *Environnement africain*, 1990, vol. 8, n° 29-30, p. 163-69.
- EMCOM ASSOCIATE. *Methane generation and recovery from landfills*, Ann Arbor Science, Ann Arbor, MI. 1980, p. 23-34.
- Life cycle analysis. Symposium in Potsdam, 25-26 June 1992*, Organised by SETAC - Europe. IVL Report n° B1063, IVL, Stockholm, Sweden.
- FINNVEDEN G. *Methods for describing and characterising resource depletion in the context of Life Cycle Assessment*. Stockholm (Sweden) : Swedish Environmental Research Institute, 1994, 37 p.
- FINNVEDEN G., ANDERSSON-SKOLD Y., SAMUELSSON M., ZETTERBERG L. et LINDFORDS L.G. « Classification (Impact Analysis) in connexion with life cycle assessment : A preliminary study ». In : *Product Life Cycle Assessment, Workshop Report, 25-26 June 1992*. Postdam (Germany) : SETAC Europe. p. 172-231.
- GIEC. *Lignes directrices révisées du GIEC pour les inventaires des gaz à effet de serre*. HOUGHTON J.T., GYLIAN MEIRA FILHO L., GRIGGS D.J. et KATHY M. (eds.), Volume 2 : document de base. Genève (Suisse) : Groupe d'Expert Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC), OMM, PNUE, 1996. Section 6 : « déchets ». p. 6.1-6.65.
- GIEC. *Lignes directrices révisées du GIEC pour les inventaires des gaz à effet de serre*. HOUGHTON J.T., GYLIAN MEIRA FILHO L., GRIGGS D.J. et KATHY M. (eds.), Volume 3 : manuel de référence. Genève (Suisse) : Groupe d'Expert Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC), Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM), Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE). 1996. Section 6 : « déchets ». p. 6.1-6.40.
- GIEC. *Stabilisation des gaz atmosphériques à effet de serre : conséquences physiques, biologiques et socio-économiques*. HOUGHTON J.T., GYLIAN MEIRA FILHO L., GRIGGS D.J. et KATHY M. (eds.), Document technique III du GIEC. Genève (Suisse) : Groupe d'Expert Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC), Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM), Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE), 1997, 54 p.
- GIEC. *Techniques, politiques et mesures d'atténuation des changements climatiques*. HOUGHTON J.T., GYLIAN MEIRA FILHO L., GRIGGS D.J. et KATHY M. (eds.), Document technique I du GIEC. Genève (Suisse) : Groupe d'Expert Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC), Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM), Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE), 1997, 52 p.
- GILLET R. *Traité de gestion des déchets solides et son application aux pays en voie de développement*. Copenhague : PNUD, OMS, 1985, vol. 1. 397 p.
- GILLET R. *Traité de gestion des déchets solides et son application aux pays en voie de développement*. Copenhague : PNUD, OMS, 1985, vol. 2. 537 p.
- GIROUD G. « Biogaz, une chance pour la valorisation des déchets urbains ». *Gaz d'aujourd'hui, Revue de l'Association technique de l'industrie du gaz en France*. 110^e année, oct. 1986, n° 10, p. 381-384.
- GOLUEKE C.G. et DIAZ L.F. « Understanding the basics of composting ». *Biocycle*, April 1990, n° 31, p. 56-9.
- HÉDUIT M. *La filière biogaz dans les pays en voie de développement*. Institut de l'Énergie des Pays ayant en commun l'usage du Français (IEPF), Agence de Coopération Culturelle et Technique (ACTT). Québec - Canada : Collection Études et Filières, oct. 1993, 82 p.
- HEIJUNGS R. Guinée J.B., Huppés G. et al. *Environmental Life Cycle Assessment of Products. Guide and Background*. Leiden (The Netherlands) : Centre of Environmental Studies, Leiden University, 1992.
- HOFSTETTER P. *Weighing of different environmental problems*. Paper presented at « Environmental Life Cycle Assessment and its Application », Amsterdam, 9-10 June, 1993. Organised by the Centre of Environmental Studies, Leiden University (The Netherlands). Non paginé.
- LA FARGE (de) B. *Economics of biogas technology*. In : *Study of new biogas developments in the Asia and Pacific Region*. O.N.U United Nation, Economic and Social Commission for Asia and the Pacific (ESCAP), New York, 1990. P 58-67.
- LA FARGE (de), B. *Le biogaz, Procédés de fermentation méthanique*. Paris, Masson, 1995, 231 p.
- MAYSTRE L.Y., PICTET J. et SIMOS J. *Méthodes multicritères* Electre. Lausanne (Suisse) : Presses universitaires romandes, 1994, 323 p.

MUSTIN M. *Le compost, gestion de la matière organique*. Paris : François Du Busc, 1987, 954 p.

NAVARRO A. « Gestion et traitement des déchets ». In : *Collection Les techniques de l'ingénieur. Traités Généralités et Construction*. Section A8660 - C4260, 1992, 32 p.

NDOUMBE N'KOTTO H., NGNIKAM E. et WETHE J. « Le compostage des ordures ménagères : l'expérience du Cameroun après la dévaluation du franc CFA ». *Bulletin africain Bioressources Énergie Développement et Environnement*, n° 4, Dakar, 1995, p. 4-10.

NGNIKAM E. *Contribution à l'élaboration de méthodologies de caractérisation des DIB en mélange et des refus de tri de DIB*. Mémoire de DEA, Sciences et Techniques de déchets, LAEPSI et INSAVALOR, Division Polden, juillet 1996. 53 p. + annexes.

NGNIKAM E. *Deux propositions pour une gestion optimisée des ordures ménagères de Yaoundé. Le compostage et station de transit*. Mémoire de fin d'étude d'ingénieur de Génie urbain. École nationale supérieure polytechnique de Yaoundé, juin 1992 (a), 140 p.

NGNIKAM E. *La situation de la collecte et du traitement des ordures ménagères de Yaoundé. Bilan et expérience d'une société privée*. Rapport de stage effectué auprès de la société Seca de juin à juillet 1992 (b), 56 p. (non publié).

NGNIKAM E., ROUSSEAU P., TANAWA E. et GOURDON R. « Multicriteria analysis for environmental assessment of solid waste management systems in tropical african cities : case study of Yaoundé (Cameroun) ». *Journal of decision systems*, vol. 11, n° 3-4/2002. December 2002, p. 479-498.

NGNIKAM E., ROUSSEAU P., TANAWA E., RIEDACKER A. et GOURDON R. « Evaluation of the potentialities to reduce greenhouse gases (GHG) emissions resulting from various treatments of municipal solid waste (MSW) in moist tropical climates : application to Yaounde ». *Waste Management and Research*, vol. 20, n° 6, December 2002, p. 501-513.

TANAWA E., BOSKO DJEUDA TCHAPNGA H., NGNIKAM E., WETHE J. « La propreté urbaine dans une grande ville d'Afrique centrale : le cas de Yaoundé au Cameroun ». In : BOTTA H., BERDIER C. et DELEUIL J.-M. « Enjeux de la propreté urbaine », *Presses polytechniques universitaires romandes. Lausanne (Suisse)*, janvier 2002, chapitre 8. p. 125-144.

NGNIKAM E. et TANAWA E. *Inventaire national de gaz à effet de serre du Cameroun : Secteur déchets*. Yaoundé : ministère de l'Environnement et des Forêts et Environnement Recherche Action au Cameroun (ERA - Cameroun), août 1998, 17 p. + annexes.

NGNIKAM E. *Guide de fabrication artisanale de compost au Cameroun*. Yaoundé : Fondation friedrich Ebert, 1993, 54 p. + annexes.

NGNIKAM E., NDOUMBE N'KOTTO H., WETHE J. *Mise en place de dix compostières dans les quartiers de Yaoundé : animation et participation de la population*. Réseau africain du Compost, compte rendu de la première conférence, 20-24 avril 1995 à Dakar (Sénégal). Éd. M. Seck, Dakar, 1997, p. 31-60.

NGNIKAM E., VERMANDE P. et ROUSSEAU P. « Traitement des déchets urbains. Une unité de compostage des ordures ménagères dans un quartier à habitat spontané à Yaoundé - Cameroun ». *Cahiers Agriculture*, 1993, n° 2, p. 264-269.

NGNIKAM E., VERMANDE P. et WETHE J. « Une méthode d'évaluation de la production des déchets dans les marchés des villes africaines : l'exemple de Douala et de Yaoundé au Cameroun ». *Bulletin africain Bioressources Énergie Développement et Environnement*, 1995, n° 4, p. 11-18.

NGNIKAM E., VERMANDE P., TANAWA E., WETHE J. Une démarche intégrée pour une gestion des déchets solides urbains au Cameroun. *Déchets Sciences et Techniques*, n° 5, 1997, p. 22-34.

NGNIKAM E., WETHE J., TANAWA E., RIEDACKER A. « Composting of household waste to clean streets and increase crop yields in Yaounde : a solution for poor african cities ». In : *Sustainable agriculture for food, energy and industry*. Vol 2 : *Strategies towards achievement*. EL BASSAM N., BEHL R.K., PROCHNOW B. (eds). London (UK) : James & James (Science publishers) Ltd, 1998, p. 1286-1291.

PINEAU J.L. « L'échantillonnage secondaire : une phase importante de l'échantillonnage ». *Recyclage Magazine*, avril 1995, n° 43, p. 49-53.

PINEAU J.L. « Théories de l'échantillonnage ». *Recyclage/Récupération*, octobre 1994, n° 37, p. 59-61.

PSEAU et PDM. *Gestion durable des déchets et de l'assainissement urbain*. Cosne-sur-Loire : IMP Graphic, mars 2004, 191 p.

- PDM. *Annuaire de la gestion des déchets solides en Afrique de l'Ouest et du Centre*. Partenariat pour le développement municipal, Cotonou (Bénin), février 2003, 95 p.
- RAGGI, A. « Technological options and cost of municipal solid waste disposal and recycling ». In : *The Management of Municipal Solid Waste in Europe : Economic, Technological and Environmental Perspectives*. OUADRIO CURZIO A., PROSOERETTI L. et ZOBOLI R. (ed.). Amsterdam : Elsevier Applied Science, 1994, p. 41-64.
- RAJAOMANANA H. *Gestion et traitement des déchets ménagers dans les pays en voie de développement : Étude de cas de la ville d'Antananarivo (Madagascar)*. Thèse doct. ing. : Institut national des sciences appliquées de Lyon, 1996, 152 p.
- ROUSSEAU P. « Analyse de cycle de vie : Évaluation des impacts ». *Technique de l'ingénieur, traité Génie industriel*, 1998, G5 605, p. G5605-1 - 5605-13.
- ROUSSEAU P. *Évaluation comparative de l'impact environnemental global (ECIEG) du cycle de vie des produits*. Thèse de doctorat, Gestion et traitement des déchets. Institut national des sciences appliquées de Lyon. 1993, 276 p.
- ROUSSEAU P. *Les métaux lourds dans les ordures ménagères : origines, formes chimiques, teneurs*. Commission des communautés européennes (DG XII), R&D Programme on Recycling and Utilisation of Waste, December 1988, 123 p.
- ROY B. et BOUYSSOU D. *Aide multicritère à la décision : méthodes et cas*. Université de Paris-Dauphine, LAMSAD, 1993, 250 p.
- ROY B. *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*. Paris : édition Economica, 1985, 432 p.
- ROY B. et SKALKA J.M. *Electre IS*. Université de Paris-Dauphine, Laboratoire d'analyse et modélisation des systèmes pour l'aide à la décision. Document 30, 1994, 119 p.
- SAMPLE B.E., OPRESKO D.M. et SUTER II G.W. *Toxicological Benchmarks for Wildlife : 1996 Revision*. Oak Ridge, Tennessee 37831 (USA) : Risk Assessment Program and US Department of Energy, Office of Environmental Management, 1996, 43 p. + annexes. ES/ER/TM-86/R3.
- SCHAEGER M., BASTIDAS J. « Rôle et fonctionnement des décharges dans les agglomérations des pays en voie de développement ». *T.S.M. - L'eau*, mai 1988, n° 5, p. 279-293.
- SCHERTENLIEB R. et MAYER W. « Municipal Solid waste management in Developing countries : problems and issues; Need for future Research ». *EAWAG news*, July 1991, n° 30/31, p. 6-12.
- TA THU THUY. « Pour une gestion efficiente des déchets dans les villes africaines : les mutations à conduire ». *Les Cahiers du PDM (Programme de Développement Municipal)*, janvier 1998, n° 1, 59 p.
- TANAWA E. et NGNIKAM E. *Programme « Gestion durable des déchets et de l'assainissement urbain », comment aller plus loin dans le cas du Cameroun ?* Acte de colloque organisé à Yaoundé du 2 au 4 novembre 2003. Yaoundé, février 2004, 123 p.
- THORNELOE S.A., PEER R.L., CAMPBELL D.L. and KEPFORD K.S. *Proposed Methodology for Estimating global Landfill Methane Emission*. US EPA and Radian Corporation, Research Triangle Park, North Carolina, Jan. 1991, 63 p.
- VALORGA. *La filière méthanisation des déchets organiques et le procédé Valorga*. Amiens (France). Document de présentation du procédé Valorga, juin 1995, 23 p.
- VERMANDE P., NGNIKAM E., TCHANGANG R.F. et BADA G.A. *Étude de gestion et des traitements des ordures ménagères de Douala (Cameroun)*. Yaoundé : École nationale supérieure polytechnique (ENSP), Communauté Urbaine de Douala (CUD), vol. 1 et 2, avril 1995, 340 p.
- VERMANDE P., NGNIKAM E. et WETHE J. *Étude de gestion et des traitements des ordures ménagères de Yaoundé (Cameroun)*. École nationale supérieure polytechnique (ENSP), vol. 1 et 2, juillet 1994, 320 p.
- VERMANDE P., NGNIKAM E. *Étude de préféabilité pour une entreprise de gestion et de traitement des déchets urbains à Yaoundé*. Yaoundé : SNH (Société Nationale des Hydrocarbures) et Pépinière d'entreprise de l'ENSP. Novembre 1994, 131 p. + annexes.
- WAAS E., ADJADEME N., BIDAUX A. et al. *Valorisation des déchets organiques dans les quartiers populaires des villes africaines*. Genève, Suisse : Fonds national suisse de la recherche scientifique; Module 7 Développement et Environnement. Étude réalisée par Alter Ego en collaboration avec le CREPA, l'IAGU et SANDEC, 1996, p. 30-50.

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ACV : Analyse de Cycle de Vie
ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
AFD : Agence Française de Développement
ANG : Acteurs Non Gouvernementaux
AUF : Agence Universitaire de la Francophonie
CENEEMA : Centre National d'Etudes et d'Expérimentation du Machinisme Agricole
CIEH : Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques
CIPRE : Cercle International de Promotion de la Récupération
CIRAD : Centre International de Recherche Agronomique pour le Développement
COGEDA : Coordination des Structures de Gestion des Déchets et de l'Assainissement
CREPA : Centre Régional pour l'Eau Potable et l'Assainissement à faible coût
DIB : Déchets Industriels Banals
DIS : Déchets Industriels Spéciaux
DMS : Déchets Ménagers Spéciaux
DSCN : Direction des Statistiques et de la Comptabilité Nationale
DSM : Déchets Solides Ménagers
ENSP : Ecole Nationale Supérieure Polytechnique
EPFL : Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
ERA – Cameroun : Environnement Recherche Action au Cameroun
FAO : Organisation Mondiale pour l'Alimentation
GIC : Groupe d'Initiative Commune
GIE : Groupe d'Intérêt Economique
HYSACAM : Hygiène et Salubrité du Cameroun
INRA : Institut Nationale de Recherche Agronomique
MDP : Mécanisme de développement propre
NAEMA : Nomenclature des Activités des Etats Membres de l'Afristat
O.M : Ordures Ménagères
ONG : Organisation Non Gouvernementale
PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur
PDM : Partenariat pour le Développement Municipal
PDU : Programme de développement urbain
PED : Pays en Développement
PME : Petite et Moyenne Entreprise
pS Eau : Programme Solidarité Eau
SCAC : Service Coopération et d'Action Culturelle (Ambassade de France)
SNG : Structure Non Gouvernementale
TeCO₂ : Tonne équivalent gaz carbonique
TEOM : taxe d'enlèvement des ordures ménagères
Tep : tonne équivalent pétrole
UMOA : Union Monétaire Ouest Africaine

TABLE DES MATIÈRES

PRÉFACE	7
INTRODUCTION GÉNÉRALE	11
CHAPITRE 1	
LES FILIÈRES DE TRAITEMENT DES DÉCHETS ET LEUR APPLICATION À LA GESTION DES ORDURES MÉNAGÈRES	15
Définition des concepts	16
<i>Définition du déchet</i>	16
<i>Les déchets ultimes</i>	18
<i>La valorisation</i>	18
<i>Notion de transferts de pollution</i>	19
Présentation des vingt filières de traitements des déchets	19
<i>Description des filières de valorisation</i>	21
<i>Les filières de traitement</i>	22
<i>Éléments de choix d'un procédé de traitement</i>	22
Filières de traitement applicable à la gestion des ordures ménagères	23
<i>Caractéristiques des ordures ménagères</i>	23
La densité	23
L'humidité	24
Le pouvoir calorifique	24
Le rapport carbone/ azote	24
<i>Application des filières de traitement à la gestion des ordures ménagères</i>	25
Présentation de la valorisation énergétique	28
Présentation de la valorisation matière	30
Présentation des filières de valorisation en sciences des matériaux	31
<i>Verre et céramique</i>	31
<i>Matières plastiques</i>	32
<i>Les fibres cellulosiques de récupération</i>	34
La mise en décharge des déchets	35

CHAPITRE 2

PRATIQUES ACTUELLES DE GESTION DES ORDURES MÉNAGÈRES

DANS LES VILLES DES PAYS EN DÉVELOPPEMENT	39
La collecte traditionnelle	39
<i>La précollecte</i>	40
La précollecte par apport volontaire des producteurs	41
La précollecte organisée par des tiers	44
<i>L'organisation technique du service de précollecte</i>	47
<i>Les causes d'échec et les problèmes rencontrés</i>	48
<i>La collecte</i>	60
Matériels à traction humaine ou animale	60
Les véhicules à traction mécanique	61
<i>Le transport des ordures ménagères</i>	65
<i>La mise en décharge</i>	66
Les filières de traitement appliqué dans les villes	
des pays en développement	70
<i>La récupération et le recyclage</i>	70
<i>La pratique du compostage des ordures ménagères</i>	
<i>dans les pays en développement</i>	71
Aspects théoriques du compostage	71
<i>Processus de dégradation aérobie de la matière organique</i>	71
<i>Les paramètres pouvant influencer le processus de compostage</i>	72
<i>Caractéristiques du compost</i>	73
<i>Aspects hygiéniques et environnementaux du compostage</i>	75
Les expériences de compostage des ordures ménagères	76
dans les pays en développement	76
<i>Les expériences de compostage à petite échelle</i>	
<i>ou compostage artisanal</i>	76
<i>Les installations semi-industrielles</i>	78
<i>Le compostage industriel</i>	78
<i>Pratique de la méthanisation dans les pays en développement</i>	82
Aspects théoriques de la méthanisation	82
<i>Le processus de dégradation anaérobie</i>	82
<i>Les principaux paramètres influençant le processus de méthanisation</i>	84
<i>Caractéristiques du biogaz</i>	84
<i>La valeur énergétique du biogaz</i>	85
<i>Aperçu sur les technologies de méthanisation existant</i>	
<i>dans les pays en développement</i>	86

Les expériences de méthanisation de substrat à forte charge de matière sèche dans le monde, en Afrique et au Cameroun	87
<i>Le cas du Cameroun [Minka et Nzié, 1983]</i>	88
<i>Le cas du Mali [Bengaly et Diara, 1997]</i>	89
<i>Le cas du Burkina Faso [Hédouit, 1993]</i>	89
<i>Les autres pays d'Afrique de l'Ouest</i>	90
Financement de la gestion des déchets	91
<i>Les besoins de financement de la filière</i>	92
<i>Les mécanismes de financement envisageables pour la gestion des déchets</i>	96
CHAPITRE 3	
APPROCHES D'ÉVALUATION DE FLUX ET CARACTÉRISATION DES DÉCHETS	103
Revue des méthodes d'évaluation de flux et caractérisation des déchets ménagers	103
<i>Les stratégies d'identification des déchets solides ménagers</i>	104
<i>Conception d'une campagne d'identification</i>	105
La préparation de la campagne	105
<i>Stratification des zones d'apport des déchets</i>	106
<i>Connaissance de la pratique existante</i>	106
<i>Détermination de la masse minimale de l'échantillon</i>	106
Organisation d'une campagne d'identification des déchets	110
<i>Mesure d'hygiène et de sécurité</i>	110
<i>Aménagement du centre ou de l'aire de tri</i>	111
<i>Le choix des bennes de collecte à échantillonner</i>	111
<i>Prélèvement de l'échantillon à trier</i>	112
<i>Le tri manuel des déchets de l'échantillon</i>	113
<i>Détermination de l'humidité par rapport au poids humide des composants</i>	115
<i>Calcul de la composition de l'échantillon (QMER)</i>	116
<i>Calcul de la composition moyenne des ordures ménagères de la zone d'étude</i>	117
Application de ces méthodes pour la caractérisation des déchets ménagers de sept villes du Cameroun	120
<i>Stratification de la ville en vue de la caractérisation des déchets</i>	120
<i>Zone 1 : habitat de haut standing et zone administrative</i>	120
<i>Zone 2 : habitat de moyen standing</i>	121
<i>Zone 3 : habitat spontané très dense</i>	121
<i>Zone 4 : zone périurbaine en voie de densification</i>	121
Délimitation des différents tissus urbains sur le terrain	121
<i>Prélèvement de l'échantillon primaire</i>	122

<i>Prise d'échantillon secondaire</i>	122
<i>Tri de l'échantillon secondaire</i>	122
<i>Évaluation de la production de déchets ménagers</i>	124
Choix des villes à enquêter	124
Méthodologie d'évaluation	125
Production des déchets ménagers	126
Caractéristiques des déchets ménagers	128
Identification des déchets non ménagers	130
<i>Méthodologie de collecte des données</i>	131
Établissement de la base de sondage	132
<i>Stratification des unités de production</i>	132
<i>Élaboration de la base de sondage</i>	135
Constitution de l'échantillon	136
Élaboration du questionnaire	138
Administration du questionnaire	138
Les facteurs explicatifs utilisés pour l'extrapolation des résultats	139
Production et caractéristiques des déchets solides non ménagers	140
<i>Le cas des déchets industriels générés à Yaoundé au Cameroun</i>	140
Nature des déchets solides industriels	143
<i>Les déchets fermentescibles</i>	144
<i>Les DIB en mélange</i>	145
<i>Les boues de vidange des fosses septiques</i>	145
<i>Les déchets de papiers et cartons</i>	145
<i>Les déchets spéciaux produits par les hôpitaux</i>	145
<i>Les déchets de bois, copeaux et sciures</i>	146
<i>Les déchets alimentaires</i>	146
<i>Les autres déchets solides</i>	146
<i>Les déchets industriels spéciaux (DIS)</i>	147
Destination des déchets industriels	147
<i>Production de déchets solides par des activités informelles</i>	151
CHAPITRE 4	
CADRE INSTITUTIONNEL ET RÉGLEMENTAIRE DE LA GESTION DES DÉCHETS DANS QUELQUES PAYS D'AFRIQUE DE L'OUEST ET DU CENTRE	157
Les acteurs institutionnels	158
<i>Les institutions chargées de la planification et de la gestion des interfaces</i>	158
<i>Les institutions décentralisées chargées de la mise en œuvre des politiques : les collectivités décentralisées</i>	158

Les acteurs non gouvernementaux (ANG)	159
Les associations	159
Les sociétés coopératives et les groupes d'initiatives communes	160
Les organisations non gouvernementales locales	161
Les petites et moyennes entreprises	161
<i>Les bailleurs de fonds extérieurs</i>	161
Analyse des rôles de ces acteurs	162
<i>Les acteurs institutionnels</i>	162
<i>Les acteurs non gouvernementaux (ANG)</i>	163
<i>Les usagers</i>	164
<i>Les sociétés privées à but lucratif</i>	164
Jeu des acteurs dans la gestion des déchets	166
Cadre réglementaire	168
<i>Les textes fixant le cadre de gestion des ordures ménagères</i>	168
<i>Les textes relais au financement de la collecte et de la gestion des déchets</i>	170
<i>Les textes relatifs à la propreté, l'hygiène et la salubrité publique</i>	171
CHAPITRE 5	
QUELLES FILIÈRES DE TRAITEMENT DES DÉCHETS POUR LES PAYS EN DÉVELOPPEMENT?	175
Objectifs et champ de travail	176
<i>Définition des frontières</i>	177
<i>Définition de l'unité fonctionnelle</i>	180
Inventaire des entrées et sorties des quatre systèmes de gestion des déchets	182
<i>Description des différents systèmes</i>	182
Description technique des méthodes de collecte et de transport	183
<i>La précollecte</i>	183
<i>La collecte et le transport des ordures</i>	186
<i>Autres étapes de transport des systèmes considérés</i>	187
<i>Description technique du traitement par compostage</i>	188
Présentation générale du procédé artisanal de compostage	188
Description technique et identification des rejets générés par le système de compostage industriel	191
Choix de procédés adaptés au contexte considéré	192
Description des chaînes de traitement des déchets par méthanisation	193

Description des équipements et du fonctionnement d'une décharge	196
Élaboration des bilans matières énergies	196
<i>Profil des données utilisées pour effectuer le bilan de l'étape de collecte et de transport des déchets</i>	197
<i>Établissement du bilan matière énergie du système de traitement par compostage</i>	199
Profil des données utilisées pour l'établissement du bilan	199
Profil des données utilisées pour l'élaboration du bilan matière énergie du compostage industriel	201
<i>Consommation des matières</i>	201
<i>Les données sur la consommation d'énergie</i>	203
<i>Profil des données à utiliser pour l'établissement du bilan matière énergie de la chaîne de traitement par méthanisation utilisant le procédé « Valorga »...</i>	206
<i>Données énergétiques</i>	208
<i>Profil des données utilisées pour l'établissement de bilan matière énergie de la mise en décharge avec ou sans récupération du biogaz</i>	209
 Analyse comparative des bilans	 214
 Évaluation des impacts des rejets des différents systèmes	 218
<i>Classification des flux issus de l'inventaire par classe d'impact</i>	218
<i>Caractérisation des impacts</i>	220
<i>L'épuisement des ressources naturelles</i>	220
<i>L'effet de serre</i>	222
<i>Toxicité et écotoxicité</i>	225
Évaluation de l'impact toxique et écotoxique	225
<i>Évaluation des notes d'exposition</i>	226
<i>Évaluation des paramètres d'effet</i>	227
<i>Évaluation de l'impact toxique et écotoxique de chaque système</i>	227
Acidification	229
Eutrophisation	230
<i>Impact du confinement des déchets</i>	232
 Comparaison des impacts environnementaux des différents systèmes	 233
<i>Évaluation des actions potentielles suivant les différents (matrice d'évaluation)</i>	233
<i>Choix des poids des différents critères et des seuils</i>	235
Pondération des critères	235
Choix des seuils	236
<i>Utilisation de la méthode Electre III pour l'évaluation des actions</i>	237
Établissement des matrices de concordance par critère	237

Détermination de la matrice de concordance globale	238
Détermination de la matrice de discordance par critère	239
Relation de surclassement flou	239
Exploitation de la relation de surclassement flou	240
<i>Distillation descendante et ascendante</i>	241
<i>Utilisation de la méthode Electre IS pour l'évaluation des actions</i>	244
<i>Analyse de la sensibilité et de la robustesse</i>	245
Analyse des différents systèmes sur le plan environnemental	246
Action intermédiaire : la méthanisation des déchets en réacteur suivant le process Valorga (a_4)	247
Coûts des différents systèmes de gestion des déchets	248
 Comparaison économique et environnementale des différents systèmes	 252
CONCLUSION	257
 Remerciements	 262
 Bibliographie	 263

LISTE DES PHOTOS

Photo 1 : Un casier d'une décharge traditionnelle en cours d'exploitation	36
Photo 2 : Dépôt sauvage de déchets dans un quartier	36
Photo 3 : Stockage des déchets à domicile à Melen IV à Yaoundé (Cameroun) .	41
Photo 4 : Un dépôt à même le sol à Foumban (Cameroun)	42
Photo 5 : Déversement des déchets dans un bac de 6 m3 à Yaoundé	43
Photo 6 : Dépôt d'ordures à côté du bac à Foumban (Cameroun)	43
Photo 7 : Charrette à traction animale (Nouakchott) (photo Temniya)	60
Photo 8 : Charrette à traction humaine (pousse-pousse Yaoundé (Cameroun) ..	61
Photo 9 : Un tracteur agricole en action à Ouagadougou (Burkina Faso) (photo Temniya)	62
Photo 10 : Une benne ville de Paris sur le pont bascule à la décharge de Yaoundé (photo Djeutcheu K.B.S.)	63
Photo 11 : Une benne grue sur la décharge de Yaoundé (photo Djeutcheu K.S.B.)	63
Photo 12 : Benne porte coffre	64
Photo 13 : Benne amplirolle	64
Photo 14 : Benne à compaction	64
Photo 15 : Un casier en cours de construction à la décharge de Yaoundé	66
Photo 16 : Échantillonnage des déchets industriels sur une décharge en France (photo des auteurs)	112
Photo 17 : Tri des déchets au sol	114
Photo 18 : Tri sur table	114

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Typologie des déchets	17
Tableau 2 : Filières de traitement des déchets [Navarro, 1992]	20
Tableau 3 : Composition (en trois grandes classes) des ordures ménagères de quelques villes sous différents tropiques [Ngnikam <i>et al.</i> , 1998; Tha Thu Thuy, 1998; Rajaomanana, 1996; Gillet, 1985]	25
Tableau 4 : Application des filières de traitement sur la gestion des ordures ménagères	26
Tableau 5 : Synthèse des expériences de précollecte des ordures ménagères dans les PED [Fouad Zahrani, 2002]	45
Tableau 6 : Composition (en mg/l) des lixiviats de décharges d'ordures ménagères mixtes (OM et déchets industriels banals) [Brula <i>et al.</i> , 1995; Tchangang, 1994]	69
Tableau 7 : Paramètres pouvant influencer le processus de compostage	73
Tableau 8 : Composition moyenne de compost d'ordures ménagères	74
Tableau 9 : Caractéristique des méthodes artisanales de compostage et les lieux où elles ont été utilisées [Ngnikam, 2000]	77
Tableau 10 : Amélioration des procédés de compostage en vue de les adapter à la nature des déchets des villes marocaines	81
Tableau 11 : Paramètres pouvant influencer le processus de méthanisation	84
Tableau 12 : Composition moyenne du biogaz par type de substrat [De La Farge, 1995; Brula <i>et al.</i> , 1995]	85
Tableau 13 : Caractéristiques du méthane (0°C, pression 1 atm) [Héduit, 1993]	86
Tableau 14 : Budget par habitant et dépenses de gestion des ordures ménagères [AFD, 2001; Ngnikam, 2000; Adegnika <i>et al.</i> , 2002]	94
Tableau 15 : Détermination des invariants d'échantillonnage (IHLC) pour les déchets industriels banals [Ngnikam, 1996]	109
Tableau 16 : Personnel et matériels nécessaires	118
Tableau 17 : Caractéristiques des zones dans lesquelles des enquêtes ont été conduites	124
Tableau 18 : Effectif des ménages enquêtés par ville et nombre de sacs récupérés	125
Tableau 19 : Taux de génération des déchets de ménage (en kg/habitant/jour)	126
Tableau 20 : Taux de production des ordures ménagères par strate à Douala et Yaoundé	127
Tableau 21 : Variation de la densité en poubelle des ordures ménagères de Douala et Yaoundé entre les deux saisons	128
Tableau 22 : Composition (% matière sèche) des déchets municipaux dans quelques villes du Cameroun	129
Tableau 23 : Composition brute et sur sec des ordures ménagères de Yaoundé et de Douala	130

Tableau 24 : Présentation de la nomenclature NAEMA	135
Tableau 25 : Répartition des unités formelles retenues par branche d'activité ..	137
Tableau 26 : Production des déchets solides non ménagers à Yaoundé par branche d'activité	140
Tableau 27 : Composition des déchets industriels à Yaoundé	143
Tableau 28 : Composition des déchets fermentescibles	144
Tableau 29 : Destination des déchets industriels de Yaoundé	147
Tableau 30 : Répartition des unités de production informelle des déchets par type d'activités	151
Tableau 31 : Production mensuelle des déchets solides des activités informelles	153
Tableau 32 : Récapitulatif de la distribution des rôles entre acteurs en présence [Tanawa et al., 2002]	166
Tableau 33 : Champ de compétence des différents acteurs en fonction du problème à traiter [Ngnikam, 2000]	178
Tableau 34 : Unités fonctionnelles retenues	181
Tableau 35 : Présentation des schémas de précollecte envisageables	184
Tableau 36 : Matériels de collecte envisageables	185
Tableau 37 : Types de véhicules de collecte et de transport des déchets en fonction de la nature des matériels de précollecte	186
Tableau 38 : Principales caractéristiques de la digestion anaérobie dans les usines de méthanisation	195
Tableau 39 : Capacité de transport de chaque type de véhicule	198
Tableau 40 : Consommation d'énergie électrique dans les installations industrielles de compostage et de méthanisation des ordures ménagères [Raggi, 1994]	204
Tableau 41 : Consommation d'énergie pour trois usines de compostage aux États-Unis (les données de base sont tirées de P. Raggi (1994)	205
Tableau 42 : Consommation d'énergie pour deux types d'usine de compostage proposés	206
Tableau 43 : Différentes entrées et sorties de matières dans une usine de méthanisation utilisant le procédé Valorga	206
Tableau 44 : Flux d'entrée et sortie de matières dans l'usine de méthanisation d'Amiens et simulation pour une unité industrielle installée à Yaoundé	207
Tableau 45 : Composition de biogaz de décharge et de gaz de combustion de biogaz [Apostol, 1998; Brula et al., 1995]	212
Tableau 46 : Consommation d'énergie pour la mise en décharge avec récupération de biogaz ([OFEFP, 1998] pour les données de la Suisse)	213
Tableau 47 : Présentation des bilans matières et énergies des différents systèmes	215

Tableau 48 : Classification des flux matières et énergies des différents systèmes	219
Tableau 49 : Évaluation de la perte de matière première par les différents systèmes étudiés	222
Tableau 50 : Potentiel de réchauffement global (PRG) des divers gaz à effet de serre (émis par les systèmes étudiés) par rapport au gaz carbonique pour des horizons temporels de 20, 100 et 500 ans et avec une incertitude de + 35)	223
Tableau 51 : Contribution à l'effet de serre (kg équivalent CO ₂ par unité fonctionnelle) des différents systèmes étudiés	224
Tableau 52 : Détermination de Q, Q1/4 et Q3/4 pour les différents systèmes étudiés	226
Tableau 53 : Paramètres caractérisant les potentiels toxiques et écotoxiques des quatre systèmes étudiés	228
Tableau 54 : Potentiel d'acidification (AP) des principales substances acides [Guinée et al., 1992]	230
Tableau 55 : Contribution à l'acidification des effluents émis par les différents systèmes de traitement envisagés (g équivalent SO ₂)	230
Tableau 56 : Potentiel d'eutrophisation (NP) des principales substances azotées et phosphorées [Guinée et al., 1992]	231
Tableau 57 : Contribution à l'eutrophisation des systèmes étudiés (g équivalent PO ₄ ³⁻)	231
Tableau 58 : Volume des déchets mis en décharge en fonction des systèmes étudiés (m ³)	232
Tableau 59 : Matrice d'évaluation	234
Tableau 60 : Méthode de notation de l'impact toxique et écotoxique	235
Tableau 61 : Seuils d'indifférence, de préférence et de veto pour les différents critères retenus	237
Tableau 62 : Matrice de concordance globale	238
Tableau 63 : Matrice de degré de crédibilité	240
Tableau 64 : Matrice de discordance globale	245
Tableau 65 : Coût de revient de traitement des ordures ménagères et investissement pour les quatre systèmes de gestion retenus [Ngnikam, 2000]	248
Tableau 66 : Coûts de réduction des émissions de gaz à effet de serre pour les différents systèmes [Ngnikam, 2002]	250

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Organigramme de choix de procédés de traitement des déchets	23
Figure 2 : Méthode d'exploitation en casier en terrain plat, décharge en terrain plat	37
Figure 3 : Schéma d'une décharge en terrain accidenté	38
Figure 4 : Cheminement des déchets municipaux dans les villes des pays en développement	40
Figure 5 : Variation du nombre de ménages payant le service de précollecte des déchets à Melen III et IV (année 2004-2005)	54
Figure 6 : Évolution des recettes et dépenses du projet entre 2004 et 2005 (FCFA)	55
Figure 7 : Les différentes entrées / sorties d'une décharge contrôlée	67
Figure 8 : Processus de compostage [Potvin <i>et al.</i> , (1989)]	72
Figure 9 : Étapes de compostage industriel des ordures ménagères. Source : Mustin, 1987 et notre analyse propre	79
Figure 10 : Étapes biochimiques de la digestion anaérobie [Hédouit, 1993 ; De La Farge, 1995]	83
Figure 11 : Répartition du coût de revient du traitement des déchets suivant les différentes séquences du système de collecte traditionnelle [Ngnikam, 2000]	95
Figure12 : Organigramme d'identification des déchets [Maestre <i>et al.</i> , 1995]	105
Figure 13 : Présentation de la méthodologie de quartage retenue pour le prélèvement de l'échantillon de laboratoire	123
Figure 14 : Composition des déchets fermentescibles des entreprises de Yaoundé	145
Figure 15 : Composition des déchets de la catégorie « autres »	146
Figure 16 : Composition des déchets solides produits par les activités informelles	154
Figure 17 : Définition de la frontière des systèmes de gestion des déchets étudiés	177
Figure 18 : Fonctions pouvant assurer les systèmes étudiés	180
Figure 19 : Principales étapes de méthanisation des ordures ménagères suivant le procédé Valorga [Cecchi <i>et al.</i> , 1988]	194
Figure 20 : Principe d'établissement des bilans matières énergies	197
Figure 21 : Consommation d'énergie du broyeur en fonction de la taille du produit broyé. D'après Diaz, Trezek et Savage (1981) cité par Mustin (1987)	203
Figure 22 : Comparaison de la consommation et de la production d'énergie des différents systèmes	217

Figure 23 : Proposition de nouvelle échelle de notation de paramètre « quantité rejetée »	225
Figure 24 : Algorithme de la distillation descendante	242
Figure 25 : Représentation graphique des résultats d'analyse suivant la méthode Electre III	243
Figure 26 : Classement des différents systèmes en fonction du coût d'investissement et d'exploitation	249
Figure 27 : Coût de traitement et coût de réduction des émissions de GES pour les divers traitements des déchets retenus [Ngniakm, 2002]	251
Figure 28 : Performance environnementale et coûts des investissements des systèmes étudiés	252
Figure 29 : Performance environnementale des différents systèmes étudiés en fonction des charges d'exploitation	254

Pour connaître les autres publications
du Pôle éditorial multimédia
de l'université de technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM)

voir le catalogue et les nouveautés sur le site UTBM :

www.utbm.fr → onglet L'UTBM → Editions multimédias

ou :

<http://www.utbm.fr/index.php?pge=15&lang=fr>

Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM)
Site de Sévenans, rue du château.
90010 Belfort cedex
Tél : 03 84 58 32 73

Directeur de Publication :
Pascal Fournier (Président UTBM)

Coordinateur de la publication :
Yves-Claude Lequin - yves.lequin@utbm.fr

Maquettage texte et couverture :
Atelier Gaia, Elisabeth Fuhrer - fuhrer.elisabeth@wanadoo.fr

Achévé d'imprimer
en décembre 2006
à l'imprimerie Metthez

Les villes d'Afrique face à leurs déchets

Emmanuel Ngnikam et Émile Tanawa

La gestion des déchets demeure un problème dans les villes africaines. Etats, élus locaux, techniciens et usagers cherchent les moyens pour assurer la propreté des villes et préserver leur environnement.

Destiné aux étudiants, aux enseignants et aux gestionnaires des villes, cet ouvrage s'appuie sur des travaux de terrain conduits de 1992 à 2004 dans une dizaine de villes d'Afrique de l'ouest et du centre. Ses analyses et propositions concernent aussi d'autres pays du monde tropical.

Il analyse les étapes de la gestion et du traitement des déchets, les politiques et leur financement, enfin une revue du cadre institutionnel en Afrique.

Le plus difficile pour les gestionnaires des villes est de choisir le système à mettre en œuvre en fonction des différentes contraintes environnementales, technologiques, économiques et même culturelles. Cet ouvrage montre qu'on peut utiliser la méthode d'analyse de cycle de vie (ACV) pour y parvenir. Appliquée à quatre systèmes différents, elle permet d'identifier le système le plus « éco-compatible » sur la base de six critères environnementaux : épuisement des réserves naturelles, effet de serre, eutrophisation, acidification, impact toxique et écotoxique et enfin le volume occupé par les déchets en décharge.

Préface de Paul Vermande, Pr émérite de l'INSA de Lyon (France).

Auteurs :

Émile TANAWA est professeur des universités et directeur régional de l'Agence universitaire de la Francophonie pour la Caraïbe depuis 2004. Docteur en aménagement et techniques urbaines de l'INSA de Lyon, il a été pendant plusieurs années expert auprès d'organisations internationales (PNUD, PDM, FEICOM, ONU-Habitat) sur les questions urbaines.

Emmanuel NGNIKAM est ingénieur du génie civil, diplômé de l'École nationale supérieure polytechnique de Yaoundé et docteur en sciences et techniques des déchets (INSA de Lyon). Enseignant, il est également homme de terrain rompu à la conduite de projets, particulièrement dans le domaine des déchets, des infrastructures de développement urbain participatif et d'électrification rurale.

Avec d'autres collègues, ils ont créé le « Laboratoire environnement et sciences de l'eau » à l'université de Yaoundé 1 au Cameroun.

Ouvrage réalisé avec le soutien de l'Agence universitaire de la Francophonie



24 €

ISBN : 978-2-914279-32-1



9 782914 279321