

**PLAN DIRECTEUR DE GESTION (P.D.GE) ASSISTEE PAR
ORDINATEUR, DE DECHETS SOLIDES URBAINS:
CONTRIBUTION A L'EDUCATION EN ENVIRONNEMENT**



**Abdoulaye OUEDRAOGO, PhD
MECHANICAL ENGINEER**

**UNITE DE FORMATION ET DE RECHERCHE
EN SCIENCES EXACTES ET APPLIQUEES, (UFR-SEA)
UNIVERSITÉ DE OUAGADOUGOU**

**PUBLICATION INTERNE DE L'UNIVERSITÉ DE OUAGADOUGOU
OCTOBRE 2006**

AVANT PROPOS

Le travail que j'ai le plaisir de vous présenter ci-après est le résultat de plusieurs années d'efforts commencés en juin 2000, par le Dr BADOLO Mathieu et moi-même. Comme beaucoup d'entre vous, notre conviction est que le développement du Burkina et partant de l'Afrique se fera à travers la maîtrise de la science et de la technologie. Malheureusement, le constat de nos jours est que pour plusieurs pays dont le notre, cet objectif est encore bien éloigné, nécessitant beaucoup plus qu'une simple prise de conscience, toute l'ingéniosité pour y parvenir. Mais dit-on, le chemin le plus long commence toujours par le premier pas, qu'heureusement beaucoup ont d'ailleurs déjà franchi. Le nôtre, très modeste du reste, a été orienté vers la réalisation de travaux de recherche et de formations continues axées sur la modélisation physico-mathématique des problèmes de société. Le Dr BADOLO a été rappelé très tôt sur un autre front du même combat. Entre deux cours, pendant les congés et durant les vacances, j'ai trouvé le temps pour poursuivre notre contrat. Conscients tout de même des limites de notre œuvre, nous souhaitons qu'elle soit approfondie pour servir de base de réflexion pour une communalisation intégrale et réussie du Burkina. Ainsi, les autorités communales, les ONG et tous ceux qui travaillent dans le secteur, trouveront nous pensons, un intérêt à parcourir ces lignes. Le cas particulier des petites localités doit être revu afin de leur fournir des outils détaillés de gestion à leur portée. Dans les grandes localités, les problèmes tels: le compostage, le recyclage des plastiques, l'enfouissement des déchets toxiques et dangereux nous semblent être des sujets pertinents de recherche pour les universités et les centres de recherche. Quant à la gestion prévisionnelle ou assistée par ordinateur, elle doit être dorénavant systématiquement incluse dans tout plan de gestion de déchets de n'importe quelle localité, grande ou petite.

REMERCIEMENTS

L'auteur remercie:

Le Dr BADOLO Mathieu, actuel Coordonnateur du Projet Appui aux Capacités d'Adaptation aux Changements Climatiques au Sahel, en poste au Centre Régional AGRHYMET à Niamey, avec qui, l'idée d'entreprendre un tel travail a germé en 2000.

La Mairie de Ouagadougou et l'Institut National de la Statistique et de la Démographie (INSD) pour avoir fourni des données indispensables à la réalisation de ce travail.

Mes remerciements vont enfin, à Monsieur Coulibaly Ousmane, étudiant en Doctorat à l'Unité de Formation et de Recherche en Sciences Exactes et Appliquées (UFR-SEA) de l'université de Ouagadougou, dont les résultats d'enquêtes dans le cadre de son Mémoire de Diplôme d'Etudes Approfondies (DEA) de Physique Appliquée et sa disponibilité ont permis de terminer ce travail.

TABLE DES MATIERES

RESUME	7
ABSTRACT	7
I. INTRODUCTION	8
II. NECESSITE ET OBJECTIF DU P.D.GE	8
I. 1. Origine des Déchets Solides Urbains (DSU)	8
II. 2. Nécessité et objectif du Plan	9
III. GESTION QUOTIDIENNE	10
III. 1. MODULE 1 : SENSIBILISATION	11
III. 2. MODULE II. : LE CADRE DE VIE SAINE ET AGREABLE (CVSA)	12
III. 3. MODULE III : GESTION DU CSAV	14
III. 3. 1. Sous-module III-1 : Sources et conditions de production des DSU	14
III. 3. 2. Sous-module III-2 : Collecte des DSU	16
III. 3. 2. 1. Cas des grandes agglomérations	16
III. 3. 2. 2. Cas des petites agglomérations	19
III. 3. 2. 3. La collecte des déchets plastiques	19
III. 3. 3. Sous-module III-3 : Quantification des DSU	20
III. 3. 4. Sous-module III-4 : Caractérisation et tri des DSU	23
III. 3. 4. 1. Méthodologie de la caractérisation	24
III. 3. 4. 2. Formalisme statistique de la caractérisation	28
III. 3. 5. Sous-modèle III-5 : Traitement et valorisation des DSU	37
III. 3. 5. 1. Le recyclage	38
III. 3. 5. 2. Le compostage	40
III. 3. 5. 3. L'incinération	41
III. 3. 5. 4. L'enfouissement	43
IV. GESTION PREVISIONNELLE OU ASSISTEE PAR ORDINATEUR	48
IV. 1. MOTIVATION ET OBJECTIF GENERAL	48
IV. 2. OBJECTIFS SPECIFIQUES	48
IV. 3. FICHE TECHNIQUE DE LA VILLE DE OUAGADOUGOU	49
IV. 3. 1. Situation géographique	49
IV. 3. 2. Administration	49
IV. 3. .3. Démographie	49
IV. 3. 4. Economie	49
IV. 3. 5. Système de gestion des déchets en cours	50
IV. 4. FORMALISME DE LA SIMULATION	50
IV. 4. 1. Forme continue	50
IV. 4. 2. Forme discrète	51

IV. 4. 3. Données et hypothèses	51
IV. 4. 4. Formulation des quantités	51
IV. 4. 5. Estimation des quantités de déchets collectés	53
IV. 4. 6. Quelques retombées socioéconomiques	54
IV. 4. 7. Incidence du niveau de pauvreté sur les déchets collectés	55
IV. 4. 8. Influence du comportement sur les quantités de déchets	56
V. DIAGRAMME DE LA SIMULATION INFORMATION	56
VI. QUELQUES INPUTS DE LA SIMULATION	57
VII. ANALYSE, DISCUSSION ET PERSPECTIVES	58
VII. 1. COMPARAISON AVEC DES RESULTATS D'AUTRES MODELES	60
VII. 2. ETUDES DE SENSIBILITÉ	63
VII. 2. 1. Variation du taux de collecte des déchets	63
VII. 2. 2. Influence du taux de croissance de l'économie	64
VIII. CONCLUSION	65
IX. BIBLIOGRAPHIE	67
X. PUBLICATION SCIENTIFIQUE TIREE DU DOCUMENT	69

LISTE DES TABLEAUX, DIAGRAMMES ET FIGURES

Tableau I : Sources de production des DSU	15
Tableau II : Catégories et sous catégories de DSU et leurs sources	27
Tableau III : Pourcentage de DSU d'une ville des USA	31
Tableau IV : Composition des déchets ménagers de la ville de Ouagadougou	32
Tableau V : Comparaison de la composition centésimale et du PCS du bois et des DSU	35
Tableau VI : Regroupement des différentes catégories de déchets avant traitement	37
Tableau VII : Incidence du niveau de pauvreté	55
Tableau VIII : Influence de l'indice de pauvreté sur la production de déchets	56
Tableau IX: Retombées économiques: nombres de canaris, de briques et revenus liés	62
Tableau X: Quantités et revenus liés au compost, aux marmites et aux nombres de fosses	62
Tableau XI: Production spécifique moyenne de déchets en fonction du niveau de vie	63

I. DIAGRAMME INDICATIF DU MODULE I	11
II. DIAGRAMME INDICATIF DU MODULE II	14
III. DIAGRAMME INDICATIF DU MODULE III	46
IV. DIAGRAMME COMPLET DE LA GESTION QUOTIDIENNE	47
V. DIAGRAMME COMPLET DE LA SIMULATION NUMERIQUE	58

Figure 1 : SCHEMA de Collecte - Centres de dépôts – Centres de Traitement et Valorisation	18
Figure 2 : Quantités et catégories de déchets produits selon le modèle de l'INSD	61
Figure 3: Quantités et catégories de déchets produits selon le modèle de Lagrange	61
Figure 4: Influence du taux de collecte sur les quantités de déchets	64
Figure 5 : Variation des déchets industriels en fonction du taux de croissance de l'économie	65

RESUME

Il est présenté dans ce travail, un schéma de gestion des déchets solides urbains, appelé Plan Directeur de Gestion assistée par ordinateur. Son objectif général est de mettre à la disposition des municipalités, un guide pour la création d'un espace de développement intégrant harmonieusement activités socioéconomiques et préservation de la qualité de vie. Le Plan est subdivisé en deux grandes parties s'imbriquant logiquement. La première partie que nous avons qualifiée de gestion quotidienne est de conception modulaire se déroulant en trois phases dont: la sensibilisation, la conception du Plan, puis sa gestion. Il est en outre souple et flexible, d'une mise en œuvre simple tenant compte du niveau de développement socio-économique des localités concernées. Il est basé sur la création au sein de chaque municipalité, d'une structure de coordination de lutte contre l'insalubrité et capable de mettre au point des bases de données les plus complètes et les plus fiables sur les sources, la production, la composition ainsi que la quantification et les méthodes de traitement des déchets. La deuxième partie s'appuie sur les données précédentes pour prévoir par simulation numérique, les problèmes de gestion que connaîtraient les localités dans le futur, du fait de l'accroissement de la population ainsi que des activités socioéconomiques. Les municipalités pourraient ainsi anticiper la recherche de solutions durables. Les équations et les résultats d'un formalisme de simulation avec un horizon de vingt ans et reposant sur les données de la ville de Ouagadougou, sont présentés en exemple.

Mots clés : Déchets solides, gestion quotidienne et prévisionnelle, municipalités, simulation

ABSTRACT

This work presents the results of an investigation of a computer oriented Municipal Waste Management (MWM) scheme, dedicated to regulating the production and treatment of Solid Municipal Wastes (SMW), in order to guaranty good, pleasant and healthy life to local citizens. The Plan is divided in two main parts: The first part is modular and is concerned with daily management operations. According to the size and economical standing, the Plan advises municipal leaders on how to create a special office in charge of city wastes management. This office must gather reliable and complete information on wastes sources, their production and cost effective physical treatments. The second part, utilizes the above database to formulate a computer simulation SMW management model capable of predicting wastes management problems that a city may face in the future. Hence, the city council can anticipate the search of sustainable solutions. As an example, a computer simulation model is shown based on the city of Ouagadougou's database. It predicts the population, the amount of wastes, as long as the socioeconomic activities and benefits associated.

Key words: Management, Solid Municipal Wastes, Municipalities, simulation

I. INTRODUCTION

Ce travail, entièrement réalisé au Burkina Faso et qui concerne uniquement les déchets solides, rentre dans le cadre de la modélisation et de la simulation numérique des problèmes énergétiques et environnementaux. Son objectif est de mettre à la disposition des municipalités, un mécanisme scientifique de création et de gestion d'un Cadre de Vie Saine et Agréable (CVSA) afin de participer à l'éducation en environnement des populations. Le modèle qui ne traitera pas des aspects juridiques, est divisé en trois (3) grandes parties.

La première partie que nous appelons *Gestion Quotidienne* est consacrée au développement des grandes idées du modèle. Le travail commence d'abord par décrire les déchets solides et les divers problèmes de santé publique et écologique qui leurs sont liés. Il met ensuite en évidence la nécessité de l'élaboration d'un Plan de régulation de la production, de la collecte et du traitement de ces déchets, dénommé PDGE. De conception modulaire, le Plan tient compte du niveau de développement économique et industriel de chaque localité pour proposer dans chacun des cas, un sous modèle alternatif. Ainsi, dans les grandes localités, il est proposé de laisser l'entièreté du ramassage (gestion quotidienne) des DSU aux entreprises et aux ONG de femmes et de jeunes, la gestion de l'ensemble étant coordonnée par un organisme technique crée au sein des Mairies. Dans les petites et moyennes localités, compte tenu des quantités de déchets à enlever et surtout des moyens disponibles, une collecte mixte par les ONG et les entreprises d'un coté et de l'autre les Municipalités elles-mêmes peut être envisagée. Dans tous les cas, la finalité est de créer une banque de données la plus fiable et la plus complète possible qui sera utilisée dans la seconde partie pour asseoir une gestion prévisionnelle à long terme des déchets produits dans les localités.

La deuxième partie que nous appelons *Gestion Assistée par Ordinateur* s'appuie sur les banques de données fournies par la gestion quotidienne pour estimer par *Simulation Numérique*, les charges que la dite localité aurait éventuellement à supporter dans le futur (10 à 20 ans par exemple) pour une gestion saine et continue du CVSA.

La troisième partie est consacrée à l'analyse des résultats du modèle et aux perspectives.

II. NECESSITE ET OBJECTIF DU P.D.GE

II. 1. Origine des Déchets Solides Urbains (DSU)

A l'exception des particules solides composées de grains de sable et autres brindilles que les vents d'harmattan et les orages déversent souvent sur les agglomérations, les DSU résultent exclusivement des activités socio-économiques quotidiennes de l'Homme. Se sont soit des emballages, soit des produits du secteur industriel écartés des chaînes de production

pour des raisons diverses (défauts de fabrication et autres), donc sans valeur marchande apparente. Se sont aussi des rejets du secteur informel, des ménages, des marchés, des hôpitaux, des écoles... On y rencontre donc, des morceaux de fer, d'aluminium, de caoutchouc, de bois, de paille, des résidus de récoltes, du papier, des restes de nourriture, du plastique (polyéthylène, polystyrène, polyvinyle...), des emballages de produits dangereux comme l'hexachlorobenzène, les insecticides etc. Tous ces déchets ont des propriétés physico-chimiques de même que des propriétés thermodynamiques et de transport différentes (masse volumique, conductivité thermique, pouvoir calorifique, taille...) permettant d'une part leurs caractérisations et d'autre part le choix approprié de leurs modes de traitement.

II. 2. Nécessité et objectif du Plan

Dans la plupart des villages et même dans certaines villes moyennes, les déchets sont pour l'essentiel bien intégrés dans l'organisation sociale. Compte tenu du faible niveau de développement économique et industriel, les ordures sont des sous-produits de la biomasse dont on sait sont biodégradable à l'opposée de la plupart des déchets provenant du secteur industriel. De ce fait, les déchets représentent ici des fertilisants naturels de premier choix pour les paysans. En effet, dans les villages, chaque quartier délimite à proximité des habitations, une aire de dépôt d'ordure ou aire populaire de compostage artisanal. Pendant la saison morte, les habitants y stockent les ordures provenant de leurs activités quotidiennes, ménages, fabriques d'objets divers... A l'approche de la saison pluvieuse, chacun y prélève des quantités de composte justes suffisantes pour fertiliser ses champs. Il y a donc comme une sorte de régulation permanente de la quantité de déchets, chaque localité ne produisant juste que ce dont elle a besoin pour perpétuer les activités champêtres. Il n'y a donc ni dispersion ni accumulation de déchets pour ainsi dire et pour tout conclure, les DSU participent à l'équilibre socio-économique de ces localités.

De villes moyennes il n'y a pas si longtemps, certaines localités ont grandi de manière exponentielle et cela en un temps tellement bref que l'harmonie d'entant a été complètement modifiée. Prises au dépourvu, les Autorités Municipales n'ont eu ni le temps ni les ressources nécessaires à la mise en place de structures capables de gérer et de proposer des solutions à la hauteur de la crise.

En effet, l'explosion, consécutive surtout aux arrivées massives de nouveaux migrants en provenance des campagnes, a surtout pour conséquence la prolifération de bidons villes, une surexploitation des rares infrastructures déjà mises à rude épreuve et le déversement sauvage et quotidien de tonnes de déchets dans n'importe quel espace vide disponible. Ainsi, dans la plupart des villes du Burkina, le problème des DSU est en passe de devenir une préoccupation majeure. Il n'est même pas exagéré de dire à l'heure actuelle que les DSU

posent tout à la fois des problèmes écologiques et de santé publique. En effet, les ordures sont l'une des principales causes de pollution de nos villes ; ils dégradent de manière continue et souvent permanente l'environnement et causent des nuances diverses aux usagers. Ils participent à la contamination de la nappe phréatique grâce aux infiltrations de produits chimiques et des huiles de vidanges provenant des emballages ou des pièces usagers. Ces mêmes produits sont également entraînés par les eaux de ruissellement dans les cours d'eau et les barrages où ils détruisent en partie la flore, contribuant ainsi au déséquilibre de la biodiversité. En matière de santé, il est coutume de voir des restaurants et autres bars populaires proliférés à côté de tas d'ordures infestées de mouches tandis que dans les bidonvilles, les nids de moustiques côtoient les habitations et les places publiques, marchés, écoles ... avec pour conséquences, la transmission à grande échelle du paludisme reconnu comme étant l'une des premières causes de mortalité surtout infantile dans notre pays. Et que dire des odeurs nauséabondes que dégagent ces déchets surtout pendant la saison pluvieuse et des inondations qu'ils causent souvent parce qu'ils obstruent les quelques rares canaux d'assainissement encore existants.

Tous ces éléments illustrent clairement l'urgente nécessité de la mise sur pied d'un mécanisme de régulation de la production, de la collecte et du traitement des DSU afin de protéger les populations et l'environnement. Ce mécanisme appelé P.D.GE, pour être efficace, devra s'insérer harmonieusement dans l'organisation sociale des villes. Son objectif principal est de créer et de maintenir un CVSA pour les habitants des cités. La mise en œuvre du Plan aura en outre pour conséquence, la création de nouveaux emplois notamment par l'intermédiaire des sociétés de ramassage et de traitement des DSU ainsi que dans les secteurs du recyclage et des opérations de compostage. En plus, l'exécution correcte du Plan pourra attirer à terme plus de visiteurs de même que certaines unités industrielles à la recherche de cadre approprié pour leurs opérations ; le résultat sera évidemment donc un cadre sain et des retombées économiques nettes pour les habitants.

III. GESTION QUOTIDIENNE

Le Plan est de conception *modulaire* c'est à dire qu'il se développe en plusieurs étapes ou phases. Il comprend en effet, trois modules principaux et des sous modules. Il est en outre souple et flexible, d'une mise en œuvre simple tenant compte du niveau de développement socio-économique des localités concernées. Les avantages d'une telle approche sont multiples: Tout d'abord il est plus facile de juger de sa cohérence. Ensuite, par cette approche, il semble plus facile de mobiliser les ressources financières nécessaires à sa réalisation en s'adressant à plusieurs sources à la fois, dépendant de leur intérêt pour tel ou tel *module* du

Plan. Il y a finalement, une plus grande flexibilité pour ajuster les différents maillons avant et pendant leurs mises en route définitive.

III. 1. MODULE 1 : SENSIBILISATION

Pour augmenter les chances de succès du CVSA, il est très important de comprendre que sa mise en place doit requérir l'adhésion d'une majorité de la population. Il s'agit tout d'abord donc, d'évaluer après enquêtes, le degré de compréhension et de réceptivité des Autorités Municipales (AM) et de l'ensemble de la population par rapport aux problèmes que posent les DSU ; ensuite, un programme de sensibilisation dont la durée et le contenu tenant tout à la fois compte des résultats de ces enquêtes et aussi des moyens financiers de la dite localité, pourrait être mis en œuvre. Concrètement donc, il s'agit d'organiser en direction des AM et en cas de besoin, un *Atelier* de deux (2) jours environs animé par des experts dont :

- un spécialiste en santé publique,
- un spécialiste en éducation environnementale,
- un spécialiste en développement urbain.

Pour les petites localités aux budgets bien limités, on pourrait se contenter du seul spécialiste en éducation environnementale le cas échéant.

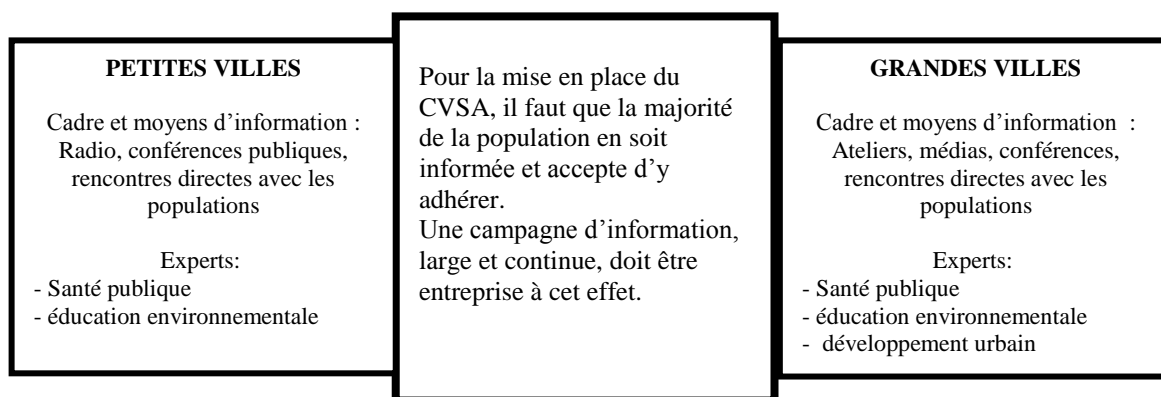
A l'endroit des populations, une au moins des méthodes de sensibilisation ci-dessous énumérées devrait être obligatoirement envisagée quelque soit la taille de la localité, ce sont :

- des rencontres directes dans les quartiers (de loin nos préférences),
- des émissions radiotélévisées (langues nationales et africaines, langue française),
- l'organisation continue ou périodique suivant les moyens, de concours de propreté.

Le but de l'atelier comme des rencontres avec les populations, est non seulement de faire ressortir l'urgente nécessité du P.D.GE au regard des dangers réels que posent les DSU pour la santé publique et l'environnement, mais de montrer également les avantages en terme de bien être social et de retombées économiques pour les acteurs.

La réalisation de ce module doit être confiée à des personnes ressources.

I. DIAGRAMME INDICATIF DU MODULE I



III. 2. MODULE II. : LE CADRE DE VIE SAIN ET AGREABLE (CVSA)

Après la phase de sensibilisation, ce module vient définir pour les Municipalités ayant optées pour le Plan, les modalités de la création, de la mise en œuvre et enfin, les principes de gestion du CVSA.

Le CSAV peut être tout simplement défini comme étant l'ensemble des mesures administratives et techniques pertinentes et cohérentes prises par une Municipalité donnée pour réglementer la production, la collecte et le traitement des DSU au bénéfice des populations et de leur environnement. Le Plan doit ainsi intégrer trois facteurs importants dont : le respect de la réglementation locale et nationale en matière d'implantation d'unités dans les sous-secteurs socio-économique et industriel, le respect des normes locales, nationales et internationales en matière de protection de l'environnement et enfin, la prise en compte des valeurs traditionnelles séculaires des populations.

Les Municipalités peuvent s'attacher les services d'un Bureau d'Etudes ou de Personnes Ressources pour les aider à définir les termes de référence du CVSA.

Pour plus d'efficacité nous recommandons dans un premier temps que chaque Municipalité crée en son sein un bureau administratif et technique appelé par exemple Direction de la Gestion, du Traitement et de la Valorisation des Déchets pour exécuter et approfondir les termes de référence qui seront définis. Cette structure dont les capacités devront être tout à la fois fonction de l'importance des quantités de déchets à enlever et du budget de la dite localité, aura justement pour rôle central de réunir les conditions devant garantir la mise en place et la gestion du CVSA. Pour cela, la DGTVD doit être elle-même dotée de moyens matériel et humain conséquents.

Rôle et taches de la DGTVD

Au niveau national

- elle doit maîtriser les textes sur les normes de pollution. A cet effet, elle devra travailler en étroite collaboration avec FASONORME.

Au niveau local

En fonction des normes nationales, elle doit définir les normes de propreté et le cadre général de gestion

- définir les normes de propretés spécifiques à la localité
- définir un plan cohérent de collecte des DSU
- définir le cadre et programme de traitement et valorisation des DSU
- travailler en relation avec les services chargés de l'urbanisation
- suivre l'évolution économique et démographique de la localité

- rester à l'écoute de l'évolution technologique

Au titre de la Gestion Quotidienne : création de banques de données

- rechercher les meilleures voies pour une sensibilisation continue de la population
- veiller de manière continue au respect des normes de propreté
- préparer les cahiers de charge pour les entreprises adjudicataires des travaux
- tenir à jour les données statistiques de l'ensemble des activités socio-économiques
- tenir à jour les quantités et la nature des déchets collectés par secteur d'activité
- rechercher les meilleures voies de tarification
- quantifier les retombées socioéconomiques

Au titre du traitement et de la valorisation des déchets

- définir le cadre du programme de traitement et valorisation des DSU
- définir des méthodes simples de caractérisations des déchets
- définir des méthodes simples et applicables de traitement
- définir des méthodes appropriées de valorisation
- créer un cadre de promotion pour les acteurs du sous-secteur

Au titre de la Gestion prévisionnelle : Gestion Assistée par Ordinateur

- prévoir la gestion à long terme du CVSA et opérer les ajustements nécessaires

Pour les grandes villes et pour plus d'efficacité, la Direction Générale peut être scindée en deux pour donner : une sous-section « Gestion » et une sous-section « Traitement et valorisation ». Nous recommandons en outre que la DGTVD ne participe pas directement aux travaux de ramassage et autres confections d'ouvrages mais se contente uniquement d'un rôle de conception, de supervision et de gestion. Ainsi, le parc de matériel devrait être essentiellement composé (nous citerons les plus gros) :

- d'équipements de bureau et de gestion : ordinateurs, logiciels de gestion
- d'équipements de contrôle technique lié aux normes de propreté : analyseur de fumées, testeur de bruit, compacteur...

Quant au personnel qui doit être recrutés sur les bases de termes de référence très rigoureux et très précis, nous suggérons selon les dimensions des tâches, un personnel de conception appuyé par un noyau de Techniciens Supérieurs (TS). Par exemple, l'équipe pourrait comprendre :

* pour la ville de Ouagadougou : trois (3) Ingénieurs, appuyés par cinq (5) TS

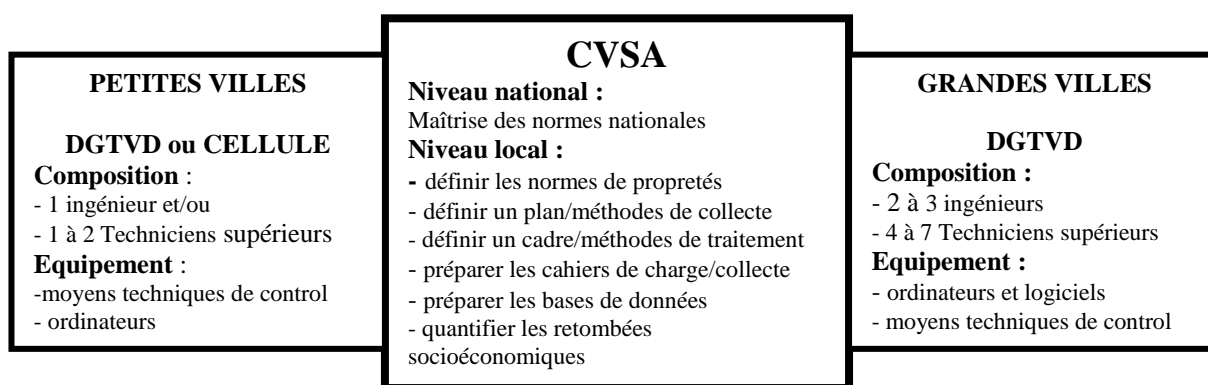
* pour la ville de Bobo-Dioulasso : deux (2) Ingénieurs, appuyés par (4) TS

* pour les villes moyennes (Koudougou, Ouahigouya, Banfora ...) et en fonction des activités industrielles de la localité, on devrait s'attacher les services d'un Ingénieur plus deux (2) TS ou de deux (2) TS seulement. Bien entendu, les situations sont évolutives.

Il faut souligner en outre que les DGTVD devraient commanditer des travaux d'expertise les cas échéant auprès de Bureaux d'Etudes spécialisées, ce qui leur éviterait de se doter d'équipements techniques très chers et à usage très spécifique.

En ce qui concerne les petites localités, bien que la mise en place d'une structure complète en terme de moyens techniques, humains et financiers ne soit pas indiquée, ces Municipalités veilleront cependant à créer des structures similaires qui devront être capables de conduire toutes les tâches ci-dessus énumérées. Concrètement, il faut asseoir progressivement la structure en recrutant au départ au moins un (1) TS.

II. DIAGRAMME INDICATIF DU MODULE II



III. 3. MODULE III : GESTION DU CSAV

Une fois la DGTVD créé et les grands contours du CVSA définis, une seconde campagne de sensibilisation devra être entreprise par les Municipalités elles-mêmes consistant à présenter le Plan à l'ensemble des acteurs. C'est au cours de cette phase que toutes les mesures arrêtées pour la réussite du projet devront être clairement exposées, en particulier les normes de propreté exigées. Parallèlement, on fera ressortir le bien être social et de manière chiffrée les retombées économiques attendues. L'un des points les plus important de la gestion des déchets est le respect des normes environnementales et de propreté qui passe par la mise en place de mécanismes souples et efficaces de contrôle des conditions de production, de collectes et de traitement des déchets.

III. 3. 1. Sous-module III-1 : Sources et conditions de production des DSU

Il est naturellement important de connaître et les sources et les types de déchets produits dans une localité donnée afin de concevoir les meilleures méthodes de collecte et de traitement possible. Comme à l'introduction, nous entendons par Déchets Solides Urbains, tous les déchets solides produits dans les limites administratives d'une localité donnée. Ainsi,

les DSU proviennent : (1) des ménages, (2) des institutions, (3) de l'industrie, (4) du commerce, (5) du secteur informel, (6) des secteurs socio-économiques. L'ensemble des sources et leurs productions sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Tableau I : Sources de production des DSU

Sources	Compositions des sources / Activités	DSU
Ménages	familles, quartiers, cités, villages associés	restes de nourriture, papier, cartons plastiques, résidus de récoltes, bois verre, métaux, aluminium, feuilles d'arbres, herbes, piles, produits de lessive et de toilettes.
Institutions	hôpitaux, écoles, institutions : Internationales, gouvernementales, Municipales,....	papier, cartons, plastiques, reste de nourriture, bois, herbe, métaux, alu., verre, produits de toilettes et bombes insecticides
Industrie	agroalimentaire, montage de cycle, tannerie, électrique, construction, Brasseries...	rejets de produits défectueux, verre produits dangereux, fer, alu....
Commerce	grandes surfaces, restaurants, hôtels, stations, marchés...	papier, cartons, plastiques, reste de nourriture, métaux, etc.
Secteur informel	mécaniciens, restaurants Populaires, petites fabriques métalliques, cordonniers,	reste de nourriture, pièces de rechange usées, métaux, cuire, résidus de l'agriculture...
Secteurs socio-économiques	ONG, groupements associatifs,	voir Institutions

La définition de DSU donnée ici diffère de celle donnée par George Tchobanoglous et al. [1] en ce sens qu'elle inclut les déchets de l'industrie et quelques déchets de l'agriculture. Pour l'instant en effet, il n'y a pas dans notre pays, de grosses industries produisant de grandes quantités de déchets et/ou capables de mettre en œuvre leurs propres programmes de traitement et de valorisation. La grande majorité est composée de petites unités de transformation ne produisant pas plus de déchets que certaines surfaces commerciales. De plus, très peu à l'exception de la SONABEL, de TAN-ALIZ, des hôpitaux et des industries chimiques, produisent des déchets spéciaux méritant des traitements particuliers.

Sont classés comme déchets de l'agriculture, les feuilles et tiges de maïs, les restes des épis de mil etc. dont la particularité est qu'ils ne proviennent pas seulement des ménages mais aussi du secteur informel. Pendant les périodes de récoltes de ces céréales en particulier, leurs déchets représentent une part importante de ceux du secteur informel. Il ne faut pas oublier que certaines grandes villes (Ouagadougou par exemple) ont dans leurs limites administratives, des villages et qu'à ce titre, leurs services techniques du genre DGTVD, peuvent se trouver confrontés à des situations où ils devront faire face à des cas de problèmes liés à des déchets de récoltes proprement dits. Il est vrai aussi que ces cas peuvent

être traités de rares, puisque comme souligné en introduction, les déchets sont en général bien intégrés dans l'organisation sociale de ces villages.

Quant aux sources et conditions de production des déchets, elles sont liées d'un côté aux habitudes culinaires des populations et à leur ouverture vers les autres cultures et de l'autre, à la nature des unités de production et aux textes réglementant leurs implantations. On sait en effet que certaines unités industrielles sont autorisées à ouvrir leurs portes sous réserve de remplir des cahiers de charge plus ou moins exigeant selon la nature de leurs activités. Ces données peuvent être complétées par des mesures pratiques sur le terrain. Mieux, il serait mal indiqué d'implanter par exemple une usine de fabrication de pesticides à côté d'un lac ou barrage qui alimenterait votre localité en eau potable, quel que soit par ailleurs la nature des emballages prévus. De même, pour faciliter le dépôt et la collecte des déchets qui seraient de nature hygroscopique par exemple, il serait tout indiqué que les unités qui les produisent soient implantées loin des zones marécageuses.

III. 3. 2. Sous-module III-2 : Collecte des DSU

Ce sous-module qui concerne essentiellement la partie respect des normes de propreté, est un point central du Plan de gestion. Par collecte nous entendons l'ensemble des mesures allant du choix et conception des bacs et containers en passant par la centralisation individuelle (habitations, grandes surfaces, unités industrielles...) et collective (marchés, quartiers etc.) des déchets, les circuits de ramassage des déchets et finalement leur enlèvement et acheminement d'abord jusqu'aux centres de dépôts puis jusqu'aux centres de traitement par les entreprises et organismes agréés. Puisque nous produirons toujours des déchets, la clé dans la réussite du CSAV est de mener une lutte continue contre leurs accumulations et dispersions. Nous présentons ci-dessous, figure 1, un schéma d'ensemble de toute la chaîne d'opérations. Nous analyserons séparément pour plus de clarté les méthodes et moyens utilisés pour la collecte dans les deux cas de figures suivants à savoir, d'un côté les grandes localités et de l'autre les petites et moyennes.

Il y a lieu de reconnaître d'entrée de jeu que jusque-là, les campagnes de lotissements de nos villes n'ont pas suffisamment intégré la dimension environnementale dans les plans. Les seuls cas pouvant être valablement cités sont les rares espaces verts dans certaines villes. Or l'efficacité des opérations de collecte est fortement tributaire de ce facteur : facilité de stationnement de véhicules de collecte, circuit de collecte optimum et enfin facilité d'accès des lieux de dépôts des déchets.

III. 3. 2. 1. Cas des grandes agglomérations

Ces localités sont caractérisées par des moyens relativement importants mais font en même temps face à de grandes quantités de déchets à traiter. Pour les circuits de collecte, nous

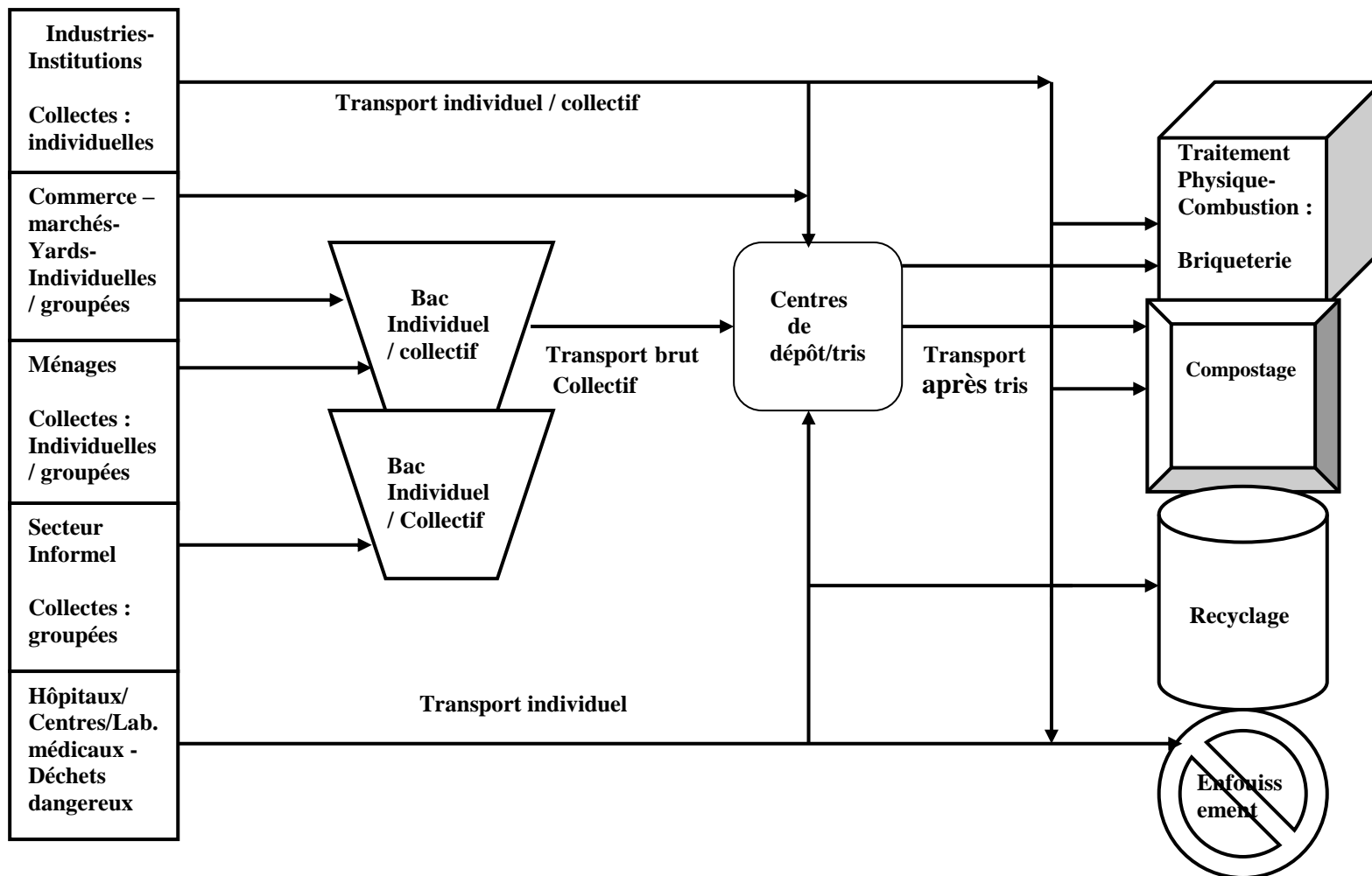
suggerons de considérer au moins trois zones distinctes d'intervention à savoir, la zone comprenant les unités industrielles à laquelle peuvent être rattachées toutes les activités socio-économiques grosses productrices de déchets, la zone incluant le centre ville et la zone commerciale et enfin la zone dite des ménages. Pour plus d'efficacité, ces zones peuvent elles-mêmes être subdivisées en terme, de distance à parcours pour la collecte, de choix postérieurs de méthodes de traitement et d'emplacements de centres de traitement. On pourrait aussi se contenter d'épouser le découpage administratif de la localité donnée.

Dans la première zone, la collecte doit se faire en procédant par du porte à porte, les déchets étant stockés sur place dans des bacs spécialement conçus pour faciliter non seulement le ramassage et le tri mais surtout pour tenir compte de la nature (risques environnementaux) des déchets produits par l'unité concernée. Les containers seront donc dimensionnés en fonction de la nature et de la quantité de déchets produits par l'unité industrielle. Si des déchets toxiques sont rejetés, des précautions particulières devront être envisagées incluant au besoin l'emploi de deux types de containers pour séparer les déchets toxiques des autres types de déchets le cas échéant. Les containers devront être disposés de façon à minimiser le plus possible le temps des opérations.

Les contrats de ramassage doivent être réservés aux grandes entreprises. Celles-ci disposent en effet, de moyens matériels et humains suffisants pour pouvoir respecter les cahiers de charge mis au point par les DGTVD. En particulier, les véhicules devront être de types bennes tasseuses ou camions lève-containers ou encore des modèles plus récents et performants dont les services ne devraient cependant pas entraîner une hausse sensible des taux d'abonnement des divers acteurs. Les déchets collectés dans ces conditions peuvent, soit être directement transférés dans des centres de traitement soit subir des tris plus poussés selon les besoins, figure 1.

La deuxième zone quant à elle comprend le marché central et les marchés périphériques appelés yards en plus du centre commercial. On procédera par la collecte individuelle pour les grandes surfaces commerciales puis par la collecte groupée pour les marchés et les petites boutiques. Pour ces cas, les déchets sont stockés dans des containers pourvus par les Municipalités. Comme précédemment, les mêmes contraintes devront être observées pour le ramassage et la qualité des bacs et containers. Là également, les contrats devraient être passés avec les grandes entreprises de ramassage capables de mettre en jeu des moyens matériels et humains à la hauteur des cahiers de charge. Les déchets collectés ici devront être transférés dans des centres de dépôts où ils subiront des tris poussés avant les traitements.

Figure 1 : SCHEMA de Collecte - Centres de dépôts – Centres de Traitement et Valorisation



Quant à la troisième zone, elle concerne uniquement les habitations, c'est à dire les ménages. Elle peut elle-même être subdivisée en deux grands secteurs dont le secteur du centre ville et celui des quartiers périphériques. Dans le secteur du centre ville, la collecte se fait par du porte à porte, par des entreprises capables de répondre aux attentes des bénéficiaires et disposant de bennes tasseuses ou autres moyens similaires. Les bacs seront conçus pour respecter les normes arrêtées par la DGTVD en tenant bien entendu compte du pouvoir d'achat des acteurs. Quant au secteur périphérique, le ramassage pourrait être entièrement laissé aux ONG de femmes et de jeunes et aux micro-entreprises privées. La collecte se fait de manière groupée de préférence, par apport volontaire des déchets jusqu'aux dépôts ou encore de manière individuelle sur demande. Ici, le fût pourrait être retenu comme bac standard pour ceux ayant optés pour le ramassage individuel. Les opérations sont surtout à haute intensité de main d'œuvre et offrant des emplois à la frange la plus désœuvrée des villes. Les moyens matériels inclus surtout des tracteurs-remorques, des charrettes à âne, des pelles, râtaux et brouettes.

D'une manière générale, et à travers toutes les localités, le ramassage des ordures sauvages c'est à dire jetées directement à même le sol incombe aux unités de collecte situées dans la zone géographique où ces activités sont décelées.

III. 3. 2. 2. Cas des petites agglomérations

Pour les petites et moyennes localités et suivant les cas, les Municipalités peuvent, soit procéder à un ramassage mixte c'est à dire impliquant des entreprises et ONG de femmes et de jeunes conjointement avec les Municipalités elles-mêmes ou soit laisser la totalité du ramassage à ces ONG. Le même type de découpage que ci-dessus pourrait être opéré pour plus d'efficacité en terme de quantification surtout. La collecte se fait de préférence par apport volontaire aux points de regroupement et de porte à porte pour les quelques unités industrielles existantes, les grandes surfaces commerciales ou encore sur demande pour les habitants.

III. 3. 2. 3. La collecte des déchets plastiques

Les plastiques sont singularisés ici à cause surtout des problèmes particuliers liés à leur gestion. En pourcentage des constituants des déchets des ménages de la ville de Ouagadougou, les plastiques viendraient juste après les fermentescibles [2]. Utilisés principalement sous forme de sachet, ils sont rejetés partout après usage. Les bacs, les moyens de ramassage et autres lieux de dépôt d'ordures devraient être conçus en tenant compte des déchets plastiques qui sont facilement entraînés par les vents pendant leur transport et même au niveau des sites de stockage. Pour lutter contre les effets des convections naturelles ou forcées (vents ou effet d'entraînement causé par le passage d'un engin roulant) les bacs de

stockage pourraient être conçus relativement profonds et surmontés de grille de retenue en forme de voûte. Les moyens de ramassage roulant qui ne seraient pas équipés pour empêcher les sachets d'être emportés par les vents pourraient être recouverts de bâche.

Pour la collecte proprement dite, on pourrait envisager des mesures de sensibilisation doublées de mesures incitatives de nature à encourager les populations à isoler les plastiques depuis les sites de collecte. Les autorités municipales pourraient fournir des sacs à cet effet. Mais le principal problème de la collecte des sachets se situe surtout au niveau des rejets sauvages dans les rues et les places publiques. Ici, il s'agit de toucher toute la population et en particulier tous ces petits vendeurs disséminés un peu partout. Là, les mesures incitatives auront beaucoup plus de portée comparée aux grosses dépenses publicitaires. Toutes ces tâches incombent justement aux DGVTD, qui devront trouver les moyens appropriés pour gérer cette délicate opération. Pour appuyer les efforts individuels qui seront demandés à chaque citoyen à l'occasion de la lutte pour la propreté, les Municipalités devront premièrement, prendre des mesures pour débarrasser leurs localités des sachets qui y sont répandus depuis un certain temps déjà, deuxièmement, elles devront pour maintenir le rythme et en sus des équipes de ramassage déjà agréées, détacher spécifiquement de petites équipes dont la tâche centrale sera de mener la guerre contre les sachets. Ces équipes composées de deux à trois personnes selon l'ampleur du travail, pourront être réparties en fonction du découpage proposé ci-dessus. Le travail sera essentiellement à haute intensité de main d'œuvre dont le double objectif est le maintien de la propreté et l'octroi d'emplois aux plus nécessiteux des populations. Comme moyen de ramassage nous suggérons un sac (pour le stockage) et un bâton muni d'une pointe (rappelant une lance) pour accrocher le plastique en position debout, des gants et des botes comme moyens de protection.

III. 3. 3. Sous-module III-3 : Quantification des DSU

Le but de la quantification est de dresser une banque de données la plus complète possible pour une meilleure gestion quotidienne et de fournir ultérieurement des inputs majeurs et très fiables pour la partie simulation du Plan. Généralement, la nature et même les quantités de déchets collectés varient selon les mois, selon les saisons ou encore selon les différents endroits de la localité considérée. De plus, certaines unités industrielles procèdent même à des fermetures temporaires à certaines périodes de l'année. Dans ces conditions, une estimation des quantités de déchets ne peut être crédible que si elle s'étale sur un intervalle de temps de longueur appropriée. Nous suggérons une période de un (1) an comme base de référence.

Il est important cependant de faire remarquer que les quantités de déchets effectivement collectés ne représenteront qu'approximativement la totalité des déchets

produits dans une localité donnée. En effet, des déchets sont soit directement recyclés, soit utilisés comme composte ou encore tout simplement brûlés en plein air. Par conséquent, la quantification ne donnera qu'une figure approchée de la réalité sur le terrain. Il faudrait éventuellement mener d'autres formes d'enquêtes complémentaires pour évaluer les quantités soustraites mais même là, il n'y a aucune garantie que l'on parviendra à une figure complète. Cela n'enlève cependant en rien l'importance de la quantification comme facteur important de gestion.

Un autre point sensible par rapport à l'opération de quantification se trouve être le choix de la méthode de mesure donc des unités à utiliser. De toutes les méthodes, la quantification par le volume semble être la plus simple. Il suffit en effet, de déterminer au préalable et une fois pour toute, le volume des containers, bacs ou encore des véhicules, charrettes etc., et de tenir un compte rigoureux du nombre de collectes effectuées dans un intervalle de temps donné au moyen de chaque source d'enlèvement. Mais cette forme de quantification aussi simple soit-elle, reste très imprécise, car en effet, que vaut 25 m³ de déchets, le contenu soit dit en passant d'une benne tasseuse, si ce chiffre n'est pas accompagné d'une mention indiquant le degré de compactage des ordures ? Les déchets peuvent en effet occuper un grand volume compte tenu uniquement de leurs dimensions, par exemple des cartons d'emballages vides. Par conséquent, si le volume doit être utilisé, il est nécessaire d'indiquer jusqu'où les ordures ont été tassées, en d'autre terme, cela revient à déterminer au préalable leur masse par unité de volume.

Pour contourner cette difficulté, les déchets peuvent être quantifiés par leur masse. En effet, la quantité de déchets reste invariable quelle que soit la méthode de pesée et indépendant du degré de compactage. Il y a cependant lieu de reconnaître les difficultés réelles en terme de moyens humains et techniques à surmonter pour la réalisation de cette opération. Si elle peut être envisagée dans les cahiers de charge des grandes entreprises de ramassage, il est complètement or de question dans les quartiers périphériques de même que dans les petites et moyennes localités.

Dans la pratique, on fera appel à des méthodes mixtes le cas échéant en privilégiant toutefois les mesures par le volume et en adoptant une forme standard de compactage assez facile à mettre en ouvre par tous les acteurs. En réalité, en dehors de certaines opérations de récupération de terre en ville pour le besoin de lotissement, le compactage des déchets solides n'est pas courant dans nos localités. Même dans ces cas, c'est plutôt de la terre ferme qui est employée, les déchets étant surtout utilisés pour le compostage ou pour combler des crevasses ou rigoles naturelles et/ou artificielles sans besoin de compactage. Sur site, des méthodes

pratiques faisant beaucoup plus appel au bon sens seront développées pour les opérations de compactage.

Une fois les méthodes de quantification définies et arrêtées à savoir par pesée ou par volume ou encore les deux à la fois, le suivi de la quantification peut se faire en additionnant la charge (masse) des ramassages par charrettes, bennes tasseuses, tracteurs remorques etc. ou encore en additionnant le volume total des ramassages et multipliant ce volume par leur degré de compactage. Il est alors aisé de dresser le tableau le plus complet et le plus détaillé de la production de déchets d'abord de la journée, de la semaine, du mois et enfin de l'année puis en fonction des sources et secteurs d'activité tel que définis dans le Tableau I ci-dessus. Ainsi, on pourrait établir la production de déchets par unité industrielle (Q_{in}) comme la Brakina, par institution comme les écoles (Q_{ec}), les hôpitaux (Q_{ho})..., par les ménages (Q_{me}), par secteur d'activités comme les unités de production d'électricité (Q_{el})..., et enfin la production totale annuelle de déchets (Q_T) de la localité. Bien entendu, pour connaître le débit de production d'ensemble ou la production moyenne journalière q de la localité, il suffit de diviser la production annuelle par le nombre de jours de l'année:

$$q \text{ (kg / jour)} = Q_T \text{ (donnée en kg)} / (365 \text{ jours}) \quad (1)$$

Par contre, si l'on se ramène au cas d'une source de production spécifique, sa production moyenne sera obtenue en substituant à Q_T , la production annuelle de la dite source. Par exemple, la production moyenne journalière de la SONABEL vaut :

$$q_s \text{ (kg / jours)} = Q_s \text{ (en kg)} / (365 \text{ jours}) \quad (2)$$

Si la source est composite c'est à dire composée de plusieurs petits producteurs comme le cas d'une école ou encore le cas des ménages, il est alors plus utile de connaître la production journalière de chaque petit producteur. Ainsi, la production moyenne journalière de déchets par habitant d'une localité vaut :

$$q_h \text{ (kg par jour et par habitant ou kg / (j . hbt))} = Q_{me} / (365 \times \text{nombre d'habitants}) \quad (3)$$

$$q_{me} \text{ (kg par jour par ménage ou kg / (j . me))} = Q_{me} \text{ (kg)} / (365 \times \text{nombre de ménages}) \quad (4)$$

D'une manière générale, lorsque la source est composite, la production journalière par producteur est égale à la production totale de la source divisée par 365 jours et par le nombre de producteurs.

Une exécution rigoureuse de la quantification permet de déterminer après un certain nombre d'années, une corrélation entre par exemple, l'évolution de la production des déchets et l'accroissement de la population ou encore entre la santé de l'économie et la production totale de déchets. Ces notions seront développées ultérieurement.

Enfin, une troisième méthode [1] consiste à partir d'un site bien délimité appelé système à étudier puis faire un bilan des masses de déchets entrant et sortant du système ainsi

que générées ou détruites à l'intérieur de celui-ci. Ce bilan se traduit mathématiquement par la relation suivante :

$$\frac{dM}{dt} = \sum M_e - \sum M_s \pm r_g \quad (5)$$

Dans l'équation (5) :

dM/dt représente la vitesse d'accumulation massique à l'intérieur du système (kg/j)

$\sum M_e$ est la somme des masses entrant ou déchargées du système, (kg/j)

$\sum M_s$ est la somme des masses sortant ou enlevées du système, (kg/j)

r_g la vitesse de génération de déchets à l'intérieur du système, (kg/j)

La génération peut s'entendre par exemple lorsque dans les transformations biologiques, l'activité de certaines bestioles (verres de terre) engendre la création (+ r_g) d'autres déchets.

Par contre dans le cas du compost où on assiste à une dégradation des ordures, r_g est alors négatif. D'une manière générale, le bilan de masse s'applique parfaitement lorsque dans un site (système) de stockage de déchets donné, on décidait de procéder à un tri de plusieurs constituants des déchets en l'occurrence les déchets recyclables, les déchets combustibles, les non ferreux, ... Si l'on connaît l'apport journalier de déchets ($\sum M_e$) c'est à dire l'ensemble des constituants des déchets entrants dans le système, la somme des constituants sortants ($\sum M_s$) et éventuellement les quantités générées (r_g positif) ou détruites (r_g négatif), alors les quantités accumulées journalières (vitesse d'accumulation ou plus concrètement vitesse de remplissage du site) peuvent être établies et par conséquent, on peut évaluer l'horizon temporel de remplissage du site et prendre des dispositions qui s'imposent à savoir, accélérer le tri, diminuer ou augmenter l'apport de déchets ou encore envisager un changement complet de site de stockage.

Après la quantification, il faut passer naturellement à la phase du tri proprement dit.

III. 3. 4. Sous-module III-4 : Caractérisation et tri des DSU

Pourquoi dépenser encore tant d'énergie et d'argent à caractériser et à trier les DSU après les avoir rejetés comme encombrants et inutiles ? Tout d'abord parce que les rejeter en l'état serait aller contre la raison d'être même du CVSA. Ensuite, on s'aperçoit qu'après tout, certains déchets peuvent encore être utiles alors que d'autres par contre sont vraiment à classer en prenant souvent des précautions. En effet, les déchets toxiques ou tout simplement tous ceux dangereux pour la santé humaine et animale ainsi que pour l'environnement doivent

être placés dans des endroits aménagés en conséquence. Ainsi, la caractérisation pourrait se dérouler en deux grandes étapes: la première consisterait à classer les déchets par type ou catégorie à savoir: ménagers, industriels, médicaux, etc. tandis que la seconde serait plus poussée et se ramènerait à trier les différentes catégories pour les séparer en sous catégories formées par les déchets dangereux et spéciaux, les combustibles, les métaux, les plastiques et les fermentescibles, compatibles avec les objectifs ultérieurs des méthodes de traitement.

III. 3. 4. 1. Méthodologie de la caractérisation

En général, la caractérisation se fait avec des objectifs préétablis. L'absence jusque-là de grosses sources de déchets toxiques dans notre pays nous amène à privilégier l'aspect valorisation qui consiste essentiellement à transformer les déchets en matières premières pour le développement durable. Ainsi, la caractérisation devra permettre une évaluation plus précise des quantités de déchets recyclables, des quantités pouvant être destinées au compostage et à l'enfouissement et dans certains cas comme dans les grandes agglomérations, les quantités pouvant servir de combustible. La définition de ces grandes orientations dicte du même coup les constituants à rechercher lors du tri. Elle fixe également certaines normes de propreté telle par exemple l'interdiction de brûler en plein air parce que les déchets peuvent servir de combustibles. Pour revenir à une idée évoquée en introduction, le tri est essentiellement fait en comparant les catégories de déchets sur la base de leur origine (médicaux et/ou chimiques) et/ou sur la base de leurs propriétés physico-chimiques, thermodynamiques et de transport. Pour les besoins spécifiques de la valorisation, ils peuvent en effet être comparés en fonction de leurs tailles donc par granulométrie, en fonction de leurs pouvoirs calorifiques pour rechercher les combustibles ou encore en fonction de leurs conductibilités thermiques pour isoler les métaux des autres. Concrètement, l'opération de caractérisation sera efficace lorsqu'elle permet une bonne quantification des différentes catégories en vue d'une meilleure planification des investissements, soit pour la conception des sites d'enfouissement, soit pour l'évaluation des tailles des unités de combustion à mettre en place ou encore pour évaluer les retombées économiques du recyclage ou du compostage. Dans ces conditions, l'opération de caractérisation comme celle de la collecte devrait s'étaler sur une période de référence de une (1) année et comprend les différentes étapes suivantes:

- choix de la source,
- choix de la période,
- définition des objectifs,
- collecte d'informations brutes:
 - emplacements des dépôts d'ordures, leurs sources et les circuits de collecte
 - revue de littérature, enquêtes

- préparation des échantillons
- analyses physico-chimiques, thermodynamiques et de transport
- caractérisation proprement dite

a. choix de la source

Pour être vraiment représentative et efficace, la caractérisation doit concerner séparément les différentes sources de production définies en Tableau II. Concrètement, l'on choisira de caractériser les déchets ménagers, ceux de l'industrie ou encore les déchets du secteur commercial. Il devient parfaitement évident que si la collecte et la quantification sont bien exécutées en amont, une bonne caractérisation permettrait à une localité donnée, de faire en aval une meilleure estimation des différentes catégories de déchets à traiter.

b. du choix de la période de caractérisation

Il a été noté précédemment que la composition des déchets solides pouvait varier d'un mois à l'autre, d'une saison à l'autre etc. L'idéal serait donc une opération de tri tous les mois à travers par exemple une campagne d'une durée d'une semaine environ. Dans la pratique, on pourrait se contenter en fonction des moyens et des besoins, de trois (3) tris annuels, répartis en un (1) tris par quart de l'année (février-mai, juin-septembre, octobre-janvier). Ce découpage a le mérite d'épouser la variabilité des saisons qui sont l'hivernage (juin-septembre), la saison sèche-chaude (février-mai) et la saison sèche-froide (octobre-janvier). Elles se caractérisent respectivement par une très forte, une très faible et une production moyenne de biomasse. Dans les petites et moyennes localités, un (1) à deux (2) tris annuels pourraient être suffisants pour la recherche des premières informations. Maintenant, pour pouvoir tirer de ces campagnes de tris des informations pouvant servir à la gestion prévisionnelle (10 à 20 ans), il faut que celles-ci se répètent dans le temps par exemple tous les deux ou trois ans.

c. définition des objectifs

Dans les grandes localités, la caractérisation pourrait avoir pour objectifs un meilleur dimensionnement des installations de traitement pour le recyclage, le compostage, la combustion et l'enfouissement. Dans les petites et moyennes localités, la combustion et l'enfouissement seront d'un enjeu moins important que les deux autres méthodes de traitement.

d. collecte d'informations brutes

C'est une forme de pré-campagne indispensable pour recueillir le maximum d'information pouvant aider à la réussite de l'opération. Les données brutes fournies par les Municipalités ou les compagnies de ramassage peuvent en effet aider à orienter les opérations de tri tout comme les rapports et travaux divers de terrain. On s'attachera plus

particulièrement dans ce chapitre à inventorier les sources de production des déchets, les moyens utilisés pour la collecte ainsi que les circuits de collecte et les lieux de décharge des déchets. Dans l'industrie, le commerce et les institutions, les informations liées aux stocks de commandes, aux ventes etc. peuvent s'avérer utiles.

e. préparation des échantillons

Il y a lieu de distinguer au moins deux cas de figure selon les sources de provenance des déchets. Si l'on choisit de caractériser les déchets d'une unité de production donnée, la SONABEL par exemple, alors la préparation de l'échantillon ici ne peut être identique à la préparation dans le cas par exemple des déchets ménagers ou encore des déchets du secteur commercial. Dans ce cas particulier, l'homogénéité de l'échantillon est très difficile à éviter. On veillera tout au plus à ce que l'échantillon ne provienne pas uniquement de la collecte d'une journée particulière telle les jours de maintenance des installations. Dans le cas général, l'homogénéité peut être évitée comme par exemple en écartant les déchets collectés uniquement dans un seul ou dans un nombre très réduit de ménages ou encore procéder à l'échantillonnage des déchets d'un seul centre commercial et tenir ce résultat comme étant celui de tout le secteur d'activité. En conclusion on évitera dans tous les cas, de faire l'échantillonnage à partir des déchets collectés uniquement durant des jours ou périodes particulières à savoir, fêtes et week-ends.

Ensuite, vient le problème de la taille de l'échantillon, du temps de l'échantillonnage et enfin du nombre minimal d'échantillons pour des comparaisons statistiques. Si le problème de l'homogénéité est bien pris en compte, la taille de l'échantillon quoique importante ne peut cependant être à elle seule un facteur déterminant dans l'opération de tri puisque la proportion de chaque catégorie de déchets est obtenue en divisant sa masse par la masse totale de l'échantillon trié. Dans la pratique par contre, on fixera une masse minimum de 10 kg par échantillon. Quant au temps de l'échantillonnage il ne devrait pas dépasser une journée et dix (10) échantillons pourraient être triés séparément à la fois, soit un total de 100 kg de prélèvement à faire sur un container ou sur un site donné. Concrètement, il s'agit de prélever au niveau du site de décharge ou du contenu d'une benne ou encore de la charge d'une charrette le cas échéant, les dix échantillons de 10 kg minimum chacun. La règle générale ici est de faire le prélèvement à partir d'une source non seulement hétérogène mais contenant une grande quantité de déchets c'est à dire largement supérieure à la quantité nécessaire pour l'échantillonnage.

f. la caractérisation proprement dite

Les déchets peuvent être caractérisés premièrement en fonction de leurs tailles. C'est la granulométrie dont l'importance est manifeste lorsqu'il s'agit de procéder à certaines

méthodes de traitement comme le compostage ou la combustion. Ici en effet, les déchets doivent avoir une certaine uniformité de taille avant leur entrée dans la chambre de combustion ou en début de compostage. Cette opération est généralement effectuée au moyen de géants tamis appelés cribles : les déchets sont alors séparés en gros, moyens et fines. Avant leur traitement, les gros peuvent donc subir des opérations mécaniques de réduction qui les ramènent par exemple à des tailles moyennes. Ensuite, les déchets peuvent aussi être triés en fonction de leur nature et origine comme les déchets médicaux. Cette catégorisation est bien entendue fonction de la source et des activités qui lui sont liées. Concrètement, nous allons rechercher les morceaux de fer, d'aluminium, de cuivre etc. pour le recyclage, les morceaux de carton, de papier et de bois pour la combustion et les matières organiques ou dégradables d'une manière générale pour le compostage. Nous présentons dans le Tableau ci-dessous, les différentes catégories et types de déchets couramment rencontrés dans nos localités.

Tableau II : Catégories et sous catégories de DSU et leurs sources

Sous catégories	Sources de déchets
Restes de nourriture	Ménages, Secteur informel
Biomasse*	Ménages, Secteurs informels
Papier et carton	Commerce, Institutions, secteurs Informels
Textile	Ménages, Commerce, Secteurs Informels
Plastique	Ménages, Commerce, Secteurs Informels, Institutions
Caoutchouc et cuire	Industrie, Secteurs informels, ménages
Verre	Ménages, Secteurs informels, Industrie
Métaux	Secteurs informels, Industrie, ménages
Aluminium	Commerce, industrie, secteur Informel, ménages
Non-ferreux	Secteurs informels, Industrie, ménages
Déchets dangereux	Ménages, Industrie, hôpitaux, commerce
Autres	-

* Biomasse : morceaux de bois, feuilles d'arbres, restes de charbon de bois, herbes et résidus de récoltes (feuilles et tiges de maïs, de mil et d'arachide, coques diverses ...)

III. 3. 4. 2. Formalisme statistique de la caractérisation

Pourcentage de catégories de déchets

Supposons que toutes les étapes initiales précédemment décrites aient été respectées avant le début d'une campagne de caractérisation au cours de laquelle, N échantillons de dix (10) kg chacun de masse totale égale à 100 kg, ont été préparés. Chaque échantillon est composé de K constituants (paille, fer, etc.) de déchets.

Posons donc, $M = 10$ kg, $M_T = 100$ kg et m_j^i la masse du constituant j dans l'échantillon i.

Ainsi, $1 \leq i \leq N$ et $1 \leq j \leq K$, le nombre de constituants de déchets n'étant pas nécessairement le même dans les N échantillons. On peut écrire les relations suivantes entre les masses:

Pour un échantillon i donné :

$$\sum_{j=1}^K m_j^i = M = 10 \text{ kg} \quad (6)$$

Pour l'ensemble de la campagne:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K m_j^i = M_T = 100 \text{ kg} \quad (7)$$

Définitions

Le pourcentage d'un constituant j de déchets dans un échantillon i, est obtenu en divisant sa masse par la masse totale de l'échantillon trié, le tout multiplié par 100.

$$p_j = \frac{m_j^i}{M} \times 100 \quad (8)$$

Le pourcentage d'un constituant j de déchets lors d'une campagne, est égal à la somme des masses de la dite catégorie prise individuellement à travers les échantillons, divisée par la masse totale des échantillons triés, multiplié par 100.

$$P_j = \frac{\sum_{i=1}^N m_j^i}{M_T} \quad (9)$$

Nous admettons que le pourcentage d'un constituant (verre, métaux etc.) lors d'une campagne est le pourcentage pour le type de déchets concernés (ménager, industriel etc.) et reste constant entre deux campagnes de tri. Ensuite, il est trivial que la somme des pourcentages des différents constituants dans un échantillon ou d'une campagne entière de tri, est égale à un (1).

Définissons maintenant un échantillonnage idéal, comme étant tel qu'un constituant j donné de déchets ait la même masse dans les N échantillons. C'est à dire (équations 10):

$$\text{Pour } j = 1 \quad m_1^1 = m_1^2 = \dots = m_1^{10} \quad (a)$$

$$\text{Pour } j = 2 \quad m_2^1 = m_2^2 = \dots = m_2^{10} \quad (b)$$

.....

Pour $j = k$ $m_k^1 = m_k^2 = \dots = m_k^{10}$ (c)

Ainsi, tous les P_j^i seraient égaux pour un constituant j donné ; pour $j = 2$ par exemple, on a :

$$P_2^1 = \frac{m_2^1}{M} \times 100 = P_2^2 = \frac{m_2^2}{M} \times 100 \dots = P_2^6 = \frac{m_2^6}{M} \times 100 \dots = P_2^{10} = \frac{m_2^{10}}{M} \times 100 \quad (11)$$

Dans la pratique cependant, les échantillons ne sont pas idéaux et ainsi, les m_j^i sont différents. De même, les P_j^i sont différents. Ce qui nous intéresse en fait, c'est de savoir quelle est la composition réelle des déchets à caractériser. Elle ne sera peut être jamais connue, mais seulement approchée puisque les seuls éléments de rationalité dans l'échantillonnage tiennent au fait que l'opérateur s'est seulement attaché à éviter l'homogénéité des échantillons tout en leur donnant la même masse. Ainsi, les masses m_j^i des diverses catégories dans les échantillons sont purement aléatoires.

Validation d'une campagne de tri

Assurément, il n'est pas facile de s'accorder sur un critère unique de validation d'une campagne de caractérisation. On peut tout de même estimer que dans un premier temps, tous ou presque totalité des conditions de pré-campagne doivent nécessairement être réalisées pour que l'opération soit digne de considération. Ensuite, l'on pourrait penser que le critère de validité le plus important est l'hétérogénéité des échantillons. Cependant, cette notion quoique capitale, n'en demeure pas moins purement qualitative. Ainsi, essayons de définir des normes plus ou moins arbitraires en guise de conditions.

Critères sur le nombre de constituants dans un échantillon

1. Un échantillon donné ne peut contenir un et un seul constituant.
2. l'échantillon parfait est celui qui contient tous les constituants de déchets telles que définis dans les objectifs de pré-campagne ou de traitement
3. L'échantillonnage est parfait lorsque tous les échantillons sont parfaits
4. Un échantillon est supposé valide donc hétérogène lorsqu'il contient au moins la moitié des constituants de déchets définis en (2), sinon un autre échantillon est préparé.

Critères sur la masse des constituants

Pour des conditions très orthodoxes, aux critères sur le nombre des constituants pourraient s'ajouter un autre critère sur leur masse. On voudrait ici s'assurer qu'un constituant de déchets donnés n'a pas de masses totalement différentes dans les N échantillons d'une

campagne. En d'autres termes, ce critère veut éviter qu'un même constituant ne soit tantôt sous forme de fine, moyen et gros dans le même échantillon. Concrètement, nous allons utiliser pour cela la notion d'erreurs expérimentales ou statistiques. Appelons \overline{m}_j la moyenne arithmétique des masses du constituant j dans les N échantillons.

$$\overline{m}_j = \frac{\sum_{i=1}^N m_j^i}{N} \quad (12)$$

Formons les écarts entre cette moyenne et la masse du constituant j dans un échantillon i

$$\Delta m^i = \left| \overline{m}_j - m_j^i \right| \quad (13)$$

Prenons comme critère de validation de l'échantillon i, la condition suivante :

$$0 \leq \Delta m^i \leq \Theta \quad (14)$$

où

$$\Theta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta m^i \quad (15)$$

La condition de validation énoncée ci-dessus stipule que pour un constituant j donné, les écarts successifs entre ces différentes masses dans les N échantillons et la moyenne \overline{m}_j , doit être inférieure ou égale à la moyenne arithmétique des écarts du même constituant. Les échantillons qui ne remplissent pas cet autre critère seraient écartés et d'autres préparés. Pour un échantillon idéal, ces écarts sont nuls.

Ainsi, la fusion des deux types de critères donne le critère unique de validation d'un échantillon i comme suit : *un échantillon n'est homologué que si et seulement si, il contient au moins la moitié des constituants préalablement définis et s'il remplit en plus la condition arbitraire ci-dessus énoncée. Pour conclure enfin, la campagne de tri n'est validée que si et seulement si tous les échantillons sont validés.* Dans la pratique cependant, le seul critère d'hétérogénéité serait suffisant.

Détermination de la quantité totale de déchets produits

Ne perdons pas de vue que la détermination des pourcentages des divers constituants des déchets a pour but essentiel, de quantifier les masses totales des déchets d'une localité pour un intervalle de temps fixé. Pour cela, il suffit d'abord de multiplier le pourcentage des divers

constituants de déchets par la masse totale de types de déchets collectés puis l'on fait la somme des masses partielles. Par exemple, supposons que l'analyse des déchets ménagers donne les pourcentages en composition suivante : reste de nourriture 10 %, brindilles, cartons, feuilles etc. (en gros les combustibles) 20 % etc. Pour estimer la masse totale des déchets combustible Q_{co} , on multiplie la masse totale des déchets ménagers Q_{me} (kg) par leur pourcentage (0.20) et ainsi de suite :

$$Q_{comb} \text{ (kg)} = Q_{me} \text{ (kg)} \times 0.20 \quad (16)$$

$$Q_{re}(\text{recyclable, en kg}) = Q_{me} \text{ (kg)} \times \text{pourcentage des matériaux recyclables} \quad (17)$$

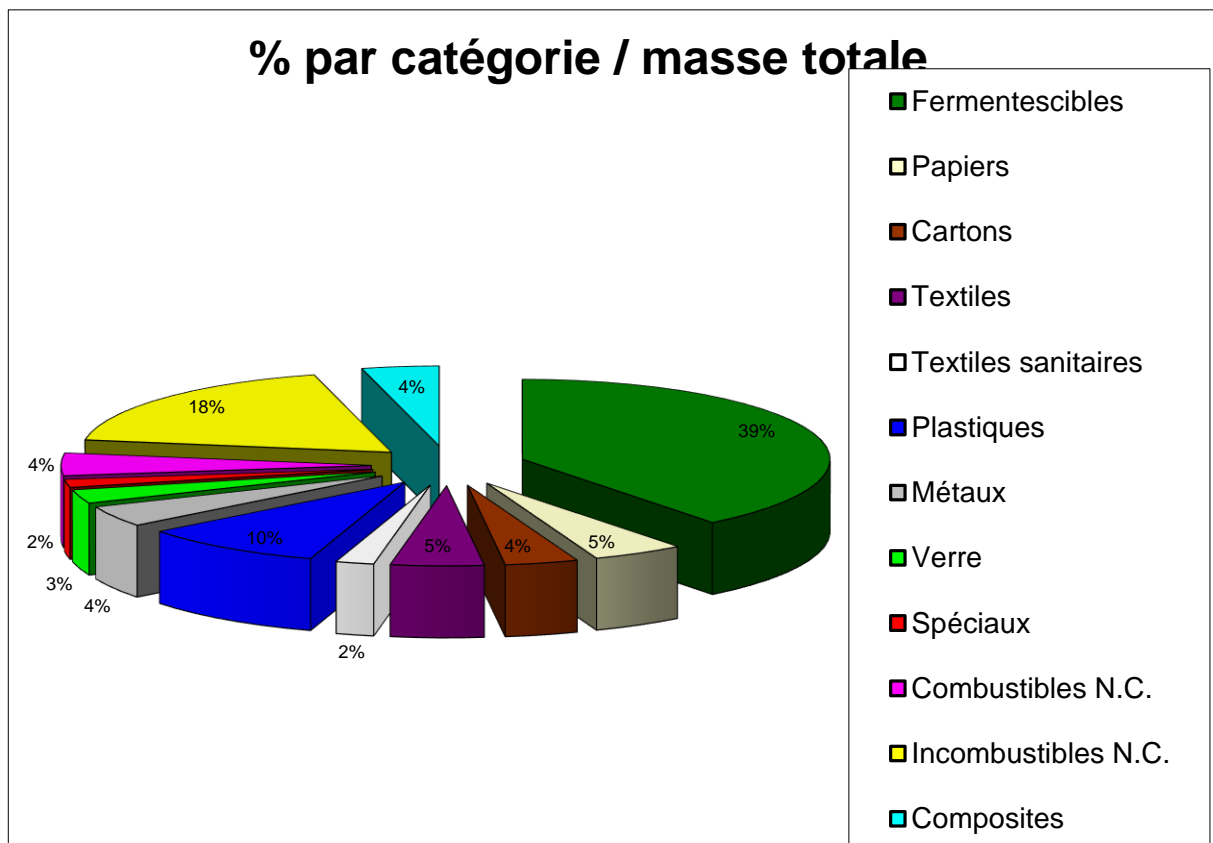
On voit ainsi clairement que si les opérations préalables de collecte, de quantification et de caractérisation sont bien menées en amont, en aval, les quantités des différentes catégories de déchets disponibles pour la valorisation et l'enfouissement seront connues avec une assez bonne précision. Ces exercices comme nous le constatons et le montrerons dans la suite du travail sont essentiels pour la recherche d'investissement et le dimensionnement des équipements de traitement. A titre d'illustration, présentons ci-dessous deux types de catégorisation, l'une des déchets ménagers de la ville de Ouagadougou et l'autre des déchets solides de municipalité des Etats Unis d'Amérique (USA).

Tableau III : Pourcentage de DSU d'une ville des USA [3]

Catégories de déchets	pourcentage
Papier et carton	40.10
Textiles	02.10
Plastiques	08.00
Caoutchouc et cuire	02.50
Bois	03.60
Verre	07.00
Fer	06.50
Aluminium	01.40
Non ferreux	00.60
Déchets de «yard»	17.60
Reste de nourriture	07.40
Autres	03.20
Total	100.00

Le tableau III montre clairement que même aux USA, la composition des déchets est marquée par un fort pourcentage de biomasse formée de bois et dérivée : papier, textiles et un pourcentage important des déchets des «yard» formés surtout de feuilles d’arbres et de vieilles fournitures, essentiellement de vieux meubles en bois.

Tableau IV : Composition des déchets ménagers de la ville de Ouagadougou [2]



Remarquer que proportionnellement, il semble que nous utilisons plus de matière plastique, cependant constituée essentiellement ici de sachets.

g. Propriétés physico-chimiques

Ce paragraphe est examiné en dernier parce que le formalisme introduit précédemment pourrait s’appliquer au calcul de certaines propriétés. Il est bien connu que les propriétés physico-chimiques, thermodynamiques et de transport peuvent être utilisées pour prévoir les méthodes de traitement les plus appropriées. Les propriétés les plus importantes des déchets solides rentrant dans leur traitement sont : la composition (analyse centésimale), la teneur en eau, pouvoir calorifique, le degré de compactage.

Humidité

L'humidité des diverses catégories et partant de l'ensemble des déchets, joue un rôle très important dans leurs comportements vis à vis des méthodes de traitement. Relativement faible en saison sèche, elle peut devenir assez importante en saison des pluies ou par temps couvert prolongé. L'humidité influence d'une part la décomposition et d'autre part le pouvoir calorifique des déchets. En effet, lorsqu'elle est importante, elle accélère leur décomposition, entraînant des rejets considérables de gaz dont surtout le méthane et des odeurs souvent très nauséabondes. Gaz à Effet de Serre (GES), la production de méthane dans les décharges incontrôlées participe de la dégradation de l'environnement. Par contre, lorsque ce rejet est contrôlé, il peut être une source renouvelable d'énergie à multiples usages : cuisine, chauffage, production de froid ou encoure d'électricité. Quant aux odeurs, elles causent des nuances diverses aux riverains et aux passants. Il faut rappeler également, la dégradation souvent permanente de la chaussée et des égouts par les dépôts prolongés des déchets sauvages et humides.

Définissons comme précédemment, l'humidité à base humide H_{uj} d'un constituant j de déchets dans un échantillon i par la relation suivante :

$$H_{uj} (\%) = \frac{m_{jhu} - m_{jsec}}{m_{jhu}} \times 100 \quad (18)$$

Où m_{jhu} et m_{jsec} sont respectivement, les masses des déchets humides et secs, cette dernière étant généralement obtenue en séchant les déchets dans une étuve. On pourrait bien se contenter d'un séchage à l'air ambiant contrôlé. la relation ci-dessus peut être également écrite sous la forme suivante :

$$H_{uj} (\%) = \frac{m_{H2O}}{m_{H2O} + m_{jsec}} \times 100 \quad (19)$$

Où, m_{H2O} est la masse d'eau évaporée. De même, l'humidité de l'échantillon i est donnée par :

$$H_{ui} = \frac{m_{ihu} - m_{isec}}{m_{ihu}} \times 100 \quad (20)$$

Avec $m_{ihu} = \sum_j^K m_{jhu}$ et $m_{isec} = \sum_j^K m_{jsec}$

L'humidité de l'ensemble des DSU est alors donnée par la relation suivante :

$$H_{uDSU} = \frac{m_{huDSU} - m_{secDSU}}{m_{huDSU}} \times 100 \quad (21)$$

Avec $m_{huDSU} = \sum_i^N \sum_j^K m_{jhu}^i$ et $m_{secDSU} = \sum_i^N \sum_j^K m_{jsec}^i$

Le constat général qui peut être fait est qu'au Burkina, à cause de la température moyenne annuelle relativement élevée, la teneur en eau des déchets serait faible exceptée pendant la saison des pluies (juin-septembre).

Le pouvoir calorifique

La seconde propriété la plus importante des DSU est le Pouvoir calorifique. Défini comme étant l'énergie libérée par la combustion complète de l'unité de masse (ou de volume), il est fortement influencé par deux paramètres qui sont : l'humidité et la composition du combustible. Pour un combustible donné, le pouvoir calorifique est effectivement fonction de sa teneur en eau puisque cette eau contenue dans le produit absorbe de l'énergie pour s'échauffer et se vaporiser. Ainsi, plus la teneur en eau est élevée plus grande sera l'énergie absorbée par unité de masse de combustible lors d'une combustion. Lorsque la vapeur d'eau formée au cours d'une réaction de combustion quitte le milieu réactionnel à l'état gazeux, le Pouvoir Calorifique est qualifié d'Inférieur (PCI). Il est caractérisé de Supérieur (PCS) lorsque la vapeur d'eau restitue sa chaleur en se condensant. Ils sont liés par la relation simplifiée suivante :

$$PCI (T) = PCS (T) - h_v (T) \frac{m_e}{m_f} \quad [4] \quad (22)$$

Où m_e et m_f représentent respectivement, les masses d'eau formée et celle du combustible et $h_v (T)$ l'enthalpie de vaporisation de l'eau à la température de la réaction T. Ainsi, si les déchets doivent subir des traitements thermo-physiques, on veillera à ce que sa teneur en eau soit la plus basse possible. Pour plus de rentabilité, il est conseillé de procéder au séchage par épandage sur un sol bien dégagé de la poussière en particulier.

Comme souligné plus haut, le pouvoir calorifique des déchets est fortement tributaire de sa composition. Celle-ci dépend de plusieurs facteurs dont: le lieu de collecte, la saison etc., confère Tableaux III et IV. Malgré ces paramètres, il est admis que son pouvoir calorifique d'une manière générale s'apparente à celui du bois comme l'indique le Tableau ci-dessous. On constate que les DSU combustibles ont un pouvoir calorifique assez proche de celui du bois. Ainsi, en triant convenablement les déchets combustibles, ils peuvent représenter une source importante d'énergie renouvelable. La faible valeur de pouvoir calorifique de la deuxième référence, (4450 Btu/lb dernière colonne) par rapport à la première est principalement due à la teneur en eau. A cet effet, la formule empirique suivante peut être utilisée :

$$PCI (\text{à une teneur en eau de } x \%) = PCI (\text{à } 0 \% \text{ de teneur en eau}) [1 - x\%]$$

Tableau V : Comparaison de la composition centésimale et du PCS du bois et des DSU

	Ecorce de jeune Sapin	Ecorce de vieux tronc	DSU (%)	
Composition centésimale (%)				
Cendres/inorganique	01.50	05.30	14.40	24.40
Sulfure	00.10	00.10	00.20	00.15
Hydrogène	05.50	05.40	05.70	03.40
Carbone	55.30	49.70	42.50	25.60
Oxygène et Azote	37.60	39.50	37.20	20.30 et 00.50
Teneur en eau	-	-	-	25.20
Chlorine	-	-	-	00.45
Total	100.00	100.00	100.00	100.00
PCS (Btu/lb) ^a	9300 ^b	8830 ^b	8600.00 ^b	4450 ^c

a. 1 Btu/lb = 2.326 kJ/kg

b. Base sèche [3]

c. Base humide [5]

Éléments de caractérisation

Déchets classés dangereux

Nous rangeons comme dangereux les déchets toxiques et dans une moindre mesure les plastiques.

Les déchets toxiques: Sont classés comme déchets toxiques tous les déchets qui d'une manière générale ont un effet néfaste (nous reviendrons sur les déchets radioactifs) plus ou moins prononcé sur la santé humaine et animale ainsi que sur l'environnement. La classification étant fonction du seuil de toxicité arrêté comme nuisible, une liste exhaustive devrait être dressée dans chaque localité par les DGVTD après enquêtes et investigations : les plus en vue sont les pesticides, les huiles usées, les restes de peinture, les familles de détergent etc. Leur séparation peut se faire en procédant d'abord à un tri grossier mais efficace et peut coûteux dès la collecte. Il est en effet plus facile d'isoler sur la base de leurs provenances (nature de la source), des déchets spécifiques donnés en procédant à un maximum de ramassages individuels auprès des unités industrielles, des grandes surfaces de commerce, des hôpitaux, en particulier auprès de tout secteur produisant ces types de déchets. Ensuite, ceux-ci peuvent subir un deuxième tri plus minutieux cette fois mais toujours sur place pour isoler définitivement les déchets représentant un danger particulier, figure 1. Concrètement, la tâche peut se faire soit en prévoyant deux bacs pour la même unité de production à fin de séparer

définitivement les produits à isoler soit en procédant directement à la séparation au moment du ramassage. Les déchets jugés toxiques sont ensuite mis ensemble pour un confinement ultérieur.

Les plastiques : Les spécialistes dénombrent à ce jour sept (7) catégories de plastiques à savoir : polyéthylène, polystyrène, polychlorure de vinyle, polyéthylène, téréphtalate, polyuréthane, plastiques techniques [2]. Les plastiques sont taxés de dangereux surtout à cause de leurs effets néfastes sur l'environnement. Grâce aux avantages économiques comparés et à leur versatilité, les plastiques se sont substitués aux matériaux traditionnels tels les métaux, le verre et le papier. Ils sont utilisés dans tous les secteurs de la vie courante : dans l'industrie, dans les ménages ainsi que dans l'agriculture. Le type le plus répandu dans nos localités est le sachet. Si dans les pays développés leurs bienfaits sont comptés (industrie, agriculture etc.), dans nos pays par contre, ils sont devenus en l'espace de quelques années, une grande catastrophe écologique surtout dans les grandes agglomérations et si rien n'est fait d'ici là, ils s'étendront inexorablement à toutes nos campagnes. En effet, le plastique a une grande stabilité et une longue durée de vie comparée aux autres types de déchets notamment d'origine végétale. Ainsi, lorsqu'ils sont déchargés ou tout simplement rejetés dans la nature, ils tuent la végétation qu'ils recouvrent en les desséchant. En outre, très souvent enfouis dans les herbes des pâturages, ils deviennent de véritables poisons lorsqu'ils se retrouvent dans les estomacs des animaux.

Déchets spéciaux

Par déchets spéciaux nous entendons surtout ceux radioactifs. Pour l'instant, l'auteur n'a pas d'indication de l'existence de ce type de déchets au Burkina. Signalons que les sources potentielles sont : les centrales nucléaires, les usines d'armements spéciaux, les grands Laboratoires, soit universitaires ou particuliers, les hôpitaux et même le commerce. Il est tout de même important de ne pas baisser la garde compte tenu du grand danger que représente ce type de déchet.

Déchets à valoriser

Nous distinguerons d'abord ceux qui sont ramassés individuellement auprès des unités industrielles. Ils peuvent être directement acheminés vers les centres de traitement si le tri grossier est jugé suffisant ou subir un deuxième tri plus poussé. Pour les déchets ramassés en vrac dans les ménages ou les marchés, ils subiront un deuxième tri plus poussé dans les centres de tri pour isoler les déchets pour des traitements ultérieurs en l'occurrence le recyclage, le compostage et la combustion, figure 1. Concrètement, le tri peut se faire ici de manière mécanique ou manuelle. Le tri mécanique consiste par exemple à faire passer les déchets sur des surfaces aimantées ou séparateurs magnétiques de nature à retenir tous les déchets

ferreux. Les déchets peuvent être aussi réduits en taille mécaniquement par cisaillement. Ils peuvent aussi être triés en les faisant passer sur un ou plusieurs tamis à mailles différentes. Le tri par tamis et le tri manuel sont de loin les plus conseillés dans nos localités parce que non seulement très peu coûteux mais procurent également des emplois. Le tri manuel consiste tout simplement à séparer à la main en se basant sur des propriétés bien définies, les déchets entreposés dans des sites de stockage.

III. 3. 5. Sous-modèle III-5 : Traitement et valorisation des DSU

Ce sous module est la dernière étape de la gestion quotidienne du CSAV. En effet, après la collecte et la caractérisation, il reste à mettre en place des méthodes de traitement simples et efficaces, peu coûteuses, prenant en compte le manque de moyens humains, matériels et financiers de nos localités. En se basant sur les résultats fournis par les opérations de caractérisation, les méthodes de traitement les plus appropriées qui préservent l'environnement et qui ont des retombées économiques et sanitaires directes pour les populations sont les suivantes: l'enfouissement, le recyclage, l'incinération et le compostage. Seront recyclés: les plastiques d'un côté, et de l'autre, le fer, l'aluminium, les alliages. Les combustibles s'entendent: la biomasse, le papier, les cartons, le caoutchouc et le cuire tandis que les déchets à composter seront surtout les restes de nourriture (peaux ou fruits avérés de bananes, pastèques etc.) et autres déchets organiques, en somme les fermentescibles. Ces méthodes peuvent être regroupées en deux grandes classes que sont : la classe des méthodes dites de valorisation et la classe des méthodes d'enfouissement. Ce nouveau regroupement des différentes catégories des déchets est présenté dans le tableau ci-après:

Tableau VI : Regroupement des différentes catégories de déchets avant traitement

Groupes de catégories de déchets	Composition
Méthodes de valorisation	
Incinération	Biomasse, papier, cartons, caoutchouc, cuire
Compostage	Reste de nourriture et autres déchets organiques
Recyclage 1	Fer, aluminium, argent, cuivre et alliages
Recycler 2	Toutes les catégories de plastique
Méthode d'enfouissement	
Enfouissement	Déchets dangereux (médicaux et chimiques) Déchets spéciaux (radioactivités et autres)

LA VALORISATION DES DECHETS

La valorisation consiste en somme, à redonner une valeur marchande à certaines catégories de déchets, considérés au départ comme inutiles, encombrants et même nuisibles. Au nombre des méthodes de valorisation des déchets nous avons retenu les plus importantes qui sont: le recyclage, l'incinération et le compostage.

III. 3. 5. 1. Le recyclage

Le recyclage a un double objectif; d'abord redonner une valeur sociale puis marchande à des déchets qui les avaient perdues auparavant. Ainsi, les morceaux de fer, de tôle d'aluminium etc. qui auraient été tout simplement enfouis dans le sol, sont récupérés et transformés en produits socialement utiles tels des ustensiles de cuisine, des équipements de jardinage, procurant en même temps au fabricant un revenu monétaire. Nous avons singularisé deux types de recyclage, celui des métaux (Q_{rm}) et celui du plastique (Q_{rp}). Si la quantification et la caractérisation sont bien menées, il est alors possible d'estimer le potentiel des déchets à recycler donc leur apport monétaire à la communauté.

Recyclage des métaux et des alliages

Il suffit de faire un tour des grands centres urbains du Burkina et particulièrement de la ville de Ouagadougou pour se convaincre de l'importance du recyclage de cette classe de déchets. Le fer, l'aluminium et l'argent servent surtout à la fabrication des ustensiles de cuisine, de matériel de jardinage, à la confection de parures, d'ornements etc.: on rencontre donc, des marmites, des louches, des fourneaux de divers types, des seaux, des arrosoirs, des bracelets, des ornements pour chevaux etc. Quant au travail du cuivre et du bronze, ils confèrent à l'artisanat local une renommée qui dépasse les frontières du pays. L'acquisition de cet alliage fait de cuivre, de zinc et d'étain est pour l'essentiel le produit de la récupération. Il s'agit de certaines pièces usées de moteurs, de vieux robinets, de fils de cuivre usagés de la SONABEL. Ces déchets sont retirés des décharges publiques ou directement aux endroits où ils sont produits à savoir les garages ou dans les bacs individuels de déchets. Cette pratique qui du reste aide les Municipalités à se débarrasser gratuitement d'une partie des déchets, ne permet cependant pas une bonne quantification de cette catégorie de DSU. Pour ceux-ci en effet, le seul moyen de mesurer leur importance est de faire des investigations auprès du secteur informel. Quant à la fabrication des objets proprement dite, elle procède de plusieurs techniques [6] dont:

- * Le martelage qui consiste à marteler à froid ou à chaud le métal pour lui donner la forme désirée ; ce procédé s'applique aussi bien au travail du fer, du cuivre que du bronze.
- * Le moulage à vif : cette technique qui s'applique à de petits exemplaires calcinables consiste d'abord à la récupération de certains petits animaux morts tels que les lézards, les

oiseaux, les insectes et autres branchages. L'objet à reproduire est ensuite immobilisé par des aiguilles et des pointes et recouvert d'une couche d'argile, le canal servant à conduire l'alliage liquide pendant la coulée, est façonné et déposé au soleil. Le moule et son modèle sont mis au feu pendant quelques heures pour tour à tour extraire l'eau et calciner complètement le prototype. Finalement, intervient l'évacuation des cendres, le coulage et l'enlèvement de l'argile pour libérer le modèle en bronze.

* Le moulage à la cire perdue qui s'apparente à la technique précédente et n'en diffère essentiellement que par l'introduction de la cire.

Toujours selon la même source [6], le travail du bronze qui est de plus en plus populaire de nos jours, était autrefois réservé à certaines familles telles que les Touré, les Dermé et les Sanfo. Aujourd'hui encore, le quartier Youngsé de Ouagadougou, habité traditionnellement par les Dermé, reste le centre du bronze.

Cette partie du secteur informel est très dynamique et occupe une frange importante de la population de nos agglomérations. Alors que le bronze est essentiellement destiné aux acheteurs étrangers à travers des vitrines marchandes et pendant les foires et expositions internationales comme le Salon International de l'Artisanat de Ouagadougou (SIAO), les autres sous produits alimentent quant à eux la consommation interne. En effet, des habitudes culinaires auxquelles s'ajoutent les prix de nos jours, obligent encore beaucoup de familles à se tourner vers les ustensiles de cuisine fabriqués par les fondeurs des quartiers, sans oublier les outils de labour et de jardinage.

L'apport réel de ce secteur d'activités en termes de devises et de bien être social est très considérable et certainement sous évalué. Des enquêtes minutieusement préparées et exécutées pourraient permettre de cerner le sous secteur dans toute sa diversité, son état de développement, le nombre et l'ingéniosité de ces acteurs. On pourrait ensuite rechercher en collaboration avec les premiers intéressés, des perspectives durables pour non seulement sa propre survie mais également pour sa compétitivité face à la globalisation de l'économie. Dans ce cadre, une place importante devrait être laissée à l'initiative individuelle mais aussi à des stages de formation liant la créativité au savoir-faire et techniques modernes de soudure, polissage et à la connaissance des propriétés physico-chimiques des matériaux utilisés.

Il faut noter enfin qu'en plus du recyclage direct sur place, de grandes quantités de métaux récupérées sont exportées offrant ainsi une voie supplémentaire de rentrée de devises.

Recyclage des plastiques

Par plastique nous entendons toute la famille des plastiques. Par leur versatilité, le plastique a bousculé toutes les habitudes pour s'imposer comme emballage et cela à tous les niveaux. Beaucoup de solutions ont été proposées pour lutter contre le fléau mai il faut

l'avouer avec des succès qui nous laissent encore entre les mains de grandes quantités de déchets non traités. En effet, leur recyclage tourne surtout autour de la confection de quelques jouets, d'objets de décoration et de sacs, par des associations de femmes et d'ONG. A leur crédit, il faut souligner que certains acteurs maîtrisent parfaitement de nos jours, leur sujet. Cependant, en plus du fait que ces transformations consomment de petites quantités, il n'est pas exclu que les plastiques utilisés aient été préalablement en contact avec des produits dangereux, les rendant alors impropres à une manipulation humaine. S'il faut encourager de telles activités qui somme toute procure des revenus, il y a lieu donc de s'assurer qu'elles ne mettent pas en danger la vie des acteurs eux-mêmes ainsi que celle des autres citoyens . Si de telles précautions sont prises, nous proposons d'associer à ces voies de recyclage, la fabrication de matériaux de construction à partir du plastique. Ces produits auront deux destinations principales à savoir : le pavement des routes et fournir la matière première pour l'isolation par exemple dans la construction de fosses septiques, de caniveaux, de puits perdus et de puits d'enfouissement de déchets. Pour développer ce savoir-faire, il suffit que les municipalités commanditent des travaux de recherche-développement auprès de certains Laboratoires de nos universités ou instituts de recherche. Utilisant des déchets comme combustibles, le plastique pourrait être fondu dans un premier temps jusqu'à l'obtention d'une patte qui serait ensuite coulée dans des moules de divers formats et dimensions selon la destination du produit fini. Les températures de fonte seraient convenablement choisies pour éviter la combustion du plastique, de sorte à minimiser la production de gaz polluants surtout, les NOx, le CO₂ et les POPs. Des précautions supplémentaires doivent être prises pour éviter de mettre les travailleurs et les chercheurs en contact direct avec le plastique à tous les stades de leur manipulation et/ou de la recherche.

III. 3. 5. 2. Le compostage

Le but recherché ici est la fabrication de compost, un fertilisant naturel à base de la composante purement organique des déchets. La technique traditionnelle de compostage est dans l'ensemble assez bien connue, même dans toutes les petites localités. Il suffit d'y apporter la touche scientifique indispensable pour le rendre plus efficace et plus attrayant surtout pour les citoyens. Les aires de compostage doivent être dimensionnées en fonction des quantités de déchets à traiter et de la fourchette de temps prévu pour un cycle complet. Elles doivent en outre être situées à des emplacements très accessibles aux populations et aux lieux d'utilisation. Des expériences pilotes doivent être menées avec les premiers intéressés tout en tirant parti des résultats obtenus ailleurs. Ces expériences pourront être qualifiées de scientifiques si seulement elles sont entourées de précautions requises à savoir, tout le cycle doit faire l'objet de suivi-évaluation-contrôle avec des équipements proprement étalonnés et

des campagnes de mesures suivant des plages de temps et de fréquences appropriées. Le CREPA [7] fait état d'une expérience de compostage ayant lieu en mai au Burkina, avec des ordures ménagères composées de 60% de matières organiques, un taux moyen d'humidité de 30% et un rapport C/N de 23. Deux andins de 6 x 3x 1.5 m ont été confectionnés à cet effet. Les retournements ont été opérés deux fois par semaine pendant un mois. Après quarante-cinq jours, le rapport C/N est passé de 23 à 15 pour atteindre 11 au 75^{ème} jour et s'est stabilisé à cette valeur au 90^{ème} jour. Les températures elles passent de 54 °C au premier jour à 98 au 12^{ème}

Malheureusement, une synthèse d'expériences entreprise par le même organisme conclut à la nécessité de mener plus de travail parce que les résultats disponibles ne permettent pas de tirer des tendances définitives par exemple quant à la teneur des métaux lourds ou aux risques de contamination bactérienne. Ainsi, le constat est que très peu d'évaluations de la qualité physico-chimiques du compost ont été faites dans les pays au Sud du Sahara.

De l'avis de l'auteur cependant, le compostage et le recyclage des métaux et des alliages constituent les deux pôles d'activités les plus producteurs d'emplois et de revenus aux citadins, le compostage étant par comparaison, le seul à pouvoir traiter de grandes quantités de déchets organiques. D'où l'urgente nécessité d'entreprendre diligemment la recherche-développement dans le domaine.

III. 3. 5. 3. L'incinération

Lorsqu'ils sont produits en grandes quantités comme dans les grandes agglomérations, les DSU constituent une source non-négligeable d'énergie renouvelable puisqu'il a été montré que malgré leur composition qui est fonction de plusieurs paramètres dont l'origine, la saison etc., leur pouvoir calorifique n'est pas très éloigné de celui du bois-énergie. Pour plus de clarté, nous classerons les techniques thermiques de traitement en méthodes modernes et traditionnelles:

Méthodes modernes de traitement thermique

Au nombre de ces méthodes il faut citer la combustion directe et la gazéification.

La combustion directe: Les DSU peuvent être brûlés directement dans des lits fixes ou fluidisés d'incinérateurs pour la production d'eau chaude, d'électricité ou des deux à la fois. Ils peuvent être brûlés directement après leur ramassage ou subir au préalable un tri poussé qui les débarrassent des non-combustibles, ce qui permet d'obtenir un combustible plus homogène à pouvoir calorifique élevé; ce combustible peut être en outre brûlé seul ou en combinaison avec d'autres combustibles comme le bois [8] ou les déchets agricoles (pour le cas du Burkina) ou encore avec du charbon naturel. Ces incinérateurs, qui s'appuient sur les connaissances accumulées depuis longtemps sur les chaudières à charbon, sont fonctionnels à

travers le monde (USA et Europe notamment) et doivent être équipés de systèmes d'abattements de rejets gazeux pour un respect des normes environnementales.

La gazéification : Composante de la conversion thermo-chimique qui comprend en outre la pyrolyse/carbonisation et la densification, la gazéification consiste en une oxydation incomplète des déchets à une température comprise entre 900 et 1500 °C. Le procédé est pratiquement identique à celui de la combustion directe mais on délivre ici moins de combustible et généralement, il se fait en présence de vapeur d'eau sous pression qui en réagissant directement avec le combustible lui-même et/ou avec les gaz formés (CO en l'occurrence) produit plus de produits gazeux que la combustion directe, ce qui est justement recherché. Le gaz obtenu, de composition généralement connue (CO, H₂, CO₂, CH₄ et N₂) doit encore être purifié avant son utilisation courante ou dans des turbines à gaz.

Ces deux procédés qui ne sont pas recommandés à présent, nécessitent non seulement des fonds d'investissements hors de portée de nos villes mais nécessitent également des moyens humains et techniques importants pour leur mise en œuvre et leur gestion.

Méthodes traditionnelles de traitement thermique

A côté des moyens financiers énormes à mobiliser pour la mise en œuvre des Centrales Thermiques à déchets, il serait plutôt plus avantageux d'utiliser des méthodes simples de conversion à la portée des utilisateurs locaux. Pour ne prendre aucun risque de contamination des aliments, nous déconseillons totalement l'utilisation des déchets combustibles pour la cuisson directe des mets, que ce soit dans les foyers trois pierres ou dans les fours à viande ou encore pour la fabrication du pain. Nous préconisons plutôt la cuisson de la céramique et des briques dans les fours traditionnels.

Cuisson de céramique

Une investigation menée par une équipe de chercheurs de l'université de Ouagadougou a classé les fours traditionnels de cuisson de céramique en trois types [9] ; le type I est constitué d'une aire dégagée où les pièces à cuire sont disposées directement à même le sol puis entièrement recouvert de combustibles faits de pailles, tiges de mil, bouse de vaches etc. Le type II est similaire au premier sauf qu'une fosse de quelques centimètres de profondeur est creusée pour recevoir la fournée, l'ensemble étant ensuite recouvert de combustibles. Le type III est de section cylindrique rappelant les maisons en toit de chaume très populaire en pays Mossi. Il est muni à sa base de quatre tuyères servant à la fois d'entrée d'air et d'alimentation en combustible. Des trois fours, l'équipe a retenu le type III comme étant la plus performante et recommandé sa vulgarisation. Il reste que pour conduire à terme ces genres de cuisson, il est nécessaire de redimensionner les fours eux-mêmes en fonction des propriétés spécifiques liées aux combustibles ainsi qu'à la nature des cuissons. En effet, en plus de la faiblesse de

leur pouvoir calorifique comparée à ceux des tiges de mil et du bois, les déchets sont généralement en vrac, ce qui doit conduire à la recherche de voies originales de conduite de cuisson. Concrètement, tout laisse à croire qu'ici, les tuyères ne peuvent servir uniquement que d'entrée d'air, le combustible devant être alimenté par le haut, les fours étant dits alors être à contre courant parce que l'air et le combustible sont introduits dans le four en sens inverse. Deux autres types de four [9], classés types IV (à voûte) et V (préindustriel) ont été également recensés, mais du fait qu'ils ont été introduits récemment, leur technique de construction n'est maîtrisée que par quelques initiés, accroissant ainsi les investissements.

III. 3. 5. 4. L'enfouissement

Il y a lieu de distinguer au moins trois (3) types d'opérations : l'enfouissement des déchets toxiques et radioactifs et enfin, l'enfouissement des déchets ordinaires dégradables.

Déchets dangereux : médicaux, restes de produits chimiques etc. : L'opération est de nature hautement technique et donc doit être exécutée par des spécialistes. En effet, les déchets préalablement caractérisés et stockés selon les indications définies aux paragraphes précédents doivent être ensuite enfouis de manière à éviter la contamination de la nappe phréatique. Les techniques dans ce cas ressemblent dans une certaine mesure aux techniques de confinement utilisées pour isoler les déchets radioactifs. Des prospections géophysiques seront entreprises pour choisir les sites d'enfouissement appropriés. Ensuite, il faut procéder à la pose de revêtements spéciaux non perméables accompagnés dans certains cas de matériaux spécifiques de construction. Dans tous les cas, on s'attachera les services d'institutions spécialisées de géophysique et de génie sanitaire. L'ensemble de l'opération aura un coût d'investissement relativement élevé qui devra comprendre outre le montant des prestations des deux unités citées précédemment, le prix des matériaux de construction du site ainsi que la réalisation de l'ouvrage. Il faut également noter que les ressentiments des populations riveraines envers ces sites deviendront de plus en plus grande avec le temps. Les structures municipales en charge de ces dossiers devraient donc se préparer en conséquence pour affronter à l'avenir ce problème de nature sociale, juridique et économique. .

Pour un dimensionnement brut du site, supposons connu le masse totale Q_{PT} (kg) des déchets toxiques à enfouir, leur volume Q_{VT} (m^3) est donné par :

$$Q_{VT} (m^3) = Q_{PT} (kg) \times C_{PT} (kg/m^3) \quad (23)$$

Où C_{PT} est le degré de compactage de l'enfouissement préalablement défini et fonction de la nature du sol, de la topographie du site, de la nature des déchets et enfin des considérations économiques. Pour simplicité, admettons le rapport suivant : 1 : 2 : 1 entre les trois

dimensions, Longueur (L), Profondeur (P), largeur (l) ; en d'autres termes si χ est la valeur de la largeur en mètre (m), on a :

$$Q_{VT} (m^3) = 2 \chi^3 \quad (24 a)$$

$$\chi (m) = [Q_{VT} / 2]^{1/3} \quad (24 b)$$

Ainsi : $L = 2 \chi$ en mètre et $P = l = \chi$ en mètre.

En fonction des quantités de déchets à enfouir, on prévoira un nombre de sites en conséquence sans perdre de vue l'augmentation sans cesse de la quantité des déchets (Gestion prévisionnelle).

Déchets ordinaires dégradables

Nous l'envisageons dans deux cas spécifiques:

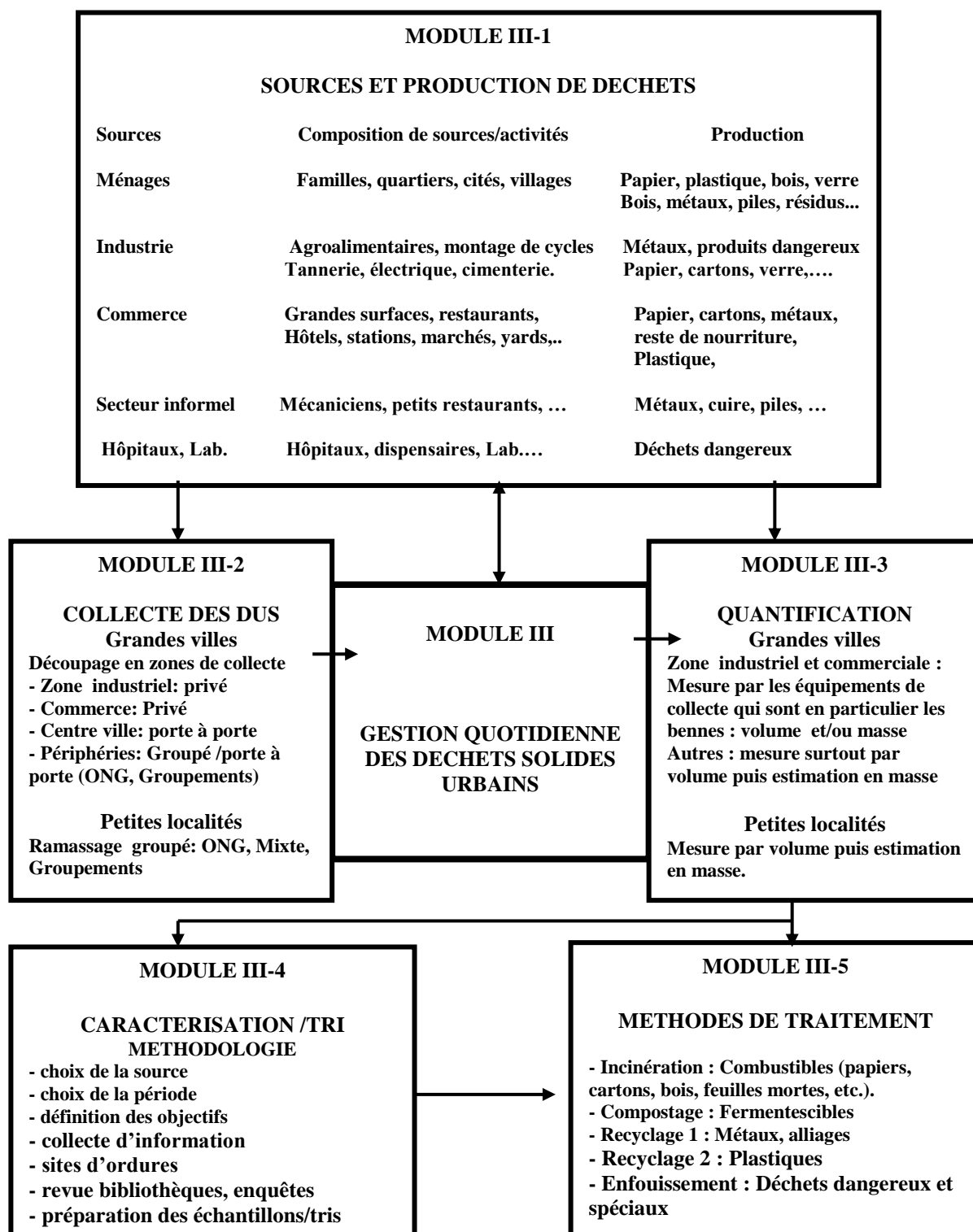
Premièrement, la récupération des terres arides et dégradées soit par l'érosion pluviale et éolienne, soit lors des réfections des routes ou encore lors de l'orpillage. Les maîtres d'œuvre de cette opération seront soit l'Etat, soit les ONG ou le Privé ou encore de simples citoyens. Des contrats de partenariat devront alors être signés dans ce sens. Ici également, on fera appel à des spécialistes pour une meilleure rentabilité des investissements qui devraient cependant être comparativement très inférieures au premier cas. Sans être un spécialiste, on peut spéculer qu'une fois le site choisi, on devrait procéder à l'épandage direct des déchets ou après une légère préparation du sol. Après opération, il est nécessaire de retenir les déchets avec des gabions en pierre et de répandre dans certains cas, de la terre fraîche sur l'ensemble afin d'accélérer leur dégradation et de limiter leur dispersion par les vents. Si cette campagne est bien menée, elle participera à la fois à l'augmentation des revenus en campagne et au processus de développement durable. En effet, les terres régénérées peuvent servir à la fois à la production agricole et animale ou tout simplement à la restauration du couvert végétal. L'impact de l'opération peut donc être évalué en terme de production agricole (tonne/an) et/ou en terme de m^3 de ligneux régénéré.

Deuxièmement, la fabrication du biogaz; en effet, les déchets organiques dégradables rencontrés ci-dessus et les déchets des animaux peuvent être utilisés pour la fabrication du biogaz. Ce procédé qui est classé dans bioconversion est totalement différent de la gazéification. Une expérience pilote [10] effectuée dans les années 80 au Burkina a permis d'atteindre des résultats forts encourageants mais pour des raisons que l'auteur ignore, la vulgarisation de la technique ne semble pas avoir réussi. Des digesteurs de types discontinus, continus et semi-continus ont été testés ; les coûts variaient entre 870 000 et 425 000 F CFA

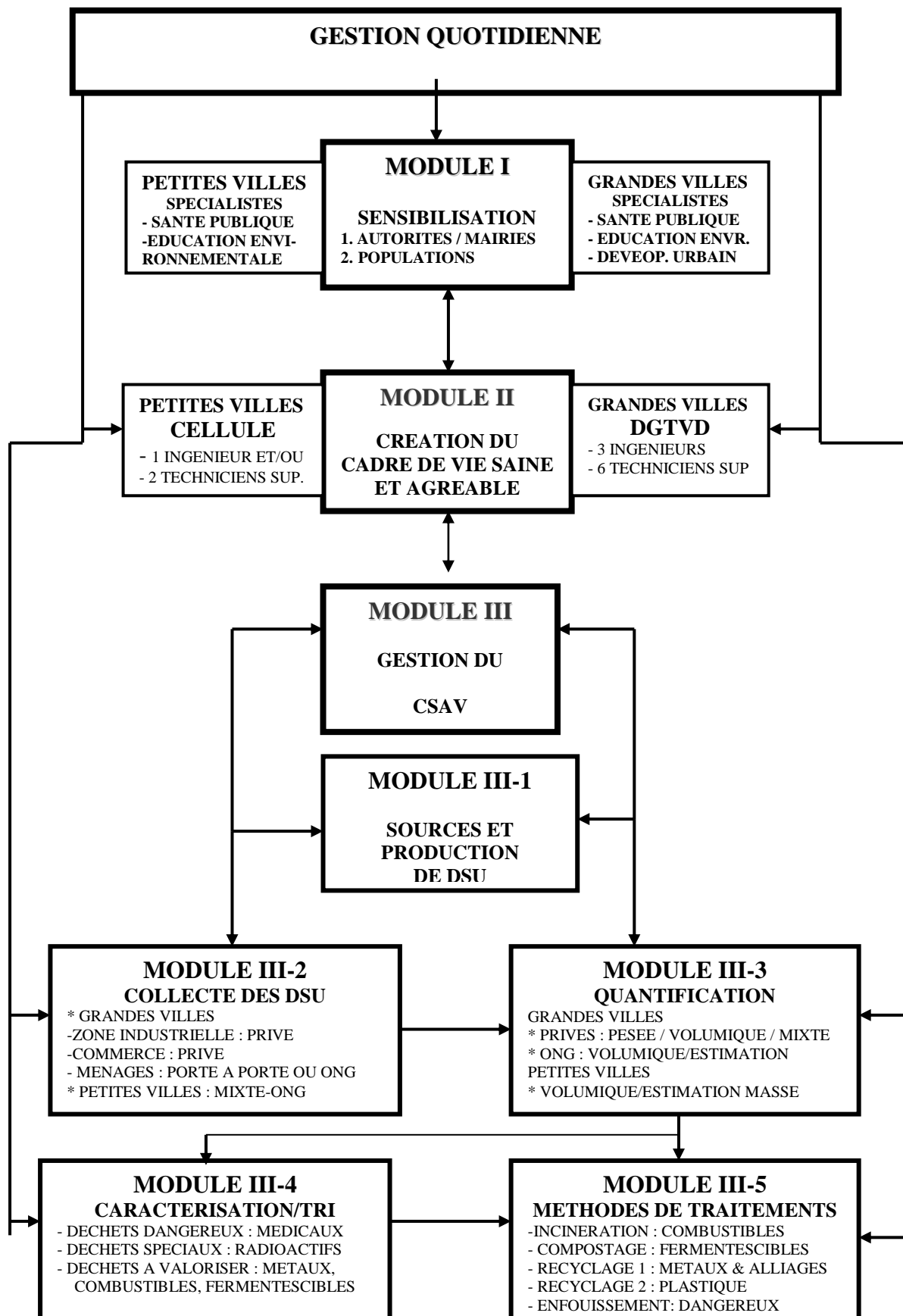
pour des installations expérimentales composés respectivement des équipements suivants : 3 cuveries de 5 m³ chacune, 3 couvercles, gazomètre et installations d'utilisations et de l'autre, 2 cuveries de 5 m³ chacune, 2 couvercles et le reste inchangé. Il a été observé une plus value avec l'apport du compost sur des cultures n'ayant reçues aucune fumure minérale: + 52 % pour le sorgho grain et + 66 % pour l'arachide.

Déchets radioactifs : Il n'existe ni de centrale nucléaire ni d'usine d'armements nucléaires et en principe pas de sites de dépôt tant à l'intérieur que dans la sous région. Les déchets radioactifs qui pourraient exister proviendraient soit de centres de recherche, soit d'hôpitaux ou du commerce. Ils seraient donc de faible radioactivité dont essentiellement des gants, des tissus de nettoyage, des blouses, des eaux usées etc. Dans les villes où ces déchets existent ou sont susceptibles d'exister, il y a lieu de faire appel à des spécialistes pour la recherche et pour le traitement.

III. DIAGRAMME INDICATIF DU MODULE III



IV. DIAGRAMME COMPLET DE LA GESTION QUOTIDIENNE



IV. GESTION PREVISIONNELLE OU ASSISTEE PAR ORDINATEUR

IV. 1. MOTIVATION ET OBJECTIF GENERAL

La première partie du Plan apporte des solutions du moment aux problèmes de gestion de déchets qui se posent aux localités. Seulement, ces déchets ne cessent de croître de jour en jour, du à la croissance des localités elles - mêmes. Par conséquent, pour éviter que ces solutions ne deviennent très vite caduques et entraîner par la même occasion de perpétuels recommencements, il y a lieu de partir de l'ensemble des données recueillies pendant la phase de quantification pour concevoir un programme de simulation informatique capable de suivre l'évolution des problèmes pendant une période relativement longue. Concrètement, il s'agit de concevoir un modèle de gestion globale capable non seulement de faire des projections sur les quantités de déchets mais éventuellement aussi sur le coût des ouvrages à réaliser ainsi que les retombées socioéconomiques éventuelles auxquelles peuvent s'attendre les populations. Pour cela il faut choisir des sous-modèles et attacher un indicateur crédible et quantifiable à chacun d'eux. Par exemple on prendra comme indicateur la croissance (ou décroissance) économique pour prédire l'accroissement possible de la production de déchets due aux secteurs industriel et commercial. La croissance de la population peut être également prise comme indicateur pour projeter la production de déchets par les habitants à une période donnée etc. Le modèle sera appliqué au cas de la ville de Ouagadougou où quelques données sont disponibles.

IV. 2. OBJECTIFS SPECIFIQUES

De façon spécifique il s'agit de recueillir des données sur les déchets solides urbains, la population et l'économie pour la période de référence 2005. Puis de concevoir à partir de ces bases de données, un programme informatique de simulation qui permet de générer tous les ans et cela jusqu'à l'horizon temporel 2025:

- * la population de la ville de Ouagadougou en fonction des hypothèses émises
- * les quantités et types de déchets (compostage, métaux, plastiques, combustibles, dangereux)
- * les quantités de canaris et de briques que l'on pourrait cuire en utilisant les déchets combustibles ainsi que les revenus qui en découlent
- * les quantités d'objets fabriqués à partir des métaux de récupération et les revenus liés
- * les quantités de compost fabriqué et les revenus associés
- * le nombre et dimensions des fosses d'enfouissements à construire pour les déchets dangereux et spéciaux
- * le nombre de personnes qui pourraient visiter la ville à cause des meilleures conditions de vie et les retombées économiques

- * le nombre d'unités économiques attirées par le CVSA et les apports en terme de création d'emplois et d'impôts payés aux caisses des Municipalités
- * les économies réalisées par rapport à l'amélioration de la santé de la population
- * les capitaux à rechercher pour les divers investissements
- * etc.

IV. 3. FICHE TECHNIQUE DE LA VILLE DE OUAGADOUGOU [11, 12]

IV. 3. 1. Situation géographique

Ouagadougou, capitale du Burkina est le chef lieu de la province du Kadiogo. La ville est située au centre du plateau Mossi à une altitude moyenne de 300m avec un relief très peu prononcé. Sa superficie est de 502 km² dont : 217,5 km² de zone urbaine et 302,5 km² de zone périurbaine.

IV. 3. 2. Administration

La ville compte 30 secteurs organisés en 5 arrondissements dont:

- L'arrondissement de Baskuy qui regroupe 12 secteurs
- L'arrondissement de Nongremasson qui regroupe 6 secteurs
- L'arrondissement de Bogodogo qui compte 5 secteurs
- L'arrondissement de Boulmiougou avec 4 secteurs
- L'arrondissement de Signonghin composé de 3 secteurs

IV. 3. 3. Démographie

Ouagadougou connaît une croissance accélérée depuis 1960 en raison de l'exode rurale. En 2002, 40% de sa population était des migrants. Sa population est passée de 600 000 à 1 000 000 d'habitants entre 1985 et 1995. La ville s'étend sur 22 000 ha, soit une densité moyenne de 60 hbts/ha. Le taux de croissance de la population est estimé à 4.3% selon l'U.E.R.D et celui de l'urbanisation qui était de 14% en 1991 devrait atteindre les 24% en 2010.

IV. 3. 4. Economie

L'économie de la ville est principalement axée sur le secteur informel avec pour principales composantes :

- * l'artisanat : artisanat traditionnel (habillement, sculpture, poterie), produits du recyclage (ustensiles, jardinage, décoratifs etc.), artisanat moderne (reproduction d'objets modernes)
- * la restauration : ventes individuelles aux abords des rues ou marchands ambulants, petits et restaurants moyens servant toutes sortes de mets (nationaux et de la sous région)
- * petits commerces de détails et de réparations (vélos, vélomoteurs et automobiles)
- * menuiserie et ébénisterie

A ce secteur se juxtapose un autre moderne celui-là, fait d'industries moyennes de transformation agroalimentaire surtout, d'hôtels et des surfaces de vente.

Ouagadougou comptait en 2003 environ 154 000 ménages de taille moyenne de 5.6 personnes. Selon les normes du gouvernement, la ville est classée en trois types de standings (Bas, Moyen et Haut). Ce classement est fonction du type de matériaux de construction, du revenu des ménages et au raccordement ou non de l'habitat à l'électricité et à l'eau potable.

IV. 3. 5. Système de gestion de déchets en cours [13]

La ville a mis en place récemment, un Schéma Directeur de Gestion (SDG) reposant sur trois volets dont :

- la collecte des déchets solides au niveau des centres de transfert.
- Le transport vers le Centre d'Enfouissement Technique (C.E.T) situé à la périphérie
- L'enfouissement au niveau de la décharge contrôlée.

IV. 4. FORMALISME DE LA SIMULATION

La production de déchets est une fonction complexe dépendant de plusieurs paramètres dont les plus importants sont :

- * La population (P) qui est fonction elle-même des taux de croissance (T_c), de mortalité (T_m), de natalité (T_n), du taux de migration (T_{mg}) etc.
- * L'économie (E) fonction du taux de croissance (T_c) ou de décroissance (T_{dc}), du taux d'inflation (T_i), de l'organisation de l'économie elle-même, etc.
- * Le niveau d'éducation/alphabétisation (NED)
- * Le degré et la forme d'urbanisation (DU)
- * Le comportement et le changement de comportement des populations (CCC)
- * etc.

IV. 4. 1. Forme continue

Supposons que nous puissions construire une fonction appelée fonction production de déchets (PD) exprimée en m^3 , se traduisant par la relation mathématique suivante :

$$PD = f (K_1 [P^\alpha (tc, tm, tn, tmg)]_1, K_2 [E^\beta (tc, tdc, ti, org)]_2, K_3 [(DU)^\gamma]_3, K_4 [(NDU)^\chi]_4, K_5 [(CCC)^\kappa]_5) \quad (25)$$

Relation dans laquelle P, E, DU, NDU, et CCC sont des variables dépendantes tandis que les autres sont dites indépendantes. Les K_i sont des constantes fonctions des variables correspondantes et les valeurs des exposants: α , β , γ , χ et κ sont liées à la force de la dépendance des variables respectivement à la fonction (PD). Admettons ensuite que nous puissions définir Ω [tc, tm, tn, etc.] (kg/m^3), le taux de compactage moyen des déchets ou leur distribution sur l'étendu du territoire municipal et $d\Omega$ son élément différentiel. On peut alors définir la quantité totale de déchets Q (kg) produite par la dite localité à l'aide de l'intégrale suivante :

$$Q \text{ (kg)} = \int f(P,E,DU,NDU,CCC) d\Omega \quad (26)$$

Dans la pratique, la fonction (PD) peut être obtenue par corrélation après de minutieuses investigations qui permettraient de définir l'influence des divers paramètres sur la production des déchets. Concrètement cependant, beaucoup de difficultés devraient être surmontées si bien que nous allons nous contenter à l'occasion de cette étude, d'un modèle simplifié discret basé sur la composition des déchets établie aux Tableaux I et VI.

IV. 4. 2. Forme discrète

Cette méthode par du principe que la quantité totale Q (kg ou m^3) de déchets produits dans une localité, est égale à la somme des différents types de déchets indépendamment produits et quantifiés.

IV. 4. 3. Données [12, 13] et hypothèses

Horizon temporel de la simulation : 20 ans à partir de 2005.

Population P_0 en 2005 = 1 144 535 habitants

Taux de croissance de la population, $T_{cp} = 4.3\%$

Taux de croissance de l'économie du Burkina, $T_{ce} = 3\%$

En l'absence de données, on assimile ici le taux de croissance du pays à celui de la ville de Ouagadougou.

Taux de collecte $T_{col} = 60\%$ en 2005

Nous supposons que T_{col} atteindrait 90% d'ici 2025, soit une croissance moyenne $T_{ccol} = 1.5\%$

Quantités de déchets ménagers et assimilés collectés en 2005 $Q_{me-0} = 300000$ tonnes.

Quantités de déchets industriels spéciaux et biomédicaux collectés en 2005 $Q_{ind-0} = 10000$ tonnes. Ainsi, le taux annuel moyen de croissance des déchets industriels spéciaux et biomédicaux est de $T_{cind} = 2.4\%$

IV. 4. 4. Formulation des quantités

Les données fournies par la Municipalité de Ouagadougou en 2005 impliquent uniquement deux types de déchets à savoir les déchets ménagers et assimilés et les déchets industriels spéciaux et biomédicaux. Nous nous en tiendrons à ces résultats sans perdre de vue que dans le processus de comptabilisation intégrale, tous les types de déchets devraient être concernés.

- Déchets ménagers et assimilés $Q_{me}(n)$

$$Q_{me}(n) = Q_{me-0} \prod_{i=1}^n (1+\varepsilon_i) \quad (27)$$

Où n est le nombre d'années et ε dépend non seulement de la croissance de la population mais aussi de l'économie, c'est donc un indicateur du niveau de vie de la population et de son comportement.

Posons $\varepsilon = \varepsilon_{population} + \varepsilon_{économie}$

$$Q_n = P_n \times \frac{Q_{me-0}}{P_0} \quad (28)$$

Q_n représente les quantités de déchets ménagers et assimilés fonction uniquement de la population P_n . P_n est le nombre d'habitants de la ville à une année n donnée comprise entre 2006 et 2025. Plusieurs modèles peuvent être utilisés pour la détermination de P_n . L'un des modèles le plus complet est représenté par la formule suivante [14]:

$$dN/dt = -mN(t) + bN(t-t') + v \quad (30)$$

Relation dans laquelle, N est le nombre d'habitants, m le taux de mortalité, b le taux de natalité, v le taux de migration, t' une constante liée à l'âge et t le temps. Il est à noter qu'en général, les démographes subdivisent la population $N(t)$ en terme de sexe et d'âge pour bâtir leur modèle, rendant la notion de projection de la population encore plus complexe. Ainsi, nous ferons appel en première approximation, à un modèle plus simple utilisé par l'INSD [11].

$$P_n = P_0 (1 + t_{cp})^n \quad (31)$$

Un deuxième modèle simple est celui ayant recouru aux polynômes d'interpolation de Lagrange. Le théorème suivant permet de trouver les polynômes de telles prédictions.

Théorème [15]: Si x_0, x_1, \dots, x_n sont $n+1$ points distincts et f une fonction dont les valeurs sont données en ces points, alors il existe un polynôme unique P de degré au plus égal à n ayant la propriété suivante:

$$F(x_k) = P(x_k) \text{ pour chaque } k = 0, 1, \dots, n.$$

Le polynôme est donné par la relation suivante:

$$P(x) = f(x_0)L_{n,0}(x) + \dots + f(x_k)L_{n,k}(x) = \sum_{k=0}^n f(x_k)L_{n,k}(x) \quad (32 a)$$

Relation dans laquelle:

$$L_{n,k}(x) = \frac{(x-x_0)(x-x_1)\dots(x-x_{k-1})\dots(x-x_{k+1})\dots(x-x_n)}{(x_k-x_0)(x_k-x_1)\dots(x_k-x_{k-1})(x_k-x_{k+1})\dots(x_k-x_n)} \quad (32 b)$$

A partir des données sur la population de Ouagadougou à savoir: $P_{1985} = 441\,514$, $P_{1996} = 709\,736$ et $P_{2005} = 1\,144\,535$, calculons le polynôme de Lagrange correspondant.

Détermination du polynôme :

$$x_0 = 0 \text{ correspond à } 2005$$

$$x_1 = 1996-2005 = -9$$

$$x_2 = 1985-2005 = -20 \quad (32 c)$$

$$L_0 = (x+9)(x+20)/180$$

$$L_1 = -x(x+20)/99$$

$$L_2 = x(x+9)/220$$

En appliquant la formule ci-dessus on obtient le polynôme:

$$P(x)=P_{2005}L_0 + P_{1996}L_1 + P_{1885}L_2 \quad (33 \text{ a})$$

$$P(x) = \left(\frac{P_{1985}}{220} \frac{P_{1996}}{99} + \frac{P_{2005}}{180} \right) x^2 + \left(\frac{9.P_{1985}}{220} \frac{20.P_{1996}}{99} + \frac{29.P_{2005}}{180} \right) x + P_{2005} \quad (33 \text{ b})$$

On constate que le polynôme est de degré 2, du au nombre limité de données sur la population. En effet, la précision de la méthode serait plus élevée si l'on disposait de plus de données. Ainsi, $\varepsilon_{\text{population}}$ peut être exprimé par la relation suivante:

$$\varepsilon_{\text{population}} = \frac{(Q_n - Q_{n-1})}{Q_n} \quad (34)$$

Quant à sa dépendance par rapport à l'économie $\varepsilon_{\text{économie}}$, nous allons premièrement l'assimiler à T_{ce} , c'est à dire posons: $\varepsilon_{\text{économie}} = T_{ce}$

Ensuite pour son évolution dans le temps nous considérons que d'une année à l'autre l'économie croit de T_{ce} . C'est à dire :

$$\varepsilon_{\text{économie}} = T_{ce-0} \prod_{i=1}^n (1 + T_{cei}) \quad (35)$$

- Déchets industriels spéciaux et biomédicaux $Q_{\text{ind}}(n)$

$$Q_{\text{ind}}(n) = Q_{\text{ind-0}}(1 + t_{c\text{-ind}})^n \quad (36)$$

Quantités totales annuelles de déchets produits $Q_{\text{pro}}(n)$,

$$Q_{\text{prod}}(n) = Q_{\text{mc}}(n) + Q_{\text{ind}}(n) \quad (37)$$

IV. 4. 5. Estimation des quantités de déchets collectés

Pour les besoins des opérations de traitement, les déchets sont regroupés en Q_{comb} , $Q_{\text{recyl 1}}$, $Q_{\text{recyl 2}}$, Q_{comp} , et Q_{enf} conformément au Tableau VI.

Le taux de collecte applicable en une année donnée se calcule par la manière suivante :

$$T_{\text{col}}(n) = \alpha .n + T_{\text{col}} \quad (38)$$

Où n est le nombre d'année compté à partir de 2005, α est le taux de croissance moyen égal à 1.5%. Ainsi, les quantités de déchets collectées sont définies par la relation ci-après :

$$[Q_{\text{col}}(n)]_i = T_{\text{col}}(n).Q_{\text{prod}}(n) Fr_i \quad (39)$$

Où l'indice i représentant les catégories de déchets définies ci-dessus et Fr la fraction ou pourcentage du déchet concerné, Tableau IV. On obtient alors les équations suivantes :

$$Q_{\text{comb}}(n) = 0.19 \times T_{\text{col}}(n).Q_{\text{prod}}(n) \quad (\text{a})$$

$$Q_{\text{récy1}}(n) = 0.05 \times T_{\text{col}}(n).Q_{\text{prod}}(n) \quad (\text{b})$$

$$Q_{\text{récy2}}(n) = 0.10 \times T_{\text{col}}(n).Q_{\text{prod}}(n) \quad (\text{c}) \quad (40)$$

$$Q_{\text{compos}}(n) = 0.39 \times T_{\text{col}}(n).Q_{\text{prod}}(n) \quad (\text{d})$$

$$Q_{\text{enf}}(n) = 0.27 \times T_{\text{col}}(n).Q_{\text{prod}}(n) \quad (\text{e})$$

IV. 4. 6. Quelques retombées socioéconomiques

Les retombées socioéconomiques consécutives à la mise en place du CVSA peuvent être regroupées en deux en grandes catégories qui sont :

Premièrement : l'amélioration de la santé et du bien être des populations, l'implantation de nouveaux services (usines, commerces etc.) et l'accroissement du nombre de touristes ainsi que des activités liées : La quantification chiffrée de telles retombées nécessite d'une part, des banques de données (cf. module II) de toutes les activités se déroulant à l'intérieur de la localité plus des campagnes d'enquêtes de proximité à l'endroit des institutions concernées.

Deuxièmement : les retombées directement quantifiables et liées aux méthodes de traitement retenues à savoir : la cuisson de céramique et de briques, le compostage, le recyclage et l'enfouissement. Si pour le premier groupe il n'est pas nécessaire de formuler un modèle particulier, ici par contre il est plutôt utile de fournir des pistes de calculs pour chaque cas:

- Cuisson de céramique et de briques

D'abord si des données sur les cuissons avec les déchets existent à savoir : le $PCI_{déchét}$ et la quantité d'énergie moyenne nécessaire pour cuire un canari $E_{mc}(n)$ ou une brique $E_{mb}(n)$, alors le calcul du nombre de canaris $N_c(n)$ et de briques $N_b(n)$ susceptibles d'être cuit à partir des déchets combustibles collectés $Q_{comb}(n)$ est relativement simple:

$$N_c(n) = Q_{comb}(n) PCI_{déchét} \eta / E_{mc}(n) \quad (41 \text{ a})$$

$$N_b(n) = Q_{comb}(n) PCI_{déchét} \eta / E_{mb}(n) \quad (41 \text{ b})$$

Où η est rendement de la combustion. Si le prix moyen de ces objets est connu, on peut alors estimer les revenus attendus par les populations. On peut aussi estimer, l'équivalent bois $Q_{bois}(n)$ des déchets combustibles collectés pour se rendre à l'évidence de leur incidence sur la lutte contre la déforestation. Pour cela, on a :

$$Q_{bois}(n) [\text{kg}] = [Q_{comb}(n) PCI_{déchét} \eta] / PCI_{bois}. \quad (42)$$

Quant aux briques, elles peuvent servir à deux fins : construction de maisons ou pavements des chaussées. Dans les deux cas, l'estimation du nombre moyen de maisons et la superficie moyenne de pavement peuvent être facilement obtenus.

Le cas où les données sur les cuissons des déchets ne sont pas disponibles, en particulier $E_{mc}(n)$ et $E_{mb}(n)$, il faut alors utiliser les résultats sur les cuissons avec les tiges de mil, expériences déjà réalisées à l'université de Ouagadougou. Soit $E_{mmc}(n)$ et $E_{mmb}(n)$ les valeurs correspondantes pour les tiges de mil. On retrouve :

$$E_{mc}(n) = E_{mmc}(n) [PCI_{déchét} / PCI_{mil}] \quad (43 \text{ a})$$

$$E_{mb}(n) = E_{mmb}(n) [PCI_{déchét} / PCI_{mil}] \quad (43 \text{ b})$$

Le reste des calculs est identique au précédent.

- Compostage

En considérant un rendement moyen de compostage égal à 50% [16], on estime la quantité du composte fabriqué à:

$$Q_{\text{compf}}(n) = Q_{\text{comp}}(n)/2. \quad (44)$$

Connaissant le prix du kg, on détermine directement le revenus monétaire lié.

- Le recyclage des métaux

Un modèle estimatif peut être conçu mais ici, les meilleurs résultats sont obtenus après des enquêtes minutieuses auprès des artisans. Prenons l'aluminium comme matériaux de récupération pour la fabrication de marmites et de sceaux et supposons qu'il représente une fraction $Fr_{al} = \kappa = 30\%$ des matériaux recyclables Q_{recy1} . Les enquêtes montrent que les artisans confectionnent des marmites (ϵ_i) et des sceaux (λ_i) de différentes masses. Le nombre de marmites et de sceaux de masses données se calcule comme suit:

$$N_{\text{marm}}(n) = \kappa \times [Q_{\text{recy1}}(n) / \epsilon_i] \quad (45 \text{ a})$$

$$N_{\text{nsceaux}}(n) = \kappa \{ [Q_{\text{recy1}}(n)] - [Q_{\text{recy1}}(n) / \epsilon_i] \} / \lambda_i \quad (45 \text{ b})$$

Ensuite, la valeur monétaire des produits fabriqués est égale aux quantités produites multipliées par leur prix unitaire.

- Calcul du nombre et dimensionnement des zones ou cellules d'enfouissement

Il faut recourir ici à des spécialistes pour de telles opérations. Prenons les dimensions suivantes pour une zone: Longueur = 10 m x Profondeur = 20 m x Largeur = 10 m et supposons qu'un volume de 425 000 m³ correspond à 290 235 tonnes de déchets (OPINION, N° 384, 2005). On a donc:

$$N_{\text{enf}}(n) = Q_{\text{enf}}(n) / C_{\text{enf}} \quad (46)$$

Où C_{enf} est la capacité d'enfouissement d'une cellule.

IV. 4. 7. Incidence du niveau de pauvreté sur les déchets collectés

Ces données sont importantes parce qu'elles peuvent influencer à long terme sur les résultats du modèle. En 2003, INSD [11] donne comme seuil de pauvreté la somme de : 82 672 F CFA. Le Tableau suivant en donne la répartition par tranche de population :

Tableau VII : Incidence du niveau de pauvreté

Niveau de vie	N ₁	N ₂	N ₃	N ₄	N ₅
Pourcentage de la population(%)	10,3	9,2	12,7	20,1	47,8

Toujours selon les données de 2003, on a:

N₁ : pauvreté extrême : moins de 52 440 F CFA

N₂ : pauvreté modérée : de 52 440 à 84 520 F CFA

N₃ : Niveau de vie moyen : de 84 520 à 104 512 F CFA

N₄ : Non –pauvreté : de 104 512 à 162 512 F CFA

N₅ : Non-pauvreté extrême : plus de 162 512 F CFA

Posons : q_m (kg/hab) = $Q_{me(n)} / P_n$, la quantité de déchets par habitant où le modèle P_n de l'INSD sera retenu. On a :

Tableau VIII : Influence de l'indice de pauvreté sur la production de déchets

Niveau de vie	N ₁	N ₂	N ₃	N ₄	N ₅
Quantité de déchets par habitant	0.61 q_m	0.8 q_m	q_m	1.11 q_m	1.57 q_m

IV. 4. 8. Influence du comportement sur les quantités de déchets

Le comportement peut être défini comme étant ce qui en dernière analyse influence et donc porte le choix du consommateur vers un produit spécifique donné. C'est bien entendu, un paramètre très important dans la production tant quantitative que qualitative des déchets. Malheureusement, comment quantifier concrètement cette influence ? L'auteur pense à deux pistes au moins. Première piste : mener des enquêtes à l'endroit de certains produits de grande consommation comme le plastique. Ces enquêtes permettraient d'abord de comprendre le phénomène puis d'influer éventuellement de manière positivement sur la baisse de la consommation. Elles pourraient également permettre de définir des coefficients de consommation donc de production de déchets par rapport à certains articles. Deuxième piste : les méthodes probabilistes: on pourrait penser que l'apparition de certains facteurs tels l'augmentation du coût de la vie, la santé de l'économie etc. influencent directement la consommation de certaines catégories de citoyens. Alors quels sont les degrés d'occurrence de tels phénomènes et leur poids sur la consommation de certains produits ?

V. DIAGRAMME DE LA SIMULATION INFORMATION

Toutes les hypothèses, simplifications et quantités formulées ainsi que les données fournies sont utilisées comme entrées pour concevoir le programme informatique de simulation présenté ci-dessous :

La mise en programme informatique des équations du modèle ne présente pas de difficultés particulières. Elle nécessite tout au plus une certaine connaissance de n'importe quel langage de programmation et de disposer d'un ordinateur ou d'une calculatrice programmable. A titre indicatif on peut noter deux sous-modèles : l'un lié au modèle mathématique de projection de la population par l'INSD et l'autre se référant aux polynômes d'interpolation de Lagrange. Chacun des sous-modèles exécute les séquences indiquées par le diagramme: projeter d'abord la population (P_n). Puis viennent ensuite les estimations des différentes quantités de déchets

($Q_{col(n)}$) et finalement on évalue les retombées socio-économiques qu'occasionnent les différentes activités de traitement.

VI. QUELQUES ENTREES DE LA SIMULATION

Pour tester le programme nous disposons de données fournies essentiellement par la Marie de Ouagadougou et l'INSD auxquelles il faut ajouter celles fournies par les recherches récentes à l'université de Ouagadougou, celles tirées de la littérature et enfin les résultats d'enquêtes:

$PCI_{déchets} = 11999$ kJ/kg à une humidité de 15% est la valeur moyenne entre le PCI de la fraction composé bois (13335 kJ/kg) et carton (10666 kJ/kg) [16].

$PCI_{mil} = 12\ 685.44$ kJ/kg à une humidité moyenne de 12,32% [17]

Prix moyen d'un kg de tiges de mil (enquêtes, 2006) = 70 F CFA

Prix moyen d'un kg de bois (enquêtes, 2006) = 45 F CFA

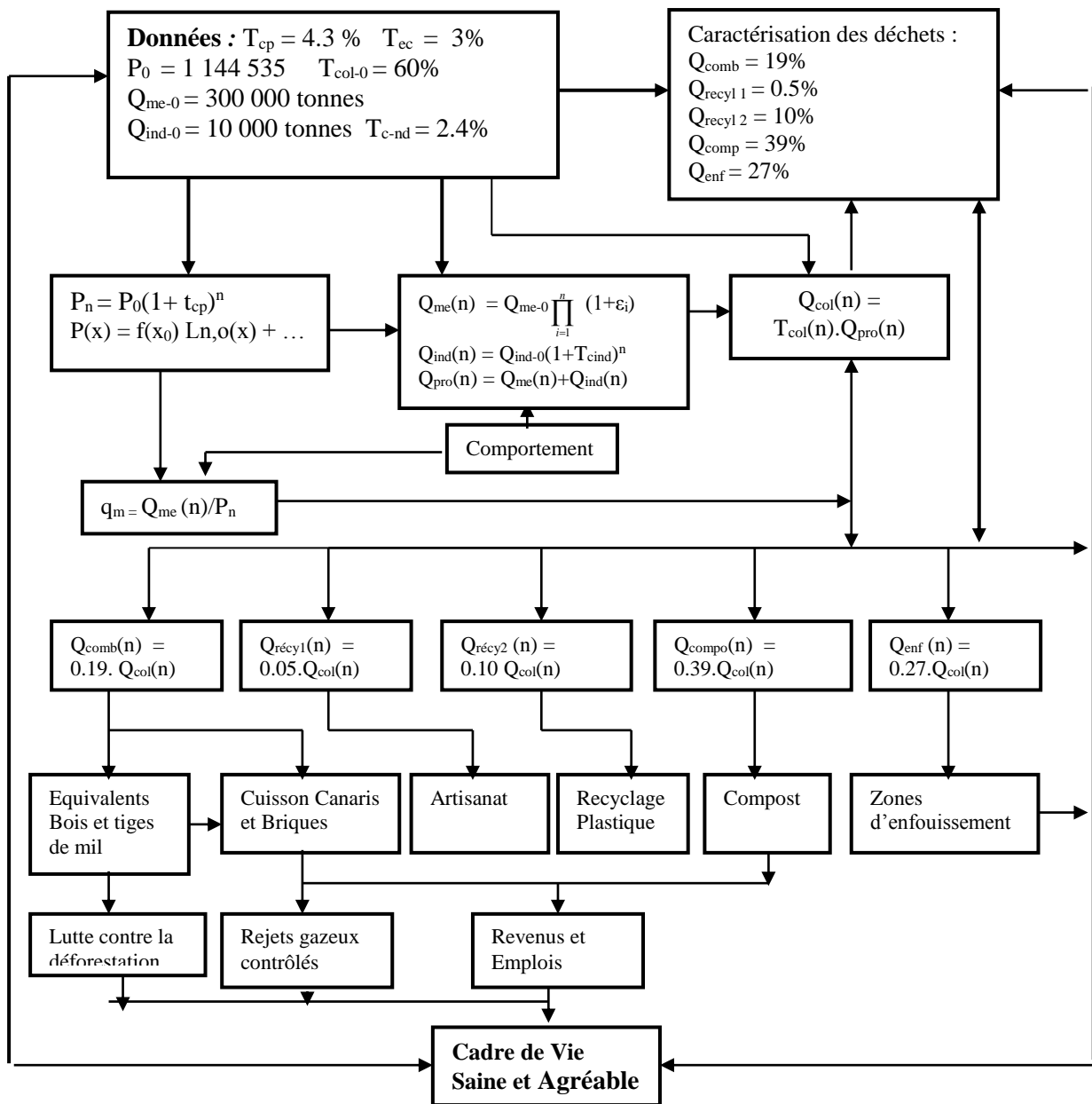
Energie moyenne pour la cuisson de 33 canaris en utilisant des tiges de mil = $1.544 \cdot 10^6$ kJ [18]

Prix moyen d'un canari moyen (enquêtes, 2006) 1000 F CFA

Une tonne de compost coûte environ 15 000 F CFA [19]

Prix moyen (enquêtes, 2006) d'un kg d'aluminium recyclé est d'environ 2 300 F CFA

V. DIAGRAMME COMPLET DE LA SIMULATION NUMERIQUE



VII. ANALYSE, DISCUSSION ET PERSPECTIVES

Dans ce chapitre nous allons passer les deux parties de la gestion successivement en revue et montrer quelles sont étroitement liées. L'importance de la gestion quotidienne a été plusieurs fois démontrée parce qu'en effet, tout dépend de sa réussite. Le rôle de chaque maillon a également été clairement exprimé. Pour une meilleure réalisation du CVSA, il faut d'abord et avant tout que les autorités municipales et les populations en soient largement informées et acceptent d'y participer. Il est fortement recommandé de ne pas brûler cette étape et surtout de veiller à sa réussite parce que la facilité et/ou l'échec de la mise en place des autres modules

en dépend. A ce sujet, nous avons suggéré la création dans chaque localité, d'un organisme en charge exclusivement du dossier de gestion des déchets, convaincu que la solution du problème est beaucoup plus tributaire du degré d'organisation que de la disponibilité des moyens. Cette structure a un double rôle de conseiller des autorités municipales et d'exécution des tâches liées au CVSA.

A l'heure du processus de communalisation intégrale du Burkina, il est dès à présent très important d'inscrire la lutte contre l'insalubrité dans les plans de développement local. Plutôt cela sera et mieux sera la réussite à long terme, évitant aux populations, les casses têtes que connaissent nos villes actuellement, tout en leur garantissant un cadre de développement durable.

Deux autres aspects importants tant du point de vue théorique que pratiques ont été soulevés. Le premier est la définition de l'unité de mesure des déchets collectés tandis que l'autre se rattache à la notion de fermeture des opérations de tri des échantillons. Concrètement, il s'agit d'une part, de comment quantifier les déchets et d'autre part, comment valider une campagne d'échantillonnage ? Dans le premier cas, nous avons estimé que la méthode qui nous paraît la plus pratique et en même temps la moins chère est de déterminer d'abord le volume (m^3) des déchets puis de définir un taux de compactage moyen (kg/m^3) unique pour tous les déchets ou par catégorie de déchets. Cette dernière norme peut être tout simplement obtenue en fabriquant un cube étalon de un (1) mètre de côté, de masse connue, puis de le remplir successivement de déchets ou de catégories de déchets, de le tasser moyennement et de le peser. On n'en déduit ensuite la norme. Par contre, la validation de la campagne de tri est moins évidente et la piste présentée ci-dessus est plus théorique que pratique. Pour l'heure, nous suggérons de veiller surtout à l'hétérogénéité des déchets à échantillonner.

Pour la seconde partie du modèle, sa nécessité réside au fait qu'elle est un outil moderne et indispensable de gestion prévisionnelle qui permet de nos jours d'anticiper les problèmes, rendant leurs solutions plus faciles au double sens de leur complexité et de leur coût. Le formalisme de simulation présenté ci-dessus est de nature quasi-statique, c'est à dire que les équations n'incorporent pas explicitement le temps comme variable. De ce point de vue et du fait que plusieurs paramètres ont été considérés comme constant (les taux de croissance, les fractions massique etc.), le modèle est simple et donc à la portée du niveau de qualification attendu du personnel de la DGVTD. Il permet malgré tout, de prendre en compte plusieurs variables liées à la production des déchets à l'exception du changement de comportement de la population, indicateur capital mais complexe à quantifier.

Au regard des résultats, on se convainc que le modèle permet effectivement de projeter toutes les quantités formulées et qui sont déterminants pour la réussite de la gestion

prévisionnelle. Il reste à convaincre le lecteur, donc le potentiel décideur que les résultats obtenus reflètent assez bien la situation qui va se présenter à l'horizon temporel retenu c'est à dire en 2025. Pour ce faire, nous ferons deux argumentaires l'un lié à des résultats obtenus indépendamment par d'autres structures tandis que l'autre s'appuie sur une analyse de sensibilité.

VII. 1. COMPARAISON AVEC DES RESULTATS D'AUTRES MODELES

S'agissant de la population, on constate d'abord une cohérence entre les résultats des deux modèles qui donnent à l'orée 2025 des chiffres respectivement de 2 656 000 et 2 805 000 habitants. On retrouve en particulier, les mêmes chiffres que l'I.N.S.D. En effet, l'institut prévoit en 2015 une population de 1 671 897 habitants tandis que le premier modèle projette un chiffre de 1 743 000 habitants, soit une erreur relative de 4.50% et d'environ 10% pour le second modèle. Le schéma directeur de gestion des déchets de la ville de Ouagadougou et le premier modèle prévoient en 2010 respectivement une population de 1 373 042 et de 1 412 700, une erreur relative de 3% environ. Il faut souligner d'une manière générale que les projections de populations fluctuent toujours d'une institution à une autre en fonction des appréciations des différents paramètres. Malheureusement, les quantités de déchets ne peuvent être comparées parce que le schéma directeur de gestion utilise en 2005, une masse de 213 958 tonnes tandis que la même source nous a fourni une masse de 300 000 tonnes pour la même année. De plus, la croissance de l'économie et donc le niveau de vie a été pris en compte dans notre modèle, ce qui n'est pas le cas dans le modèle de la commune de Ouagadougou.

Le modèle n'a pas pris en compte un certain nombre d'activités économiques et leurs retombées: ce sont, l'accroissement probable du tourisme, l'amélioration de la santé des populations, l'implantation de nouvelles unités et partant les emplois associés et les impôts payés etc. Des enquêtes ciblées (hôtels, articles touristiques d'une part et maladies liées à l'insalubrité d'autre part) pourraient aider à quantifier ces types de données.

Quelques résultats du modèle [20]

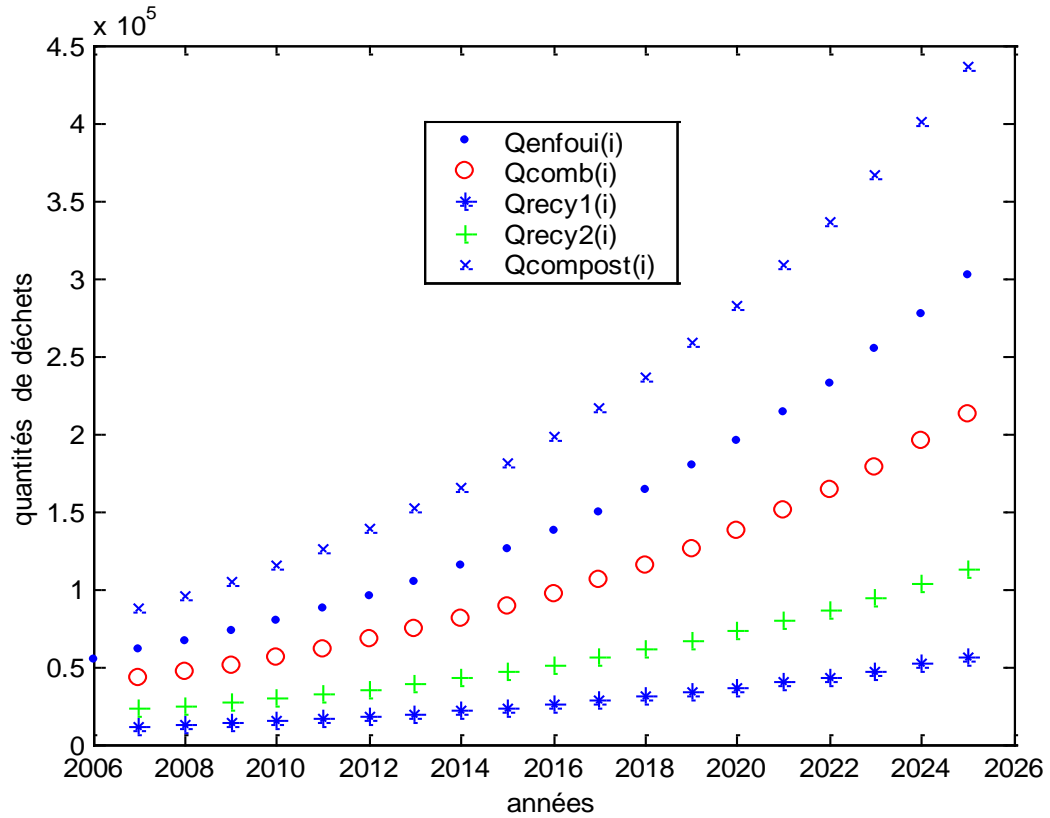


Figure 2 : Quantités et catégories de déchets produits selon le modèle de l'INSD

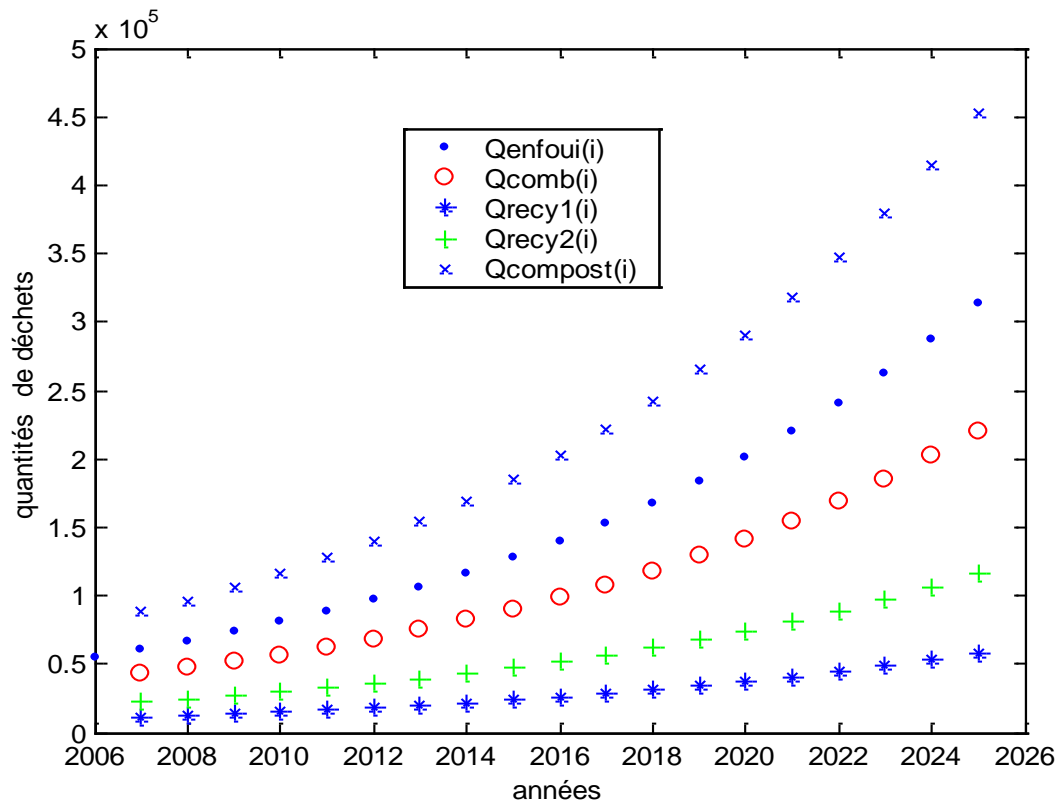


Figure 3: Quantités et catégories de déchets produits selon le modèle de Lagrange

Tableau IX: Retombées économiques: nombres de canaris, de briques et revenus liés

Années	Q _{mil} (10 ⁶ kg)	Q _{bois} (10 ⁶ kg)	N _{ca} (10 ⁶)	N _{br} (10 ⁶)	S _{mil} (10 ⁹ F)	S _{bois} (10 ⁹ F)	S _{ca} (10 ⁹ F)	S _{br} (10 ⁹ F)	Superficie (10 ³ m ²)
2006	27.05	25.73	3.66	2.44	1.89	1.15	3.66	0.25	33.96
2007	29.69	28.24	4.02	2.68	2.07	1.27	4.02	0.28	37.27
2008	32.57	30.99	4.41	2.94	2.28	1.39	4.41	0.30	40.89
2009	35.72	33.98	4.84	3.22	2.50	1.52	4.84	0.33	44.84
2010	39.15	37.24	5.30	3.53	2.74	1.67	5.30	0.37	49.15
2011	42.89	40.80	5.81	3.87	3.00	1.83	5.81	0.40	53.84
2012	46.97	44.68	6.36	4.24	3.28	2.01	6.36	0.44	58.96
2013	51.41	48.91	6.97	4.64	3.59	2.20	6.97	0.48	64.54
2014	56.26	53.52	7.62	5.08	3.93	2.40	7.62	0.53	70.63
2015	61.54	58.54	8.34	5.56	4.30	2.63	8.34	0.58	77.25
2016	67.29	64.01	9.12	6.08	4.71	2.88	9.12	0.63	84.44
2017	73.55	69.96	9.97	6.64	5.14	3.14	9.97	0.69	94.33
2018	80.36	76.45	10.89	7.26	5.62	3.44	10.89	0.76	100.89
2019	87.79	83.51	11.90	7.93	6.14	3.75	11.90	0.83	110.21
2020	95.87	91.20	12.99	8.66	6.71	4.10	12.99	0.91	120.39
2021	104.66	99.56	14.19	9.46	7.32	4.48	14.19	1.01	131.39
2022	114.22	108.66	15.48	10.32	7.99	4.88	15.48	1.08	143.39
2023	124.62	118.55	16.89	11.26	8.72	5.33	16.89	1.18	156.46
2024	135.94	129.32	18.43	12.28	9.51	5.81	18.43	1.29	170.66
2025	148.24	141.02	20.10	13.40	10.37	6.34	20.10	1.40	186.11

C_a = Canaris ; b_r = briques ; Superficie pouvant être pavée avec les briques (2.5 x 5.5 x 22)

Tableau X: Quantités et revenus liés au compost, aux marmites et aux nombres de fosses

Année	q _{compos} (10 ³ t)	S _{compos} (10 ⁹ F)	N _{marm} (10 ⁶)	S _{marm} (10 ⁹ F)	N _{enf}
2006	39.83	0.59	0.61	4.59	48.00
2007	43.72	0.65	0.67	5.04	53.00
2008	47.96	0.71	0.74	5.55	58.00
2009	52.59	0.78	0.81	5.53	63.0
2010	57.65	0.86	0.89	6.06	69.00
2011	63.15	0.94	0.97	6.65	76.00
2012	69.16	1.03	1.06	7.28	83.00
2013	75.71	1.13	1.16	7.98	91.00
2014	82.84	1.24	1.27	8.73	100.00
2015	90.61	1.35	1.39	9.55	109.00
2016	99.08	1.48	1.52	10.45	119.00
2017	108.30	1.62	1.67	11.43	130.00
2018	118.34	1.77	1.82	12.49	142.00
2019	129.27	1.93	1.99	13.65	155.00
2020	141.17	2.11	2.17	14.91	169.00
2021	154.11	2.31	2.37	16.28	185.00
2022	168.19	2.52	2.59	19.40	202.00
2023	183.51	2.75	2.83	21.17	220.00
2024	200.17	3.00	3.08	23.09	240.00
2025	218.29	3.27	3.36	25.18	262.00

Tableau XI: Production spécifique moyenne de déchets en fonction du niveau de vie

Année	q _{N1} (kg/hab/j)	q _{N2} (kg/hab/j)	q _{N3} (kg/hab/j)	q _{N4} (kg/hab/j)	q _{N5} (kg/hab/j)
2006	0.45	0.59	0.74	0.82	1.16
2007	0.46	0.61	0.76	0.84	1.19
2008	0.48	0.63	0.78	0.87	1.23
2009	0.49	0.64	0.80	0.89	1.26

2010	0.50	0.66	0.82	0.92	1.30
2011	0.52	0.68	0.85	0.95	1.34
2012	0.53	0.70	0.87	0.97	1.38
2013	0.55	0.72	0.90	1.00	1.41
2014	0.56	0.74	0.93	1.02	1.46
2015	0.58	0.76	0.95	1.06	1.50
2016	0.60	0.78	0.98	1.09	1.54
2017	0.62	0.81	1.01	1.12	1.58
2018	0.63	0.83	1.04	1.15	1.63
2019	0.65	0.85	1.07	1.19	1.68
2020	0.67	0.88	1.10	1.22	1.73
2021	0.68	0.90	1.13	1.25	1.78
2022	0.71	0.93	1.16	1.29	1.83
2023	0.73	0.96	1.19	1.33	1.88
2024	0.76	0.98	1.23	1.37	1.93
2025	0.77	1.01	1.26	1.41	1.99

VII. 2. ETUDES DE SENSIBILITÉ

Lorsqu'on conçoit un modèle, il est important de distinguer le poids des différentes variables par rapport à leur influence sur les résultats attendus. Pour ce modèle en effet, les paramètres tel que le taux de croissance de la population, le taux de croissance de l'économie, le taux de collecte, la composition des déchets sont autant de variables que nous jugeons sensibles. Cela signifie concrètement que les résultats du modèle seront fortement tributaires de ces paramètres. Il s'agit donc d'étudier l'influence de la variabilité de ces paramètres sur les résultats du modèle.

VII. 2. 1. Variation du taux de collecte des déchets

Le taux de collecte commande les quantités de déchets à gérer dans les centres de traitement. Supposons ce taux égal respectivement à 60, 50 et 40% en 2005, pour les courbes allant de gauche vers la droite, figure ci-après. Le constat est qu'une mauvaise estimation du pourcentage de collecte de départ, pourrait entraîner de fausses prévisions, proportionnelles aux erreurs des bases de données. De telles municipalités se retrouveraient évidemment dans de sérieuses difficultés de trésorerie qui mettraient en péril la réalisation du CSVA. Le resserrement des quantités en 2025 est simplement du au respect de l'hypothèse qui veut que les taux de collecte atteignent au moins 90% à cet horizon, ce qui a conduit à appliquer les variations respectives de 0.5, 1 et 1.5%.

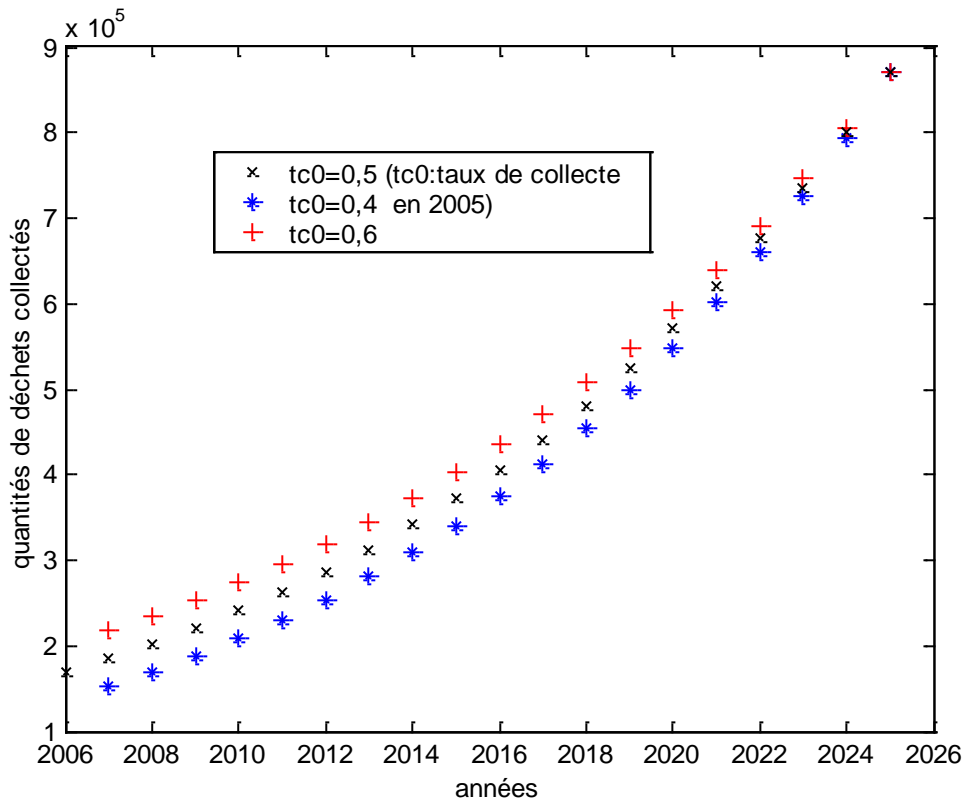


Figure 4: Influence du taux de collecte sur les quantités de déchets

VII. 2. 2. Influence du taux de croissance de l'économie

Supposons que les déchets industriels croissent au même rythme que l'économie, ce qui n'est pas évident. On obtient alors les tendances suivantes:

Nous constatons que :

Si le taux de croissance de l'économie de la ville de Ouagadougou atteignait 7%, les déchets industriels connaîtraient une croissance presque exponentielle pour se situer à une valeur de $3,8 \times 10^4$ tonnes en 2025.

Pour des taux de croissance modérés compris entre 1.5 et 2.4%, on observerait des croissances également modérées; de même, pour des taux de décroissances modérées de l'économie, on assisterait également à une baisse modérée des déchets. Pour une projection tenant compte de tous ces paramètres, l'on pourrait situer la production des déchets industriels dans les années 2025 entre les fourchettes de la croissance modérée et celle de 7% c'est à dire autour de 5 % de croissance.

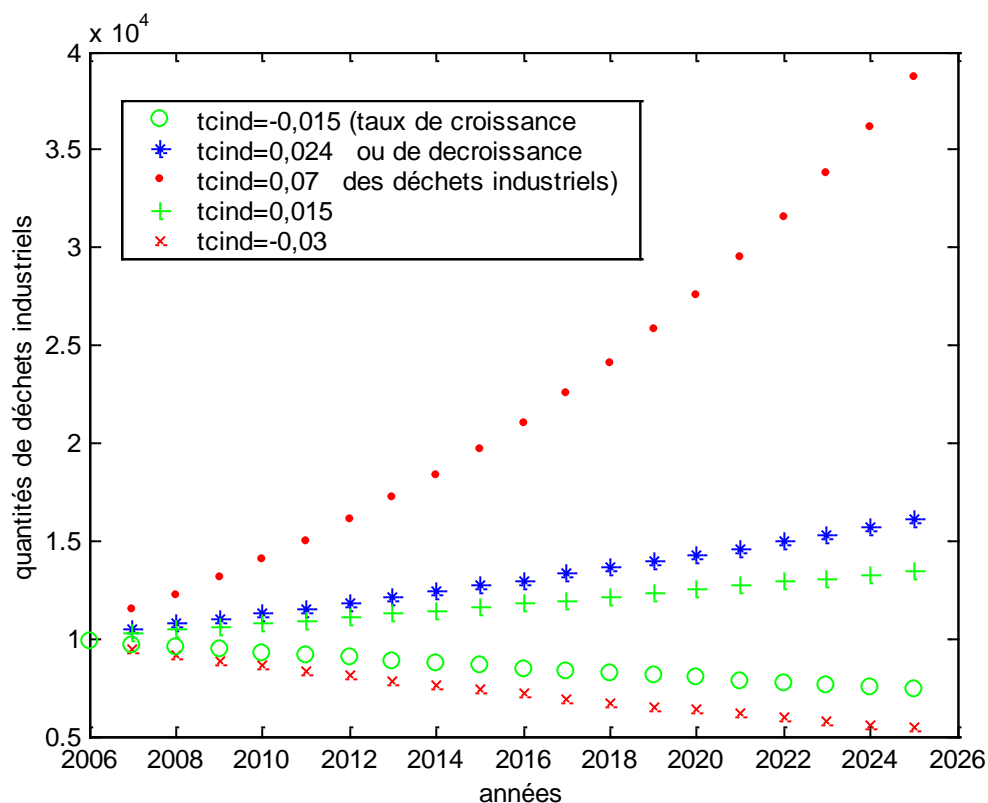


Figure 5 : Variation des déchets industriels en fonction du taux de croissance de l'économie

VIII. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Il faut d'emblée retenir qu'ici bien plus qu'ailleurs, rien n'est immuable. Les agglomérations vont continuer à croître, de nouveaux problèmes vont très certainement surgir et parallèlement, de nouveaux outils de gestion vont naître. Certaines idées mentionnées dans cette investigation vont donc être caduques mais les idées maîtresses qui forment la base logique du processus de gestion vont demeurer intactes au cours du temps. Plus généralement, il existera toujours deux parties composant la gestion des déchets solides urbains dont la « Gestion Quotidienne » et « la Gestion prévisionnelle ». Aucune localité, si petite soit-elle ne pourra espérer construire un espace de développement durable pour sa population en ignorant cette vérité. Il faut asseoir d'abord un cadre cohérent et efficace de gestion quotidienne qui doit aboutir à la compilation d'une base de données la plus large et la plus complète possible sur la production des déchets et sur l'ensemble des activités actuelles et futures se déroulant dans les limites géographiques de la dite localité. Ensuite, pour plus d'efficacité, c'est à dire pour éviter les tâtonnements qui conduisent à des ruptures de trésorerie donc aux manques de fonds d'investissements, il faut planifier scientifiquement les dépenses en anticipant sur les problèmes qui vont se poser dans deux, trois voir vingt ans à l'avenir. Ce faisant, on est mieux préparé pour la recherche de financements et pour faire face aux nombreux problèmes sociaux qui vont très certainement naître, les plus cruciaux étant la gestion des déchets

dangereux toxiques et radioactifs. En effet, le bel exemple est sans conteste, la grave pollution chimique de la ville d'Abidjan en Cote d'Ivoire, en août 2006, par le déversement de l'hydrogène sulfurisé H_2S et mercaptans à plusieurs endroits du port de la ville. Cette catastrophe a touchée plus de 6 000 personnes et causé la mort d'au moins cinq personnes, il a en outre provoqué la démission du gouvernement [21].

Bien que le modèle simplifié donne des résultats acceptables, il est utile cependant de noter que nous sommes loin du modèle parfait pour plusieurs raisons dont les plus essentielles sont: la non garantie de la fiabilité des bases de données, le modèle simplifié de projection de la population, la non variabilité de certains paramètres comme le taux de croissance de la population et enfin la non prise en compte du facteur extrêmement complexe du comportement de la population. La levée des contraintes ci-dessus énumérées conduirait à des modèles complets capables de garantir une gestion équilibrée, efficace et durable des municipalités.

Malheureusement, nos idées n'ont pu être testées dans la pratique pour connaître leur limite scientifique parce que nous n'avons pu bénéficier de financement dans la réalisation de ce travail.

IX. BIBLIOGRAPHIE

1. George Tchobanoglous, Samuel A. Vigil, et Hilary Theisen, 1993. Integrated solid waste management: Engineering principles and management issues, Mc Graw-Hill
2. Mélanie Proust, 2001. Campagne de caractérisation des ordures ménagères de la ville de Ouagadougou, Université de Poitiers, UFR Sciences Fondamentales et Appliquées.
3. Everett B. Woodruff, Herbert B. Lammers and Thomas F. Lammers, 1992, STEAM PLANT-OPERATION, Sixth Edition, McGraw-Hill, Inc., pp. 638
4. Kenneth Wark, 1983. Thermodynamics, Fourth edition, McGraw-Hill Book Company, pp.536
5. David A. Tillman, 1991. The combustion of solid fuels and wastes, Academic Press, Inc. pp. 11
6. Etat des lieux des savoirs locaux au Burkina Faso. Centre d'Analyse des Politiques Economiques et Sociales (CAPES), Gvt du Burkina
7. CREPA, 1995. Le compostage en Afrique : synthèse bibliographique
8. Ouedraogo Abdoulaye, 1994. Investigation of whole tree combustion in a packed-bed, Ph.D. thesis, North Carolina State University, Raleigh, USA
9. Rapport d'exécution de l'Unité Physique Energie, 2004. Université de Ouagadougou, financement AIRE DEVELOPPEMENT, Convention n°: D-8-BFA-015-1.
10. F. Forest, La promotion de la filière biogaz-compost en milieu tropical, IRAT-GERDAT, 1980
11. INSD, 2004. Projections de la population, Direction de la démographie, Gvt du Burkina
12. INSD, 2003. L'emploi, le chômage et les conditions d'activités dans l'agglomération de Ouagadougou
13. Bordus G. et Trottier J., 2000. Schéma Directeur de gestion des déchets – ville de Ouagadougou, Burkina Faso. Rapport du SDGD de Ouagadougou
14. Bender, E. A., 1976. An Introduction to Mathematical Modeling, John Wiley & Sons, Inc, 432 pages
15. Richard L. Burden, J. Douglas Faires, 1985. Numerical Analysis, third edition, The Southeast Book Company
16. Hamidou SALOU, 2005. Thèse de Doctorat unique. Gestion des déchets ménagers dans les pays en développement : cas du B.F. Dégradation thermique de leur fraction combustible. U.O./U.F.R.-S.E.A.
17. Ouedraogo Abdoulaye, Kiéno P. Florent et Nabalma Ouseynou, 2006. Pouvoir calorifique inférieur de quelques combustibles dérivés de la biomasse, Soumis pour publication, Publication interne, UFR-SEA, Université de Ouagadougou

- 18.** Ouedraogo Abdoulaye, Kieno P. Florent et Dao Tizane, 2006. Quasi-steady investigation and optimisation of the performances of a rural kiln, *Global Journal of Pure and Applied Sciences (GJPAS)*, VOL. 5, NO 1 & 2 59-66, 2006.
- 19.** CREPA, 1997. Programme d'expertise sur les déchets urbains: Participation de la communauté à la gestion des déchets solides
- 20.** Coulibaly Ousmane, 2006. Gestion Prévisionnelle des déchets solides de la ville de Ouagadougou, Mémoire de DEA de Physique Appliquée, UFR-SEA, Université de Ouagadougou.
- 21.** AFP. Cote d'Ivoire: pollution à Abidjan : 5 morts, plus de 6 000 intoxiqués, *Yahoo Actualités*, 11/09/2006.