

# Traitement et valorisation des déchets ménagers par incinération ou pyrolyse

*Analyse de faisabilité pour les villes secondaires du Burkina Faso*



Travail de Bachelor présenté par Claire de Siebenthal

En vue de l'obtention du titre d'ingénieure HES en énergie et techniques environnementales

Juin 2018

Conseiller scientifique HEIG-VD

M. Jean-Bernard Michel

Conseiller scientifique CEAS

M. Jean-François Houmard

Illustration de couverture : site de décharge de Pô, août 2017  
Sources : personnelles

## REMERCIEMENTS

Parvenue au terme de mon travail de Bachelor, j'adresse mes plus sincères remerciements aux personnes qui m'ont encadrée et conseillée. Je remercie en particulier :

M. Jean-Bernard Michel, professeur-chercheur en énergétique appliquée à la HEIG-VD, à Yverdon-les-Bains.

M. Jean-François Houmard, chargé de projets en gestion des déchets et assainissement au CEAS, à Neuchâtel.

Je voudrais vous adresser un mot plein de reconnaissance, inspiré par toute la bienveillance que vous avez manifesté à mon égard, mais il est parfois difficile de trouver les mots pour exprimer ce que l'on ressent. Sachez que votre compréhension m'a profondément touchée. Merci infiniment.

## COMPLÉMENT EFFECTUÉ EN JUIN 2018

Un complément a été nécessaire à la suite du rendu du 20 mars et à la défense du 18 mai 2018. Ce complément consiste en l'ajout des chapitres suivants :

- L'état actuel des filières thermiques (page 40) ; L'incinération / La pyrolyse et la gazéification / Qualité des produits de thermolyse (pages 42 à 45)
- Gisement disponible (flux de matière dans les différents scénarii) (page 45) ; Quelle technologie préconiser pour chaque scénario ? (page 46)
- Analyse comparative de la thermolyse et de l'incinération (analyse PESTEL) (page 46)

De plus, la Conclusion (page 49) ainsi que le Résumé (page v) ont été complétés et de petites modifications ont été effectuées tout au long du rapport comme une mise à jour des Objectifs (p.9) et Méthodologies/Mise en œuvre (p.10) ainsi qu'une petite correction effectuée sur la figure 3 (p.17). Et le terme « CET » a été changé en « Centre de tri ».



## SOMMAIRE

Remerciements .....	ii
Complément effectué en juin 2018 .....	ii
Liste des sigles.....	iii
Sommaire .....	iv
Résumé .....	v
Introduction .....	6
Problématique .....	7
Objectifs .....	8
Méthodologie.....	9
Contexte de l'étude.....	10
Gestion des déchets ménagers .....	12
Stratégie de traitement des déchets ménagers.....	13
Mise en contexte de la gestion des déchets et scénarios envisagés .....	15
Scénario I : filière centralisée de traitement des plastiques mous .....	16
Scénario II : Filière décentralisée d'incinération des déchets « en refus de tris » .....	17
Scénario III : Filière décentralisée d'incinération des déchets après tamisage.....	18
Scénario IV : Filière de traitement des déchets « en refus de tris » par pyrolyse ou gazéification .....	19
Caractéristiques typologiques des déchets.....	21
Composition physico-chimique des déchets.....	27
Détermination de la composition type des déchets ménagers .....	29
Composition élémentaire et analyse immédiate du déchet type.....	32
L'état actuel des filières thermiques.....	40
L'incinération .....	41
La pyrolyse et la gazéification .....	42
Qualité des produits de thermolyse.....	45
Gisement disponible (flux de matière dans les différents scénarii).....	45
Quelle technologie préconiser pour chaque scénario ?.....	46
Analyse comparative de la thermolyse et de l'incinération (analyse PESTEL).....	46
Conclusion.....	49
Liste des figures et des tableaux .....	50
Tableaux.....	51
Références bibliographiques.....	52

## RÉSUMÉ

L'étude de la caractérisation des déchets ménagers des villes de Ouagadougou et de Pô, représentant respectivement le haut et le moyen-standing du Burkina Faso central, a permis de mettre au point plusieurs modèles de déchets représentatifs, selon des scénarios de tris bien précis et sortir leur fraction combustible propre. Les paramètres de combustion de ces déchets satisfont aux conditions d'incinérabilité. De plus, leur potentiel énergétique a pu être défini. Ainsi, le PCI de chacun de ces déchets types a pu être déterminé. En définitive, les déchets ménagers du Burkina Faso central ont un relativement bon potentiel énergétique.

En effet, en tenant compte des analyses immédiates et élémentaires de chaque fraction de déchets, les bilans massiques et énergétiques des procédés d'incinération, de pyrolyse et de gazéification de ces déchets ont pu être évalué théoriquement.

De plus, il a été clairement établi que la technologie de pyrolyse (plus particulièrement, le brûleur de Jean Dispos) s'avère être une excellente opportunité pour l'Afrique de l'Ouest en particulier si une filière centralisée collectant le plastique mou voit le jour.

Pour ce qui concerne l'incinération le gisement actuel est beaucoup trop faible pour envisager une incinération avec valorisation énergétique. En revanche, il a été constaté que ces déchets sont potentiellement incinérables, par conséquent, brûler les déchets dans l'unique but d'en diminuer les quantités est tout à fait envisageable dans un simple « four » en terre et briques.

Mais afin de développer la filière thermique en Afrique de l'Ouest, il est important de permettre :

- L'amélioration de la compétitivité du coût du traitement thermique (en particulier sur les installations de faible et moyenne capacité). En effet, le traitement thermique apparaît encore beaucoup trop coûteux par rapport aux autres filières (compostage et mise en décharge) ;
- L'émergence de technologies complémentaires particulièrement bien adaptées aux faibles capacités de traitement (que ce soit pour l'incinération ou la pyrolyse / gazéification) ;
- Le développement d'installations spécifiques de traitement des déchets ménagers en mélange.
- Le développement de « co-processing » et l'information auprès des industriels demandeurs d'énergie (sidérurgie, fours à chaux, céramistes, verriers, briqueterie, cimenterie...);
- Le développement de filières spécifiques : pneus, plastiques mous...;
- La structuration d'une offre spécialisée de collecte et de traitement disponible sur le plan national.

## INTRODUCTION

### CONTEXTE DU DIPLÔME

Le travail de diplôme s'inscrit dans la formation Bachelor en Energie et Techniques Environnementales (ETE) conduite à la Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du canton de Vaud (HEIG-VD). Ce travail permet de concrétiser, à travers un projet existant, les connaissances et les compétences acquises au fil de la formation et de la clore avec l'obtention d'un *bachelor of sciences HES-SO* en énergie et techniques environnementales.

Le travail a été suivi par deux conseillers scientifiques ; Jean-François Houmard, ingénieur diplômé de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zürich, spécialisé dans la gestion et la valorisation des déchets et Jean-Bernard Michel, professeur-chercheur en énergétique appliquée à la HEIG-VD, responsable de projet de Ra&D dans le domaine de la valorisation thermique et biologique de la biomasse et des déchets. Le contact au Burkina Faso est Boris Compaoré, chargé de projets en gestion des déchets et assainissement au CEAS-Burkina, à Ouagadougou.

### CONTEXTE GÉNÉRAL

Ce sujet de Travail de Bachelor (TB) a été proposé par le Centre Ecologique Albert Schweitzer (CEAS) dans le cadre des Plans Stratégiques de Gestion des Déchets Municipaux (PSGDM) qui sont proposés à certaines communes rurales du Burkina Faso. Ces plans stratégiques maîtrisent les étapes suivantes :

1. Sensibilisation de la population (redevance des clients).
2. Collecte des déchets et transport via des stockages intermédiaires ou non.
3. Tri et valorisation matière des déchets.
4. Vente du compost et négociation des aciers.

Plusieurs campagnes de caractérisation ont été menées au Burkina Faso, définissant les types de déchets, leur quantité et leur volume (S. Boxler, 2013 et M. Proust, 2001). Ce travail a pour but de proposer, sur la base de ces caractérisations, une stratégie de valorisation énergétique de ces déchets par pyrolyse ou incinération.

### CADRE DU TRAVAIL

L'étude a débuté dès la fin du mois de novembre 2017 avec une recherche bibliographique menée en parallèle des cours. Elle s'est poursuivie à plein temps à la fin du semestre d'automne sur une durée de 5 semaines avec une échéance fixée au 20 mars 2018.

Le CEAS a formulé les objectifs suivants :

Objectif global :

- ✓ Etudier la faisabilité d'une installation d'incinération ou de pyrolyse des déchets finaux des villes secondaires (30'000 habitants) pour réduire le volume des déchets à mettre en décharge et concentrer leur nocivité potentielle.

Objectifs spécifiques :

1. Déterminer des voies de valorisation ou d'élimination appropriées des déchets ménagers.
2. Envisager et proposer différentes solutions techniques possibles.
3. Evaluer le traitement ou les possibilités de valorisation des cendres et des matières issues du processus.
4. Aborder les pistes de valorisation de l'énergie produite.
5. Evaluer les impacts sur l'environnement d'une telle installation.

## HYPOTHÈSES DE TRAVAIL

Le travail a été guidé par les hypothèses suivantes :

- ✓ Les déchets à traiter sont principalement : du vrac (pour les déchets qui n'auraient pu être triés), les textiles, les plastiques (sacs et plastiques durs en trop mauvais état pour être valorisés), les matériaux complexes (emballages type tetra pac,...) et le papier et le carton.
- ✓ Les solutions techniques approfondies dans ce travail sont uniquement thermochimiques, l'approche biologique est mise de côté à la vue de la typologie des déchets à traiter.
- ✓ La capacité de traitement envisagée est de maximum 4 tonnes de déchets par jour.
- ✓ Une valorisation efficace des déchets doit se baser sur les réalités scientifiques, politique et socio-économiques local.

## PROBLÉMATIQUE

Le problème de la gestion des déchets ne s'est posé que dernièrement, suite à l'arrivée de la production industrielle et le développement des villes urbaines (conséquence de la croissance démographique). En effet, il n'y a pas si longtemps, presque tout pouvait être récupéré et les composés organiques étaient recyclés naturellement. Les seuls déchets ultimes étaient les rebuts de la métallurgie (Maes, 1992).

Aujourd'hui, les exigences en biens de consommation ainsi que l'essor de l'industrie et de la chimie de synthèse ont eu pour conséquences la création d'importantes quantités de déchets ultimes. L'élimination de ces déchets nécessite alors de nouvelles approches de gestion et des technologies de traitement toujours plus performantes devant prendre en compte les préoccupations environnementales et le développement durable.

Dans les pays en développement (PED) (comme partout dans le monde), la production des déchets ménagers a augmenté drastiquement ces dernières décennies à cause de :

- changement des modes de vie ;
- augmentation très rapide de la population dans les grandes villes ;
- augmentation du pouvoir d'achat ;
- incitation à la consommation de produits emballés (dont les emballages ne servent plus à d'autres utilisations).

Cette augmentation drastique pose un problème environnemental très préoccupant. De plus, les systèmes de gestion des déchets dans les PED sont pratiquement inexistantes. En effet, l'explosion démographique, l'accroissement des activités urbaines, l'insuffisance des ressources financières des municipalités et l'absence de réelles politiques environnementales sont parmi les facteurs qui expliquent que dans certaines capitales africaines, moins de 30% des déchets sont évacués (STM, 2003). De plus, jusqu'en 1990, il n'existait presque pas de stratégies nationales en matière de gestion des déchets pour les villes d'Afrique subsaharienne, car les priorités étaient attribuées à d'autres secteurs de développement, tels que la recherche de la sécurité alimentaire et la lutte contre la désertification (R. E. GBINLO, 2010).

Actuellement, la gestion des déchets ménagers est devenue un problème prioritaire en Afrique subsaharienne, principalement dans les régions urbaines qui accueillent une population toujours plus importante et des activités humaines toujours croissantes.

Le Burkina Faso n'échappe pas à ces réalités. Ses villes urbaines subissent actuellement de forte croissance démographique et spatiale qui n'ont malheureusement pas toujours été accompagnés par la mise en place d'infrastructures et de politique adéquate de gestion des déchets. La plupart des actions dans le domaine sont entreprises par des structures informelles, associatives ou privées souvent appuyées financièrement et techniquement par des ONG. Mais ces actions restent marginales et les déchets s'accumulent entraînant inévitablement des nuisances environnementales et sanitaires.

La collecte, l'évacuation et le traitement des déchets demeurent dans ce pays un problème de santé publique dû à une forte pollution de l'ensemble des ressources vitales (air et eau notamment) et à des difficultés de sécurité alimentaire (via la pollution des sols et l'intoxication des animaux). En effet, le Burkina Faso est confronté depuis quelques années à l'arrivée massive de nouveaux types de déchets sans avoir les connaissances ni les fonds pour les gérer. Comme par exemple les sacs plastiques qui envahissent le continent africain et conduisent à une pollution visuelle et environnementale ainsi qu'à la mort de nombreux animaux qui ingèrent ce type de sacs abandonnés.

Actuellement dans ce pays, il existe trois voies pour les déchets ménagers :

- l'incinération non-contrôlée ;
- l'épandages ;
- ou l'enfouissement dans des décharges plus ou moins contrôlées.

Toutes choses qui concourent à porter préjudice à la santé de l'Homme et de l'environnement. En effet, le brûlage des déchets ménagers auquel s'adonnent encore aujourd'hui les populations, constitue un facteur polluant de l'air menaçant sérieusement la santé publique. Les bactéries nocives véhiculées par le vent sont cancérigènes et provoquent des malformations et des maladies respiratoires.

De plus, procéder à l'épandage des déchets ménagers sur des décharges situées hors des villes est relativement courant. Mais même si cette opération est bien conduite, elle ne saurait être satisfaisante. En effet, ceci engendre une pollution de l'air (odeurs, gaz...) et du sol (surface, sous-sol...) et représente des milieux favorables à la prolifération d'insectes et de petits rongeurs responsables des maladies et infections en tout genre (Thonart et al., 2005). Cette situation est liée au fait que les décharges n'ont jamais fait l'objet d'études d'impact environnemental.

L'enfouissement quant-à-lui, s'il n'est pas effectué dans le respect des normes environnementales, peut rencontrer les mêmes problèmes que l'épandage. En effet, il est souvent signalé dans la littérature qu'au voisinage des décharges d'enfouissement, les eaux souterraines et le sol se trouvent pollués par de fortes concentrations en métaux lourds (cuivre, plomb, cadmium) et peuvent par conséquent, engendrer diverses maladies. Les études réalisées par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) ont démontré que les deux tiers environ des habitants des pays en développement sont exposés à des risques importants pour la santé dues à une mauvaise gestion des déchets (ménagers et eaux usées).

Si la récupération des déchets ménagers est relativement bien développée dans les grandes villes du Burkina Faso, elle ne suffit pas à régler l'ensemble des problèmes. En effet, malgré des textes juridiques de plus en plus exigeants et des acteurs s'investissant sur les questions des déchets et de l'environnement de plus en plus présents, il n'en demeure pas moins que la situation sanitaire des villes du Burkina Faso (et des PED en général) reste précaire.

Par conséquent, afin de diminuer la nocivité des déchets ménagers, il est essentiel de réduire le volume à enfuir au sein de différents Centres de tri existants. Pour ce faire, il est nécessaire de déterminer des voies d'élimination ou de valorisation appropriées.

## OBJECTIFS

L'objectif de ce travail est de fournir des pistes de solutions pour le traitement, la valorisation énergétique et l'élimination des déchets ménagers de l'Afrique de l'Ouest, plus précisément dans certaines communes du Burkina Faso. Il s'agit ainsi d'étudier de façon globale la problématique, depuis la caractérisation des déchets jusqu'à la proposition de solutions de valorisation thermochimique appropriées qui pourront être mises en œuvre au niveau local. Les objectifs spécifiques de cette étude sont :

1. La détermination de solutions adaptées pour le traitement et la valorisation des déchets solides des villes secondaires (30'000 habitants) du Burkina Faso ;
2. L'étude des contraintes existantes, qu'elles soient sociales, économiques, environnementales, politiques ou technologiques ;
3. La proposition de filières de valorisation et d'élimination des déchets solides ménagers ;
4. L'identification des possibilités de valorisation de l'énergie produite ;
5. L'objectif final est de formuler des recommandations en vue d'un traitement de valorisation énergétique futur des déchets.

Malheureusement, la présente étude n'a pu être menée sur tous les objectifs listés ci-dessus. En effet, en raison de manque de temps et par souci de qualité du travail, seul les objectifs n°1, n°2, n°3 et n°5 ont été traités dans cet écrit. L'objectif n°4, représentent la phase suivante de l'étude. Une partie des informations étant déjà rassemblées, elles ne demanderont qu'à être traitées.

## MÉTHODOLOGIE

La méthodologie choisie se veut avant tout pragmatique, en s'appuyant sur différents travaux déjà effectués sur la caractérisation et la gestion des déchets dans les communes de Pô et de Ouagadougou. Ainsi, une collaboration entre trois parties a été initiée et mise en place pour la gestion du travail de recherche : Le Centre Ecologique Albert Schweitzer (CEAS) à Neuchâtel, L'Association CEAS-Burkina à Ouagadougou et la Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du canton de Vaud (HEIG-VD) à Yverdon-les-Bains. Ce partenariat permet d'avancer de façon plus rapide et efficace vers la recherche de solutions viables.

### PRÉSENTATION DES PARTENAIRES

Le CEAS Suisse : est une association à but non lucratif de coopération technique reconnue par la DDC et bénéficiant du label Zewo. Active depuis presque 40 ans, ses projets se concentrent sur trois pays, le Sénégal, le Burkina Faso et Madagascar. Elle soutient les projets techniquement et financièrement à travers ses partenaires locaux. Chacun de ces projets a pour objectif d'améliorer la qualité de vie des communautés locales à travers la valorisation des ressources naturelles et de l'innovation technique.

Le CEAS Burkina : est une association à but non lucratif créée en 1982 œuvrant dans divers domaines de l'artisanat, des énergies renouvelables, de l'agro écologie et de l'agro transformation ainsi que dans l'assainissement à l'aide de formation et d'appui conseil.

La HEIG-VD : est une haute école spécialisée dans la recherche scientifique appliquée et l'appuis aux entreprises et possède une expertise de longue date dans plusieurs domaines d'utilité dans les pays du Sud, ce qui fut déjà appliqué chez plusieurs de ses partenaires en Afrique ou Amérique du Sud.

### AXES D'ÉTUDE

La méthodologie adoptée pour ce travail de recherche s'articule autour de trois axes principaux :

- Cadrage de l'étude et recherche bibliographique

Le point de départ de ce travail a été la mise en place du cadrage, de l'orientation du sujet de recherche à travers des échanges entre toutes les parties. Ensuite une collecte de données bibliographiques a été effectuée d'une part dans les dossiers et travaux effectués au sein du CEAS, et d'autre part dans diverses études effectuées dans le monde sur ce même sujet.

➤ Détermination des techniques de valorisation possibles des déchets ménagers

A partir de la caractérisation typologique des déchets solides ménagers obtenues lors de précédentes études, une caractérisation physico-chimique de la composition du mélange type a pu être déduite afin de déterminer, théoriquement, la part valorisable de ce dernier. Des solutions techniques possibles envisageables pour le traitement de valorisation des déchets (pyrolyse, gazéification et combustion) seront donc abordées. En effet, les solutions techniques approfondies dans ce travail sont uniquement thermochimiques, l'approche biologique ayant été mise de côté à la vue de la typologie des déchets à traiter.

➤ Traitement des résultats obtenus

Cette dernière phase est un exercice d'analyse et d'interprétation des résultats obtenus théoriquement dans l'atteinte des objectifs fixés. En effet, ce travail devra permettre de proposer des solutions techniques pour aboutir à une filière de gestion beaucoup plus complète des déchets solides ménagers des villes secondaires du Burkina Faso.

## MISE EN ŒUVRE

La mise en œuvre de ce projet se fera à travers les activités suivantes :

1. Revue bibliographique sur la question : documents de caractérisation des déchets au sein de certaines communes du Burkina Faso ; documents sur les filières de gestion des déchets actuellement en place au sein de ces communes ; documents sur les processus de valorisation des déchets par pyrolyse, gazéification et incinération ; documents sur les risques environnementaux et de santé générés par ces processus de valorisation ; documents sur les stratégies de gestion des déchets écologiquement rationnelles utilisées avec succès dans d'autres pays du tiers monde...
2. Caractériser théoriquement la composition du déchet et sortir la part valorisable de ce dernier, pour chaque type et catégorie de déchets.
3. Déterminer les différentes stratégies et type de valorisation possible pour chaque cas déterminé à la suite de la caractérisation physico-chimique des déchets ménagers.
4. Etudier les impacts socio-économiques, environnementaux et politique d'une telle filière de traitement des déchets.
5. Définir les avantages d'un produit sortant pour l'industrie de proximité et ainsi déterminer des solutions bénéfiques pour le pays.
6. Evaluer les obstacles et opportunités des différentes stratégies possibles.
7. Proposer des solutions appropriées.

Comme précisé ci-dessus, la présente étude n'a pu être menée sur tous les objectifs prévus à l'origine. Par conséquent, les points 3 et 5 n'ont pas pu être traités dans les détails. Mais une grande partie de ces informations se trouvent rassemblées dans cet écrit, elles ne demanderont qu'à être traitées dans le cadre d'une future étude.

## CONTEXTE DE L'ÉTUDE

### LIEU DE L'ÉTUDE

Situé en Afrique de l'Ouest, entre les longitudes 5° Ouest et 2° Est et les latitudes 9° Sud et 15° Nord, le Burkina Faso est un pays enclavé, entouré au Nord et à l'Ouest par le Mali, au Sud par la Côte d'Ivoire, le Ghana, le Togo et le Bénin et à l'Est par le Niger. D'une superficie de 274'000 km<sup>2</sup>, le Burkina Faso présente un relief très peu marqué (entre 150 m et 750 m d'altitude) et plus de la moitié du pays est constitué d'une immense plaine (le plateau mossi) dont l'altitude varie entre 250 et 300 m.

Actuellement, le pays compte environ 18 millions d'habitants, le centre du pays présentant les densités de population les plus élevées. Le taux d'urbanisation est passé de 4.7% en 1960 à 30% en 2016 (statistiques, perspective monde). Cette forte croissance s'explique par l'augmentation de la population et un exode rural important, connu dans les PED en général.

### COMMUNES ÉTUDIÉES

Les villes secondaires d'environ 30'000 habitants que le CEAS souhaite traiter dans le cadre de cette étude sont celles liées au « Projet d'Appui à la Gestion des Déchets Municipaux dans les communes de Saaba, Gourcy et Pô (PAGDM-SGP) ».

Le PAGDM-SGP a débuté le 1er juillet 2011 avec comme objectif de « concevoir, mettre en place et financer un système de gestion durable et de valorisation des déchets municipaux, sous maîtrise d'ouvrage communal ». Les résultats attendus sont :

- l'établissement de Plans Stratégiques de Gestion des Déchets Municipaux (PSGDM) ;
- la mise à disposition d'un Fond Communal pour l'Assainissement (FCA) ;
- la mise en place d'un système de collecte, de tri, de valorisation et de traitement des déchets ménagers ;
- le lancement d'action d'Information-Education-Communication (IEC) environnementales.

Depuis 2011, les trois communes Saaba, Gourcy et Pô ont fait l'objet de diagnostics poussés sur la situation actuelle de la gestion des déchets et sont actuellement dotées de Centres de tri. De plus, des actions de production de compost sont effectuées dans les trois communes et certaines actions de transformation de sachets plastiques en matériaux de construction (pavés de route par exemple) sont en cours.

Saaba est située au centre du Burkina Faso, en banlieue proche de la capitale, Ouagadougou.

Gourcy, quant-à-elle, est située au centre-nord, à environ 140km de la capitale.

Pô est située au centre-sud du Burkina Faso, à la frontière du Ghana à environ 120km de Ouagadougou.



FIGURE 1 : CARTE DE LOCALISATION DU PAGDM-SGP (ISF-direction, T'kint, 2012)

Afin de permettre l'utilisation des données de cette étude dans le cas d'autres communes, hors PAGDM-SGP, Saaba, Gourcy et Pô ont été cataloguées en « standing ». En effet, le Burkina Faso a adopté une classification des zones habitées basée sur la nature des matériaux de construction et le raccordement à l'eau et à l'électricité des quartiers. Cette classification comporte principalement trois catégories dont les caractéristiques principales sont présentées dans le Tableau 1.

TABLEAU 1 : CRITÈRES DE DÉTERMINATION DES ZONES DE STANDING

Standing	Zone	Voirie	Zone électrifiée	Caniveaux
Haut	lotie	revêtue	oui	oui
Moyen	lotie	semi-revêtue	oui	oui
Bas	non-lotie	en terre	non	non

Par contre, seuls les cas des haut et moyen standings seront étudiés dans le cadre de cette étude. En effet, Saaba est catégorisée en « haut standing » et Gourcy et Pô, quant-à-elles, sont catégorisées toutes deux en « moyen standing ».

## CLIMAT

Le climat du Burkina Faso se rattache au type soudano-sahélien, caractérisé par :

- Une saison sèche de huit mois (octobre à mai), dominée par l'harmattan, un vent sec provenant du Sahara et soufflant du nord-est vers le sud-ouest.
- Une saison humide de quatre mois (juin à septembre), amenée par la mousson, un vent humide remontant du sud.

La pluviométrie annuelle varie entre 600 mm et 1100 mm. Cette faible pluviométrie associée à une évaporation importante durant la saison sèche (jusqu'à 3000 mm/an) se révèle préoccupante pour l'approvisionnement en eau qui se heurte à des difficultés lors des années plus sèches.

## CONTEXTE SOCIO-ÉCONOMIQUE

Le revenu annuel moyen par habitant au Burkina Faso est d'environ 670\$ (640 CHF) (journal du net, 2018), ce qui le classe dans les pays les plus pauvres de la planète. Le secteur agricole occupe environ 80% de la population active et représente plus de 30% du PIB. L'essentiel des investissements proviennent de l'aide extérieure (Développement et coopération-Europeaid, 2010).

## CONTEXTE DÉMOGRAPHIQUE

La population de la ville de Pô se montait à 29'193 habitants en 2012. Sachant qu'elle se montait à 24'320 habitants en 2006, elle a connu un taux de croissance de 2.8% par année (INSD, 2015).

La population de Gourcy, quant-à-elle, se montait à 30'565 habitants en 2012 et à 24'616 en 2006. Elle a connu un taux de croissance relativement semblable à Pô se montant à 3.2% par année (INSD, 2015).

Il s'agit donc bien de villes secondaires d'environ 30'000 habitants. Par contre Saaba, la banlieue de Ouagadougou, comptabilisait une population de 50'885 habitants en 2006.

## GESTION DES DÉCHETS MÉNAGERS

La gestion des déchets ménagers dans les PED n'est pas facile à mettre en place en raison de nombreuses difficultés d'ordre économique, technique, méthodologique ou organisationnelle (Aina, 2006). En effet, face au changement de mode de vie et de consommation et en raison de problèmes de gouvernance (structure hiérarchique peu claire entre les autorités, les opérateurs de la collecte et les citoyens), les élus se retrouvent souvent démunis face à la gestion des déchets (Thonart et al., 2005). Dans beaucoup de localités, les décharges (qu'ils s'agissent de décharges d'épandage ou d'enfouissement) sont devenues l'unique moyen pour le traitement des déchets (Aina, 2006), elles sont « l'issue ultime pour plus de 90% des déchets récoltés » (Thonart et al., 2005). La mise en décharge présente l'avantage de traiter de grandes quantités de déchets, toute catégorie confondue, à moindre coût. Mais ces décharges respectent rarement les normes sanitaires et environnementales.

L'analyse effectuée par (Thonart et al., 2005) dans plusieurs pays du Sud démontre que les populations souhaitent aujourd'hui assainir leur environnement urbain. En effet, dans des zones urbaines à faibles revenus, les populations se sont mobilisées, appuyées financièrement par des ONG, pour mettre en place des systèmes de collecte des déchets avec des moyens simples comme la charrette à traction asine (tirée par un âne) et l'instauration d'un abonnement avec paiement direct à l'enlèvement.

### GESTION DES DÉCHETS MÉNAGERS AU BURKINA FASO

La gestion des déchets ménagers au Burkina Faso est actuellement régie par un ensemble de lois extrêmement détaillées mais généralement inapplicables dans la majorité des cas. En effet, de nombreux PED ont élaborés leur législation sur la base de celle des PI et ce, sans les adapter à leur contexte propre.

Au Burkina Faso, il est stipulé que chaque commune est tenue d'élaborer un « plan de gestion des déchets » précisant les procédés de traitement et leur contrôle, en collaboration avec toutes les autorités et institutions concernées. En matière de traitement, la municipalité est responsable de l'hygiène et de la santé publique, de la préservation de l'environnement ainsi que de l'exploration des pistes de valorisation (énergétique ou/et matière). La création d'une décharge nécessite une étude d'impact sur l'environnement et les contrôles doivent se faire une fois par trimestre par les services du ministère de la santé et une fois par semestre par les services de l'hydraulique et de l'environnement (Ouédraogo, 2008).

Actuellement, la filière de gestion des déchets dans les communes de Saaba, Gourcy et Pô consiste à effectuer la pré-collecte des déchets, leur transport et leur tri au sein des Centres de tri mis en place en collaboration avec le CEAS.

- La pré-collecte consiste à récupérer les déchets auprès des ménages pour les acheminer vers des sites de transit. Le service est assuré par des associations ou des entreprises (PME) à l'aide de charrettes à traction asine ou de tracteurs. Le service est rétribué directement par les ménages et peut s'élever de 500 à 2'000 FCFA par mois selon la quantité de déchets à évacuer et la fréquence du ramassage. Dans certains cas les ménages amènent eux-mêmes leurs ordures sur le site.
- Le transport consiste à acheminer les déchets des sites de transit vers le Centre de tri. Ce sont des Groupements d'Intérêt Economique (GIE) ou des entreprises qui exécutent le travail à l'aide d'engins motorisés (camions, triporteurs...). A l'entrée des Centres de tri, les engins sont pesés à l'aide d'un pont-basculé.
- Le tri consiste à séparer les déchets en fonction de leur nature (métaux, verre, papier, végétaux, etc.) dans le but d'une valorisation matière (les déchets non valorisés sont enfouis dans le sol).

### DÉFINITION DU DÉCHET MÉNAGERS

Les déchets ménagers sont les ordures générées par les ménages ou les déchets de nature similaire comme les « déchets de bureaux, des commerces, de l'artisanat, des administrations, des halles, des foires, des marchés, des collectivités telles que les cantines, de l'entretien des espaces verts et des voiries ainsi que tous les objets et cadavres de petits animaux » (Thonart et al., 2005).

### STRATÉGIE DE TRAITEMENT DES DÉCHETS MÉNAGERS

Différentes filières de traitement des déchets ménagers existent actuellement sur les plans de récupération matières et valorisation énergétique. La connaissance de ces différentes filières devrait permettre de favoriser le choix d'un traitement en respectant les contraintes environnementales, les circonstances locales, des conditions économiquement et le développement durable. Ces filières de traitements sont :

- A. Valorisation matière :
  - a. en agriculture ;
  - b. en matériaux.

- B. Valorisation énergie :
  - a. combustibles de substitution ;
  - b. électricité ;
  - c. chaleur.
- C. Elimination.

La valorisation se fait après pré-sélection de certains composés. Elle nécessite donc un tri des déchets en amont. Elle est intéressante car elle permet d'une part, de diminuer le volume de déchets à éliminer et d'autre part, d'économiser de la matière première et de l'énergie (Thonart et al., 2005).

- La valorisation matière
  - o *En agriculture* : Le secteur agricole utilise des déchets depuis toujours, en particulier ceux de sa propre activité. Le compostage des matières fermentescibles contenu dans les déchets ménagers permet de développer plus largement cette filière. Il permet une valorisation matière organique, en transformant ces matières en un compost utilisé comme amendements minéraux ou pour améliorer les propriétés des sols de culture ou de jardin. Le compostage peut être réalisé à domicile ou dans le cadre d'un compostage de quartier.
  - o *En matériaux* : Des industries de recyclage ou artisans divers récupèrent certaines matières, notamment les plastiques, métaux, verre et papiers.
- La valorisation énergétique
  - o *En combustibles de substitution* :
    - Par des procédés biologiques : Lorsque les déchets sont biodégradables, des fermentations méthaniques ou alcooliques peuvent être effectuées. Ces dernières produisent du biogaz ou de l'alcool, utilisés ensuite comme combustibles gazeux ou liquides. Ces procédés sont principalement adaptés au traitement des déchets fermentescibles humides.
    - Par des procédés thermiques : La pyrolyse et la gazéification permettent de transformer des déchets en combustibles liquides, gazeux ou solides. Ces deux procédés seront expliqués avec plus de détails dans la suite de cette étude.
  - o *En électricité* : Les traitements thermiques des déchets permettent une valorisation directe en électricité par le couplage de turbines ou moteurs à gaz. Ces technologies, appelées pyrolyse et gazéification intégrées, présentent un intérêt particulier puisqu'elles permettent de fournir l'électricité aux populations de manière économique en valorisant leurs déchets.
  - o *En chaleur* : Les traitements thermiques des déchets permettent également une valorisation directe en chaleur via incinérateurs, fours ou brûleurs. Cette chaleur doit au mieux être utilisée sur place (générateur de vapeur ou chauffage de fours industriels, sécherie, cimenteries, etc...).

L'élimination des déchets peut se faire de plusieurs manières, la mise en décharge est la méthode la plus utilisée dans les PED (Thonart et al., 2005), mais il en existe d'autres comme l'incinération (sans utilisation directe de la chaleur produite). Bien souvent la mise en décharge consiste en réalité à remplir un simple trou ou à épandre les déchets accumulés, et l'incinération à brûler à l'air libre ces derniers. Cette élimination peut se faire dans le respect des normes environnementales en construisant un Centre de tri dans les règles ou en acquérant un brûleur contrôlé par exemple.

### CHOIX DES VOIES DE VALORISATION DES DÉCHETS

Les déchets ménagers solides sont généralement composés de matières fermentescibles, de papiers et cartons, de textiles, de plastiques, de complexes (genre tetrapak), de verres, de métaux ferreux ou non-ferreux, de déchets électroniques et piles etc. De plus, du sable, du gravier et de la terre est également retrouvé dans la constitution globale du déchets ménagers. Chacune de ces catégories doit être considérée pour déterminer d'une voie de traitement qui lui serait propre. De plus, un même type de déchet peut être valablement traité par différentes filières.

Pour faire un choix adéquat d'une (ou de plusieurs) filières pour un déchet donné, il est important de prendre en compte :

- ✓ la connaissance de la composition du déchet (caractérisation physico-chimique);
- ✓ les quantités disponibles des déchets à traiter;
- ✓ les contraintes socio-économiques locales.

En effet, la caractérisation du déchet est primordiale pour déterminer le mode de traitement le mieux adapté puisqu'en fonction de la composition d'un déchet, ce dernier peut être orienté vers des filières de traitement appropriées. Une caractérisation détaillée selon les cas d'étude bien spécifiques est effectuée dans la suite de ce travail.

Mais avant de procéder à la caractérisation et d'orienter le choix de valorisation des déchets ménagers, il serait judicieux de définir clairement les scénarios possibles de gestion et traitement des déchets.

### MISE EN CONTEXTE DE LA GESTION DES DÉCHETS ET SCÉNARIOS ENVISAGÉS

La figure 2 ci-dessous représente l'état actuel de la gestion des déchets ménagers dans les communes de Saaba, Gourcy et Pô :

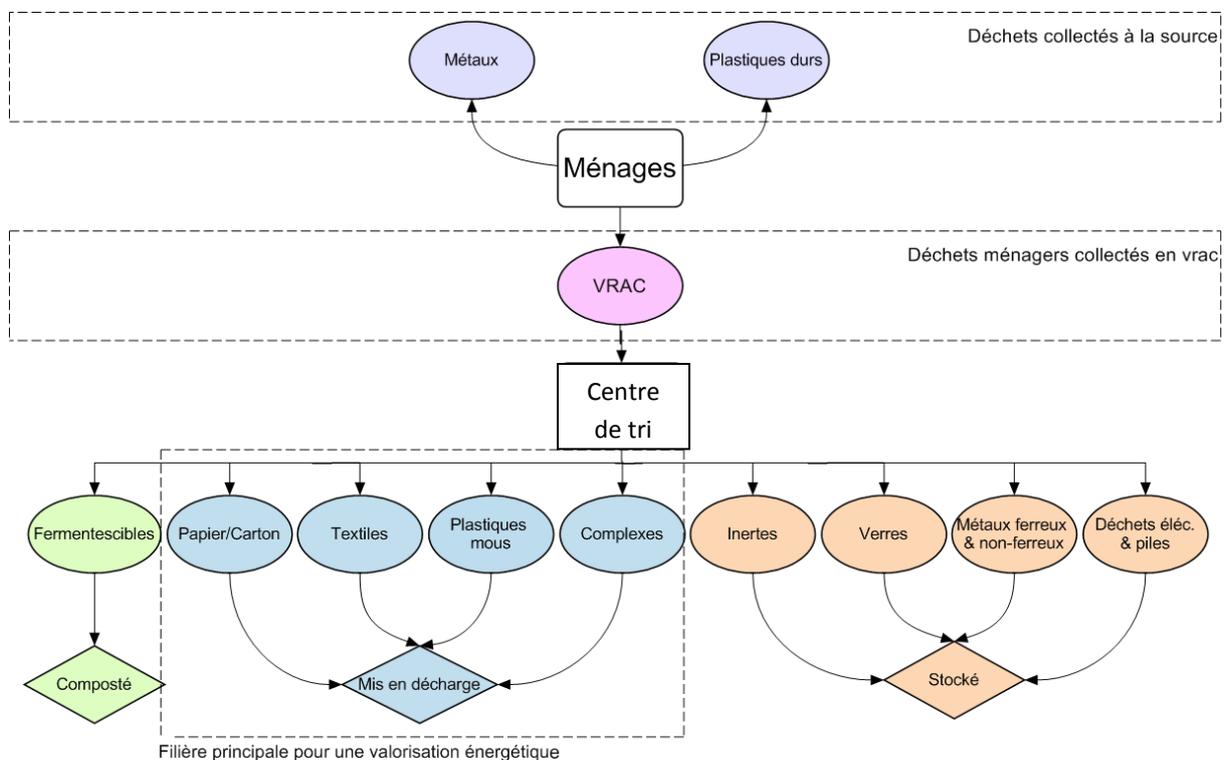


FIGURE 2 : ÉTAT ACTUEL DE LA GESTION DES DÉCHETS MÉNAGERS DANS LES COMMUNES DE SAABA, GOURCY ET PÔ

Les déchets sont soumis à une séparation à la source (directement auprès des ménages) qui permet de retirer certaines matières recyclables, à valeur marchande :

- les métaux ;
- et les plastiques durs.

Ces derniers sont collectés par des « valorisateurs informels » en porte-à-porte. Ces matières (métaux et plastiques durs) sont ensuite vendues auprès des industries de transformation secondaire et ne sont ainsi pas souillées par les matières organiques et les ordures ménagères qui diminueraient la qualité et le prix de revente de ces matériaux recyclables. De plus, beaucoup de commerce récupèrent la plupart du verre sur consigne.

Les autres matières composants les déchets ménagers sont, quant-à-elles, acheminées vers des centres de tri afin d'y être triées et conditionnées. Les matières inertes (verre, fer blanc, métaux...) y sont triées puis stockées car elles possèdent une certaine valeur marchande auprès des artisans et industriels de la région. Les matières organiques sont, quant-à-elles, compostées afin de produire de l'engrais pour les sols.

Les refus de tri sont les déchets qui ne peuvent être valorisés actuellement au point d'avancement de la filière de gestion des déchets existante. Ils sont actuellement enfouis au sein du Centre de tri correspondant. Il s'agit donc de la filière préconisée aux premiers abords pour une valorisation énergétique par pyrolyse ou incinération. Il s'agit principalement des sacs plastiques, des textiles et mèches de cheveux ainsi que certains papiers et cartons (en effet, certains papiers et cartons sont compostés dans certains cas).

## SCÉNARIO I : FILIÈRE CENTRALISÉE DE TRAITEMENT DES PLASTIQUES MOUS

Le scénario 1 concerne l'éventualité de création d'une nouvelle filière de récupération à la source, des déchets plastiques mous. En effet, ces plastiques mous (types sacs plastiques) prolifèrent en Afrique de l'Ouest. Sachant qu'ils sont de faible valeur marchande en termes de matière, ils ont par contre une valeur calorifique intéressante au niveau d'un traitement thermique.

Il est ainsi envisageable de créer une valeur marchande pour ce type de plastique mous si un industriel s'implantant dans la région s'y intéresse et les rachète directement à la source. Et ce, malgré qu'à l'heure actuelle, ces plastiques ne sont pas recyclés dans de nombreux pays « développés », surtout en fonction de la complexité ou du coût dissuasif des traitements de certains de ces plastiques (films plastiques...).

Il s'agira donc d'étudier les possibilités d'une voie de traitement centralisée de ces matières plastiques. En effet, le fait de les récupérer à la source permet de les acheminer directement à l'usine de traitement et ainsi, d'améliorer la qualité du produit puisque ces matières ne sont pas souillées par les matières organiques et les ordures ménagères. De plus, cette voie permettrait d'obtenir de grande quantité de matière à traiter.

Le scénario I s'est donc concentré sur le traitement par pyrolyse de ces plastiques. Pour plus de clarté, la figure 3 ci-dessous schématise ce scénario.

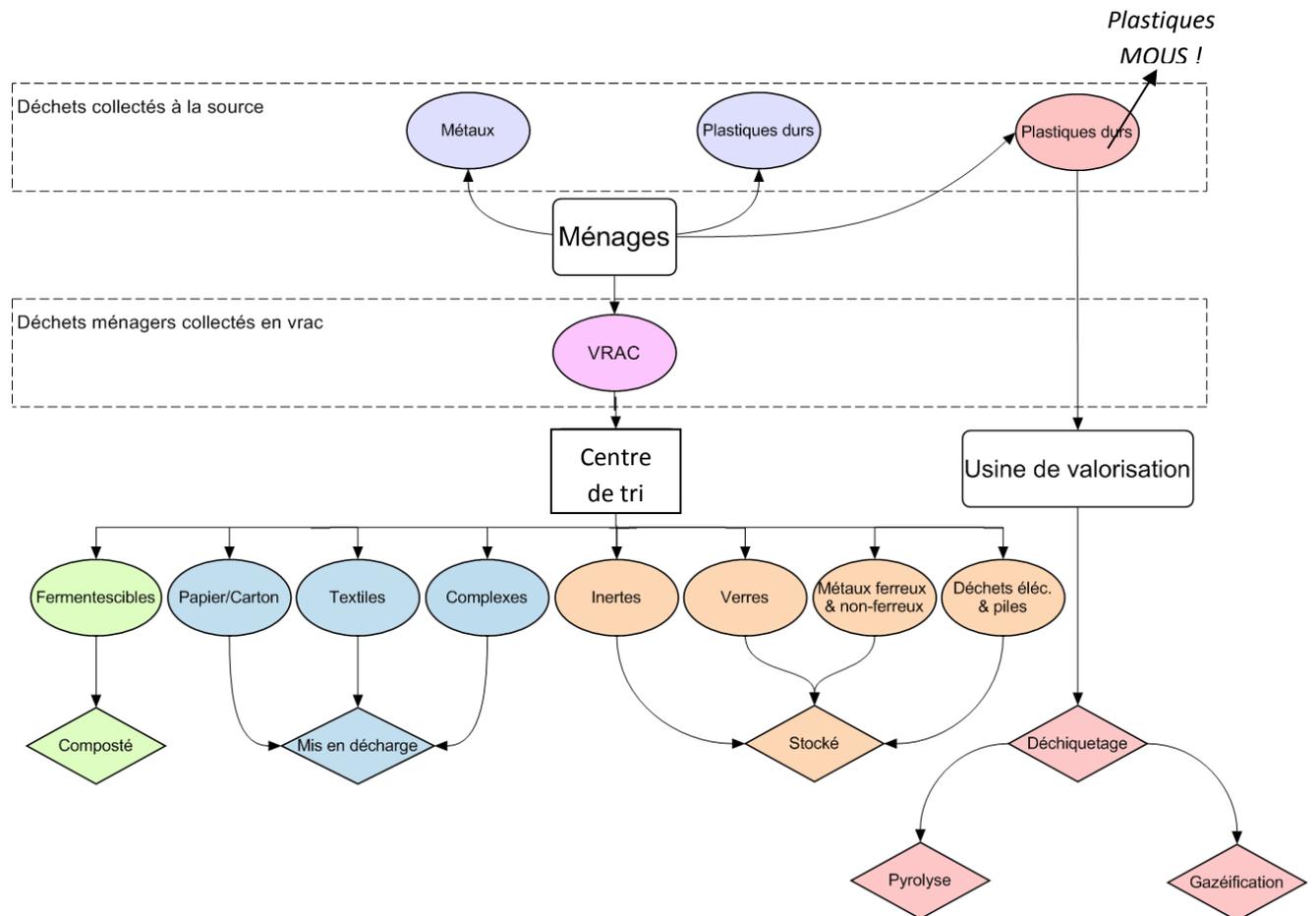


FIGURE 3 : SCÉNARIO I – FILIÈRE CENTRALISÉE DE TRAITEMENT DES PLASTIQUES MOUS

### SCÉNARIO II : FILIÈRE DÉCENTRALISÉE D'INCINÉRATION DES DÉCHETS « EN REFUS DE TRIS »

Dans le scénario II, il est question d'incinérer les « refus de tris », c'est-à-dire les déchets mis en décharge dans la filière actuelle. En effet, ce scénario ne change rien à la filière de gestion des déchets existante. Le tri est maintenu et le but de ce scénario est d'incinérer les refus de tris afin d'en diminuer le volume des déchets à enfouir. Il n'est pas question de valorisation énergétique puisque l'Afrique de l'Ouest a un faible besoin en énergie chaleur. En effet, afin de pouvoir bénéficier de cette énergie chaleur dans le cadre de ce scénario, un atelier de séchage de fruit ou de poterie ou toute autre industrie ayant un besoin en énergie chaleur devrait se trouver très proche du Centre de tri.

Il est évidemment possible de transformer cette énergie chaleur en électricité, mais pour cela il serait préférable de transformer entièrement la filière de gestion des déchets. En effet, la quantité de déchets à incinérer dans chaque Centre de tri n'est pas suffisante pour qu'une centrale d'incinération soit rentable si l'on souhaite produire de l'électricité. Il s'agit donc ici, d'étudier le potentiel d'une micro-incinération décentralisée.

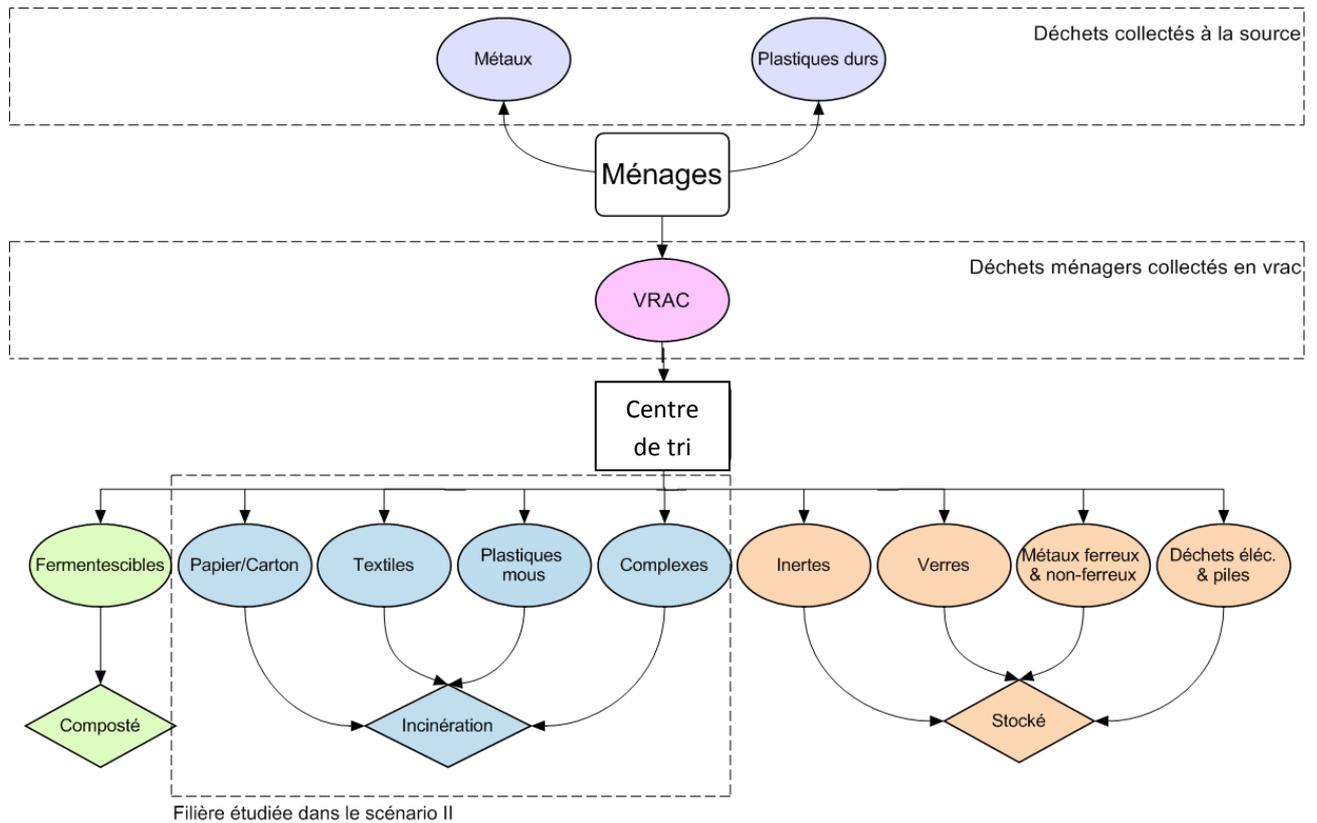
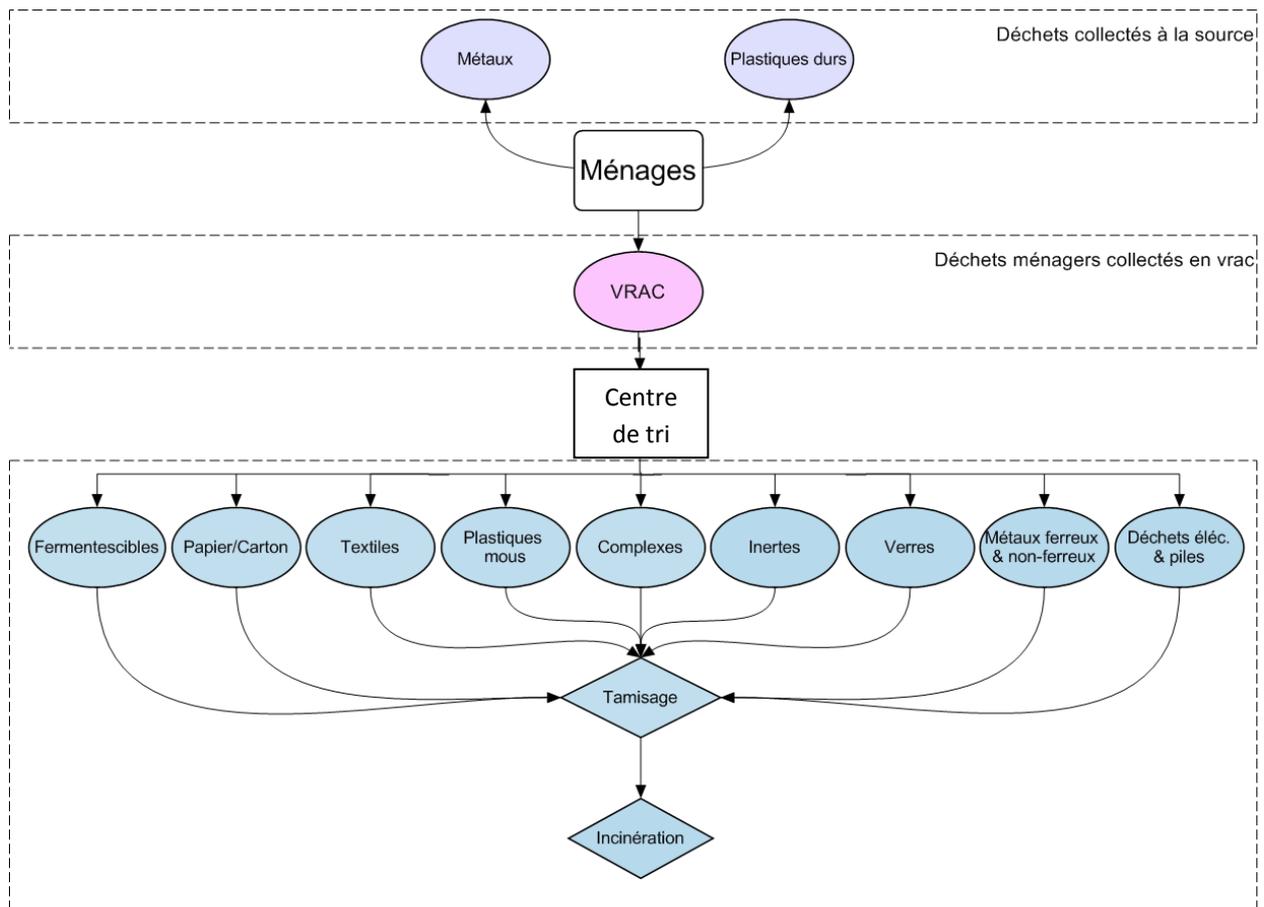


FIGURE 4 : SCÉNARIO II – FILIÈRE DÉCENTRALISÉE D’INCINÉRATION DES DÉCHETS « EN REFUS DE TRIS »

### SCÉNARIO III : FILIÈRE DÉCENTRALISÉE D’INCINÉRATION DES DÉCHETS APRÈS TAMISAGE

Le scénario III représente le cas où le tri des déchets ménagers est abandonné. Seul un tamisage est effectué afin de séparer certains inertes (sable, terre et petit gravier) des déchets à traiter. De plus, les petites piles et composants électroniques peuvent également être séparés des déchets à traiter via ce tamisage. Ce qui est bénéfique afin d’éviter une concentration trop forte en métaux lourds dans les cendres. Ce scénario est étudié et comparé au scénario précédent afin de déterminer si le tri est absolument nécessaire avant traitement. En effet, ce dernier a un coût non négligeable pour les communes. Et puisque l’incinération a un coût également, il serait peut-être judicieux de limiter ces coûts en abandonnant le tri. En effet, ce scénario reste, comme le précédent, un traitement des déchets décentralisé et par conséquent, sans grande possibilité de retirer une valeur marchande de l’énergie chaleur obtenue.

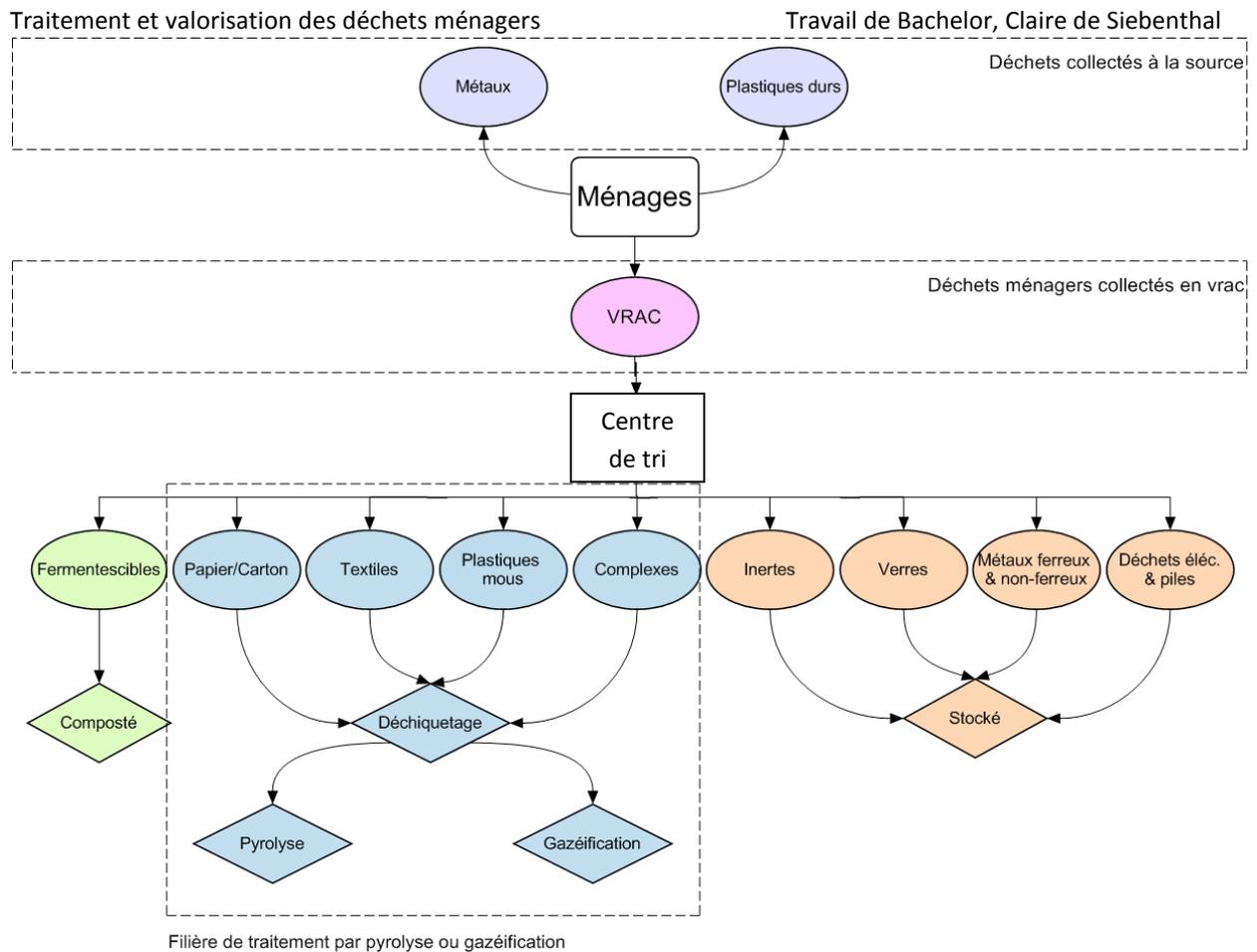


Filière étudiée dans le scénario III

FIGURE 5 : SCÉNARIO III – FILIÈRE DÉCENTRALISÉE D’INCINÉRATION DES DÉCHETS APRÈS TAMISAGE

### SCÉNARIO IV : FILIÈRE DE TRAITEMENT DES DÉCHETS « EN REFUS DE TRIS » PAR PYROLYSE OU GAZÉIFICATION

Le scénario IV prend en compte les mêmes déchets que dans le scénario II, les déchets « en refus de tris ». Mais il s’agit ici, d’un traitement par pyrolyse ou gazéification. De plus, selon la technologie de traitement employée, une préparation des matières est conseillée dans un but d’optimisation du traitement final. Dans le cas d’un traitement par pyrolyse ou gazéification, un déchetage est nécessaire. Alors que dans le cas de l’incinération, aucune préparation des matières n’est nécessaire.



**FIGURE 6 : SCÉNARIO IV - FILIÈRE DÉCENTRALISÉE DE TRAITEMENT DES DÉCHETS « EN REFUS DE TRIS » PAR PYROLYSE OU GAZÉIFICATION**

Chacun des traitements des quatre scénarios présentés ci-dessus permet une production d'énergie et/ou de sous-produits (dans le cas de la pyrolyse ou de la gazéification). De plus, à la fin de chacun de ces traitements il reste des déchets ultimes appelés « résidus ». Les résidus de ces traitements sont finalement enfouis.

Les motivations de mettre en place un traitement des déchets avant leur enfouissement sont :

- De valoriser un déchet qui serait perdu lors d'un enfouissement direct ;
- Minimiser les volumes destinés à l'enfouissement, dans un contexte de production de déchets de plus en plus important dans nos sociétés de consommation ;
- La production d'énergie, que ce soit sous forme électrique ou sous forme de carburant ;
- La réduction des impacts sur l'environnement générés lors d'un enfouissement direct ;
- La réduction des coûts élevés engagés lors de l'exploitation d'un lieu d'enfouissement, dans le cas d'une vente des sous-produits énergétique obtenu.

L'enfouissement des déchets ménagers bruts peut sembler moins coûteux que l'enfouissement de résidus traités. Cependant, la majorité des PI remet en cause l'enfouissement. En effet, les coûts totaux de gestion d'un lieu d'enfouissement sont très élevés afin de satisfaire aux exigences réglementaires dans le but de limiter les impacts environnementaux. De plus, les technologies de traitement avant enfouissement sont nombreuses et ne cessent d'innover.

Par contre, ces technologies étant de plus en plus complexes, elles sont difficiles à vulgariser. Par conséquent, il est important de communiquer à ce sujet et de sensibiliser la population à ces nouvelles technologies. En effet, ces technologies sont souvent mal accueillies par manque d'informations et par conséquent, mal utilisées.

## CARACTÉRISTIQUES TYPOLOGIQUES DES DÉCHETS

La mise en place d'un mode de traitement efficace des déchets ménagers nécessite une bonne connaissance des caractéristiques de ces derniers. En effet, la connaissance physico-chimique du déchet est primordiale si l'on souhaite adopter les voies et les traitements les plus appropriés en tenant compte de la situation locale (typologie et dispersion des déchets en amont et marché pour les produits en aval), avec l'objectif d'un développement durable.

### BUT DE LA CARACTÉRISATION

Le but de la caractérisation des déchets est d'identifier les principales composantes, leurs quantités et leurs propriétés essentielles. En effet, si les déchets sont très hétérogènes (ce qui en rend la composition très complexe), ils sont constitués de composants majeurs, de type cellulosiques et plastiques, dont les proportions sont les plus importantes. Afin d'obtenir une idée d'ensemble des propriétés des déchets ménagers, il est nécessaire de déterminer leurs composés majeurs et prédominants. Aussi le recours à des méthodes statistiques, en l'occurrence la caractérisation, est indispensable. Cela permet d'orienter les choix des types de traitement à appliquer au déchet.

### CARACTÉRISATION DES DÉCHETS MÉNAGERS

Afin de déterminer les propriétés des déchets ménagers d'une ville secondaire (moyen standing) du Burkina Faso, une caractérisation physico-chimique des déchets ménagers de la ville de Pô a été effectuée avec précision dans la présente étude. Les valeurs déterminées dans le cas de la ville de Pô peuvent correspondre plus ou moins au cas de Gourcy qui, comme déjà précisé, est une ville relativement semblable en termes de standing. En effet, les travaux d'ANDZI BARHE (2004) ont démontré que « des faibles variations de la composition des déchets ménagers n'ont pas d'incidence notable sur les caractéristiques de la combustion et sur les polluants gazeux générés ». Par conséquent, si les déchets ménagers proviennent d'un lieu géographique relativement proche et d'un standing identique, il est possible de considérer des propriétés physico-chimiques semblables.

De même, une caractérisation des déchets ménagers de Ouagadougou a été effectuée dans cette étude afin de correspondre au haut-standing décrivant le contexte de la ville de Saaba, qui devient la banlieue proche de Ouagadougou.

Différentes études de caractérisation physique effectuées en 2001 et 2013 ont permis de déterminer les composants typologiques des déchets ménagers reçus au sein des Centres de tri de Pô et de Ouagadougou. SARAH BOXLER (2013) a étudié, pour le CEAS, la caractérisation physique des déchets ménagers dans la commune de Pô. Dans le cas de la ville de Ouagadougou, les résultats de la caractérisation physique faite par PROUST (2001) ont été utilisés dans le cadre de cette étude. En effet, aucune caractérisation physique plus récente des déchets de la ville de Ouagadougou est disponible dans la littérature actuelle. Comme déjà précisé, les quantités et typologie des déchets ménagers évoluent de nos jours très rapidement. Mais puisqu'il s'agit de faire correspondre ces valeurs au cas de la ville de Saaba, l'évolution des caractéristiques physiques des déchets dans le temps peut être négligée. En effet, il est possible de considérer que Saaba, banlieue de Ouagadougou, est caractérisée par un retard temporel sur l'évolution physique des déchets de la ville de Ouagadougou.

Cette présente étude s'est donc focalisée sur la caractérisation des déchets ménagers en fonction des haut (Ouagadougou et Saaba) et moyen (Pô et Gourcy) standings. De plus, dans ces deux cas (Pô et Ouagadougou), les périodes de caractérisation physique ont été effectuées sur le terrain lors de la saison sèche. En effet, les Centres de tri sont généralement fermés en saison humide. Les déchets ménagers sont récoltés, mais uniquement entreposés au Centre de tri dans l'attente de la saison sèche et de la reprise du travail de tris. Par conséquent, en plus de la caractérisation par standing, l'étude s'est focalisée sur une caractérisation des déchets ménagers en saison sèche. Les résultats de ces études sont résumés dans les Tableaux 2 à 4.

**TABLEAU 2 : POURCENTAGE EN MASSE PAR RAPPORT À LA MASSE BRUTE TOTALE**

Type de déchet	Masse (%)	
	Ouagadougou	Pô
	<i>Selon M. Proust (2001)</i>	<i>Selon S. Boxler (2013)</i>
Inertes	19.5	56.9
Fermentescibles	39.5	26.3
Papier/carton	8.6	3.3
Textiles	5.8	1.7
Plastiques mous	9.6	7.1
Complexes	4	Dans autres
Verres	2.7	1
Métaux ferreux & non-ferreux	4.2	0.9
Déchets électroniques & piles	1.6	Dans autres
Autres	4.5	2.8

L'examen de ce tableau montre que les constituants les plus importants au sein des déchets ménagers de Ouagadougou (haut standing) comme de Pô (moyen standing) sont ; les inertes (sable, gravier, pierre...), les fermentescibles, les plastiques mous, les papiers/cartons et les textiles.

Une importante proportion d'inertes est constatée, elle se justifie par le sol très sableux du Burkina Faso et les techniques de balayage. Par contre, le taux moyen d'inertes trouvés dans les déchets de la ville de Pô est largement en dessus du taux trouvé dans les déchets de la ville de Ouagadougou. Cette forte proportion d'inertes, au niveau du moyen standing, peut s'expliquer par le type d'habitation. En effet, le sol est généralement non revêtu, le sable est donc beaucoup plus présent dans ces habitations que dans celles du haut standing dont les cours sont généralement bien aménagées. De plus, il est possible de considérer que les inertes trouvés dans les déchets ménagers d'une ville telle que Ouagadougou, sont constitués d'une majorité de sable fin et de très peu de gravats et pierres. Ce qui, en termes de poids, pourrait justifier cette grande différence de proportion. En effet, il a été constaté à Pô une grande proportion d'inertes dont la taille est supérieure à 20 mm (représentant 44% de la masse totale des inertes de la ville de Pô). La grande part d'inertes présents dans les déchets ménagers est véritablement un problème pour la Burkina Faso, principalement pour ce qui concerne le transport et le traitement de ces déchets.

Il est important de noter que ces études sont incomplètes faute de moyen et de temps à disposition. En effet, la production et la composition des déchets ménagers varient en fonction des niveaux de vies (haut-moyen-bas standing), de l'environnement (urbain, rural) mais aussi suivant le climat et les saisons. Cette variation est donc non seulement spatiale mais également temporelle en raison de variations saisonnières importantes (saison des pluies/saison sèche) ou encore de la pratique de rites culturels ou religieux (ex : le Ramadan) (Ben Ammar, 2006). Par conséquent, déterminer une composition représentative des déchets afin d'obtenir un modèle statistiquement valable nécessite plusieurs campagnes de caractérisation suivant les saisons et les rites culturels. Ce qui, par manque de moyen et de temps, n'a pas pu être effectué dans les études résumées ci-dessus.

Ces dernières sont tout de même intéressantes et viables et permettent de traiter le sujet de ce présent travail de manière ciblée sur les besoins des villes secondaires du Burkina Faso. En effet, si l'aspect temporel n'a pas été pris en compte, l'aspect « spatiale » est, quant-à-lui bien défini. Par ailleurs, les résultats de l'étude de Ouagadougou entrent dans la fourchette observée dans les PED par (Thonart et al. 2005). Par contre, les résultats de l'étude de Pô, quant-à-eux, diffèrent fortement. En effet, l'analyse du Tableau 3 montre que la fraction des fermentescibles est étonnamment faible à Pô. Mais cela peut s'expliquer par la forte présence d'inertes dont le taux surpasse de loin la moyenne des PED. Par contre, les résultats de Pô sont dans les normes des PED avec une forte présence du plastique.

**TABLEAU 3 : COMPARAISON ET RÉCAPITULATION DES VALEURS OBTENUES**

Source	Lieu	Principales composantes en % de la masse brute totale			
		Fermentescibles	Papier/carton	Plastique	Inertes
M. Proust (2001)	Ouagadougou	39.5%	8.5%	9.5%	19.5%
S. Boxler (2013)	Pô	26.5%	3.5%	7%	57%
Thonart et al. (2005)	PED	40-55%	5-10%	2-11%	15-40%

De nombreuses études effectuées dans les PED, se basent sur des chiffres généraux. Mais cette manière de procéder est généralement responsable de l'échec de nombreux projets car, comme constaté dans le Tableau 3, la production et la composition des déchets varient énormément d'un pays à l'autre et même, d'une région à l'autre. En effet, cette variation est beaucoup plus forte dans les PED que dans les pays industrialisés en raison de la grande hétérogénéité de chacun des paramètres constituant ces aspects « spatiale et temporel ».

De même, les résultats doivent être nuancés en raison de la date des études de caractérisation, puisque la production de déchets ne cesse de croître au cours du temps.

Par conséquent, les hypothèses suivantes ont été définies régissant toute la présente étude :

- ✓ Les données de la caractérisation effectuée en 2013 par S. Boxler sont utilisées ici afin de caractériser les déchets ménagers d'une région ou d'une ville semblable à Gourcy et Pô (catégorisées dans le moyen standing du Burkina Faso central) ;
- ✓ Les données de la caractérisation effectuée en 2001 par M. Proust sont utilisées ici afin de caractériser les déchets ménagers d'une région ou d'une ville semblable à Saaba (catégorisée en tant que banlieue proche du haut standing du Burkina Faso central) ;
- ✓ Les données des caractérisations utilisées ici ne prennent pas en compte les conditions climatiques et les rites culturels. Les ratios sont considérés identiques toute l'année, aussi bien en saison humide qu'en saison sèche.

#### DÉCOMPOSITION DES DÉCHETS MÉNAGERS

Au vu de la grande différence de proportion d'inertes dans les déchets ménagers des deux standings étudiés, il est judicieux de déterminer les pourcentages des autres types de déchets sans prendre en compte les inertes. Ceci, afin d'obtenir une vue d'ensemble des proportions des déchets qui sont véritablement « à traiter ».

**TABLEAU 4 : PROPORTION DU POURCENTAGE MASSE SANS PRENDRE EN COMPTE LES INERTES**

Type de déchet	Proportion masse (%) hors inertes	
	Ouagadougou	Pô
	Selon M. Proust (2001)	Selon S. Boxler (2013)
Fermentescibles	50	61
Papier/carton	11	8
Textiles	7	4
Plastiques mous	12	17
Complexes	5	Dans autres
Verres	3	2
Métaux ferreux & non-ferreux	5	2
Déchets électroniques & piles	2	Dans autres
Autres	5	6

La catégorie « autres » chez (S. Boxler, 2013) à Pô, regroupe essentiellement les complexes, les plastiques durs, les mèches, les déchets électroniques et les piles. Pour (M. Proust, 2001) à Ouagadougou, celle-ci regroupe les composites non-classés (mèches, plastiques durs...). Afin de correspondre à la même fraction des déchets ménagers de (S. Boxler, 2013), la proportion de la fraction «autres» chez (M. Proust, 2001) représenterait 12.6% de la masse des déchets « hors inertes ». Cette catégorie de déchet augmente quand le standing de vie évolue tout comme les papiers et cartons, les textiles, les verres et les métaux. Par contre, il est surprenant de constater que le taux de matières plastiques trouvé à Ouagadougou est inférieur à celui trouvé à Pô.

La matière fermentescible est la proportion la plus élevée « hors inertes » et ce, quels que soient le standing, avec tout de même une légère différence entre le moyen (Pô) et le haut standing (Ouagadougou). Il est possible de supposer que la différence dans ces valeurs s'explique par une différence dans l'alimentation, le haut standing étant caractérisé par une alimentation carnée plus importante alors que le moyen standing, par une alimentation dont les composantes principales sont des fruits et des légumes. Par conséquent, il est justifié de valoriser la matière organique par compostage comme cela se fait déjà actuellement. Mais il est également possible d'envisager une valorisation par méthanisation. Cette possibilité n'est pas étudiée dans le cadre de ce travail mais pourrait être le sujet d'une prochaine étude car la forte proportion de fractions fermentescibles contenues dans les déchets de ces deux villes peut suggérer une telle valorisation énergétique.

Compte tenu du caractère hétérogène des déchets et du taux d'inertes retrouvé dans ces derniers, il est relativement évident d'en déduire qu'une bonne valorisation dépend de la qualité du tri effectué en amont. Ainsi, dans la logique de la présente étude, un tri en deux catégories au moins (inertes d'un côté et reste de l'autre) est nécessaire pour une valorisation énergétique adéquate. De plus, dans l'esprit des scénarios X & X détaillés au chapitre X, un simple tri granulométrique permettrait dans un premier temps de séparer le sable/terre du reste des déchets et pourrait déjà être une première étape pour une valorisation énergétique.

Il est donc intéressant de déterminer les proportions de chaque typologie de déchet après tamisage de ces derniers. A Pô, 56% de la masse totale des inertes est constitué de fines et de très fines (respectivement, de taille inférieure à 20 mm et à 10 mm). Ainsi que 17% de la masse totale des fermentescibles sont des fines et des très fines (S. Boxler, 2013). Par conséquent, le tri granulométrique pris en compte dans cette étude consiste en un tamisage des déchets ménagers effectué avec des mailles de 20 mm de grandeur.

Concernant, la caractérisation des déchets de Ouagadougou selon (M. Proust, 2001), les fines et très fines n'ont pas été mis en évidence. Par conséquent, les valeurs d'une étude complémentaire ont été utilisées dans cette étude. Il s'agit de la caractérisation effectuée par (Tezanou et al., 2003) dont les valeurs sont retranscrites dans le Tableau 5 :

**TABLEAU 5 : PRINCIPALES COMPOSANTES EN % DE LA MASSE BRUTE DES GROS ET DES MOYENS**

Source	Lieu	Principales composantes en % de la masse brute des gros et des moyens			
		Fermentescibles	Papier/carton	Plastique	Textile
<i>Tezanou et al. (2003)</i>	Ouagadougou	41%	10%	11%	8%

Par conséquent, un taux de 16% de fines et très fines est retrouvé dans les déchets fermentescibles de Ouagadougou. Un taux qui est très semblable au taux trouvé à Pô (17%). De même, s'il est considéré un taux identique de fines et de très fines dans les inertes retrouvés dans les déchets de Ouagadougou (56%), les taux trouvés à partir de la caractérisation de (M. Proust, 2001) se trouvent être très proches de ceux trouvés par (Tezanou et al., 2003). Les résultats sont résumés dans le Tableau 6.

**TABEAU 6 : COMPOSANTES EN % DE LA MASSE BRUTE DES GROS ET DES MOYENS**

Type de déchet	Masse (%) des gros et des moyens (> 20 mm)	
	Ouagadougou	Pô
	Selon M. Proust (2001) & Tezanou et al. (2003)	Selon S. Boxler (2013)
Inertes	11	39
Fermentescibles	40	34
Papier/carton	10	5
Textiles	7	3
Plastiques mous	12	11
Complexes	5	Dans autres
Verres	3	2
Métaux ferreux & non-ferreux	5	1
Déchets électroniques & piles	2	Dans autres
Autres	5	5

Même sans prendre en compte les fines et très fines, un taux beaucoup plus élevé d'inertes est constaté à Pô en comparaison avec Ouagadougou. Ce qui rejoint les commentaires effectués précédemment. Par contre, le taux de fermentescibles, de carton, de plastique etc... se valent si on néglige totalement les inertes.

Suite à ce constat et toujours dans l'esprit des scénarios détaillés au chapitre précédent, le tri en amont peut être effectué en trois catégories ; les matières organiques (fermentescibles), autres déchets (papiers, carton, plastiques, métaux, verre...) et les inertes (les graviers, le sable...). Ainsi, les déchets à traiter après un tel tri seraient ; les papiers/cartons, les plastiques, les textiles, les métaux, les verres et tous autres déchets non classés (complexes, déchets électronique ...). Cela donne comme proportion sur la masse, les valeurs résumées dans le Tableau 7.

**TABEAU 7 : MASSE (%) « SANS LES INERTES & LES FERMENTESCIBLES »**

Type de déchet	Masse (%) « sans les inertes & les fermentescibles »	
	Ouagadougou	Pô
	Selon M. Proust (2001)	Selon S. Boxler (2013)
Papier/carton	21	20
Textiles	14	10
Plastiques mous	23	42
Complexes	10	Dans autres
Verres	7	6
Métaux ferreux & non-ferreux	10	5
Déchets électroniques & piles	4	Dans autres
Autres	11	17

En considérant le tri qui est entrepris actuellement aux différents Centres de tri mis en place par le CEAS, le tri en amont est effectué selon les catégories suivantes ; les matières organiques (fermentescibles), autres combustibles (papiers, carton, plastiques...) et les inertes et incombustibles (les graviers, le sable, le métal, le verre...).

Les matières organiques (fermentescibles) sont actuellement compostées, les autres combustibles (papiers, carton, plastiques...) sont mis en décharge et les inertes et incombustibles (les graviers, le sable, le métal, le verre...) sont stockés. Ainsi, les déchets à traiter après un tel tri seraient ; les déchets mis en décharge. Cela donne comme proportion sur la masse, les valeurs résumées dans le Tableau 8.

**TABEAU 8 : MASSE (%) « DÉCHETS MIS EN DÉCHARGE »**

Type de déchet	Masse (%) « déchets mis en décharge »	
	Ouagadougou	Pô
	<i>Selon M. Proust (2001)</i>	<i>Selon S. Boxler (2013)</i>
Papier/carton	26	22
Textiles	17	12
Plastiques mous	29	47
Complexes	14	Dans autres
Autres	14	19

En prenant en compte la filière de recyclage à la source relative aux plastiques mous, il faudra alors opter pour un tri en trois catégories : les matières organiques (fermentescibles), autres déchets (papiers, carton, métaux, verre...) et les inertes (les graviers, le sable...).

**TABEAU 9 : MASSE (%) « SANS LES INERTES & LES FERMENTESCIBLES »**

Type de déchet	Masse (%) « sans les inertes & les fermentescibles »	
	Ouagadougou	Pô
	<i>Selon M. Proust (2001)</i>	<i>Selon S. Boxler (2013)</i>
Papier/carton	27	34
Textiles	18	17
Complexes	13	Dans autres
Verres	9	10
Métaux ferreux & non-ferreux	13	9
Déchets électroniques & piles	5	Dans autres
Autres	15	30

**TABEAU 10 : MASSE (%) « SANS LES PLASTIQUES MOUS »**

Type de déchet	Masse (%) « sans les plastiques mous »	
	Ouagadougou	Pô
	<i>Selon M. Proust (2001)</i>	<i>Selon S. Boxler (2013)</i>
Papier/carton	37	42
Textiles	25	21
Complexes	18	Dans autres
Autres	20	37

A partir de la caractérisation physique des déchets des villes de Ouagadougou et de Pô effectuée ci-dessus, un modèle de la fraction combustible du déchet ménager de toutes ces variantes est proposé au chapitre suivant. Ensuite, une proposition de calcul du PCI sera faite.

## COMPOSITION PHYSICO-CHIMIQUE DES DÉCHETS

Afin de faciliter les études thermochimiques, il est souvent considéré que tout « combustible » est constitué des typologies de matière bien précises que sont le bois, le carton et le plastique. En effet, les propriétés physiques et chimiques du « combustible », en l'occurrence du déchet, sont déterminées par la composition de ses principaux constituants (bois, carton, plastiques). Ces derniers sont eux-mêmes constitués d'éléments chimiques. La composition chimique élémentaire de la fraction combustible du déchet se définit donc par déduction à partir des compositions élémentaires du bois, du carton et du plastique.

### LE BOIS

Le bois est constitué essentiellement de trois polymères : la cellulose, l'hémicellulose et la lignine. La répartition de ces différents constituants varie en fonction des essences des bois (BEAUMONT 1985) dans les proportions suivantes (Van de Velden M and al. 2009) :

- Cellulose (30 à 60 %)
- Lignine (15 à 30 %)
- Hémicellulose (20 à 35 %)

Au Burkina Faso, poussent différentes essences de bois tel que l'acacia, le sycomore, le palissandre, l'eucalyptus ou encore l'ébène, l'acajou et le baobab etc. Ces essences sont donc différentes de celles trouvées en Europe, mais du bois européen peut également se retrouver dans les déchets d'Afrique dû au mobilier ou autre objet importé d'Europe.

Il a été possible d'affirmer que le bois, qu'il soit européen ou africain, a une composition élémentaire relativement semblable et constante. En effet, il est constaté dans le Tableau 11 que la composition de l'eucalyptus (un bois typique du Burkina Faso), correspond plus ou moins à la composition élémentaire de certains bois européens, qu'ils soient tendres ou durs.

**TABLEAU 11 : COMPOSITION PONDÉRALE DU BOIS SELON SON ESSENCE (DUMON AND GELUS, 1982 ; NGOLLO MATEKE, 2010)**

Composants	Eucalyptus	Sapin (bois tendres)	Hêtre (bois durs)
	NGOLLO MATEKE, 2010	Dumon and Gelus, 1982	
Carbone (C)	50-53%	52.3%	51.64%
Hydrogène (H)	5-10%	6.3%	6.26%
Soufre (S)	0.08-0.2%	-	-
Oxygène (O)	38-42%	40.5%	41.45%
Azote (N)	0.1-0.3%	0.1%	-
Minéraux	1-1.5%	0.8%	0.65%

Les écarts de compositions sont donc relativement faibles entre les différentes essences de bois, mais la composition élémentaire du bois varie selon les auteurs. Le tableau suivant l'illustre pour le bois de sapin.

**TABLEAU 12 : COMPOSITION PONDÉRALE DU BOIS DE SAPIN SELON SON AUTEUR (DUMON AND GELUS, 1982 ; BEAUMONT, 1986)**

Composants	Dumon and Gelus (1982)	BEAUMONT (1986)
Carbone (C)	52.3%	50.9%
Hydrogène (H)	6.3%	5.8%
Oxygène (O)	40.5%	42.1%
Azote (N)	0.1%	0.2%
Soufre (S)	-	0.04%
Minéraux	0.8%	1.0%

La composition donnée par BEAUMONT (1986) est retenue dans le cadre de ce travail.

Ces différentes analyses élémentaires du bois (tableaux X-X) ont permis de déterminer que plus de 95 % de molécules le composant contient exclusivement des atomes de carbone, d'oxygène et d'hydrogène. Néanmoins, comme l'indique les Tableaux X-X, le bois contient d'autres composés comme du soufre, de l'azote et des minéraux.

Concernant l'analyse immédiate du bois, il est dit dans la littérature que le taux d'humidité dans le bois varie d'une essence à une autre, des conditions climatiques et du moment d'abatage. Généralement ce taux est < 18% pour le bois sec et > 30% pour le bois vert (Van de Velden M and al. 2009). De plus, le bois à la particularité d'avoir une haute teneur en matières volatiles, de l'ordre de 73 à 87 % et contient du carbone fixe à hauteur de 13 à 26 % (Leppa and Saarni 1982). Les cendres sont constituées majoritairement de sels minéraux et correspondent donc au taux de minéraux déterminé dans la littérature.

**TABLEAU 13 : ANALYSE IMMÉDIATE DU BOIS (LEPPA AND SAARNI 1982 ; VAN DE VELDEN M AND AL. 2009)**

Sources	Matière volatile	Carbone fixe	Taux de cendre	Humidité
<i>Leppa and Saarni 1982 &amp; Van de Velden M and al. 2009</i>	73-87%	13-26%	0.5-1.5%	< 18% (bois sec) > 30% (bois vert)

Le Pouvoir Calorifique Inférieur (P.C.I.) du bois est de l'ordre de 16 200 kJ.kg<sup>-1</sup> (Melhyas KPLE, 2015).

#### LE CARTON

Le carton, fabriqué à partir du bois, est constitué d'environ 90% de cellulose. L'hémicellulose et la lignine en forme près de 2% chacune. Les 6% restant sont constitués d'éléments minéraux divers. La cellulose est composée de carbone (environ 40% du carbone organique se retrouve dans la cellulose (Haluk, 1994)), d'hydrogène et d'oxygène.

Comme le montre le Tableau 14, la composition élémentaire du carton varie selon les auteurs. Ceci peut s'expliquer par les différents types de carton existants (carton assemblé par pression, carton moulé, carton ondulé) et selon l'essence des fibres de cellulose utilisés dans l'élaboration du carton.

**TABLEAU 14 : COMPOSITION ÉLÉMENTAIRE DU CARTON**

Sources	Éléments					
	C	H	S	O	N	Cendres
<i>Zhou, Yang et al. (2013)</i>	43%	5.4%	0.094%	41.7%	0.16%	9.6%
<i>T. Rogaume (2001)</i>	43.7%	5.8%	0.2%	44.9%	0.1%	5.3%

T. ROGAUME (2001) indique la composition moyenne observée dans la littérature. C'est cette dernière qui est retenue dans le cadre de ce travail.

La composition du carton est relativement proche de celle du bois. Sa grande différence réside dans la proportion de soufre et de cendres. De plus, le Tableau 14 montre la présence d'une infime quantité d'azote bien que ce composé ne figure pas dans la cellulose. Il est possible de déduire que l'azote provient alors de l'ajout d'adjuvants ou du procédé de fabrication. L'analyse immédiate du carton donne les compositions récapitulées dans le Tableau 15.

**TABLEAU 15 : ANALYSE IMMÉDIATE DU CARTON**

Source	Matière volatile	Carbone fixe	Taux de cendre	Humidité
<i>Zhou, Yang et al. 2013</i>	83.1%	7.3%	9.6%	5.4%

Le Pouvoir Calorifique Inférieur (P.C.I.) du carton est de l'ordre de 15 500 kJ.kg<sup>-1</sup> (Melhyas KPLE, 2015).

### LE POLYÉTHYLÈNE

Dans la fabrication des films, des sacs et des sachets plastiques, c'est le polyéthylène (PE) qui est très souvent utilisé. On distingue deux types de PE ; le polyéthylène haute densité (PEHD) et le polyéthylène basse densité (PEbD). Le type considéré dans la présente étude est uniquement le polyéthylène basse densité (PEbD). En effet, en raison du recyclage poussé du polyéthylène haute densité (PEHD : bouteilles), ce dernier se retrouve en infime quantité dans les déchets ménagers à traiter.

L'analyse élémentaire du PEbD n'est pas fréquente dans la littérature. Mais selon (Levendis and Ponagiotou 1991), le polyéthylène est composé de 85% de carbone et de 15% d'hydrogène. Ce qui correspond à l'analyse effectuée par (Melhyas KPLE) en 2015 dont les valeurs sont répertoriées dans le Tableau 16 ci-dessous.

**TABLEAU 16 : COMPOSITION ÉLÉMENTAIRE DU POLYÉTHYLÈNE BASSE DENSITÉ**

Source	C	H	N	O	S	Cl	Cendres
<i>Melhyas KPLE, 2015</i>	86.4%	13.6%	<0.1%	-	0.07%	0.01%	0

Et selon (Mark and Martin 1995), le PEbD est composé, en pourcentage massique, de 99% de matières volatiles et de 1% de carbone fixe. De plus, le polyéthylène basse densité a la particularité d'avoir un taux d'humidité très faible, de l'ordre de 2 à 3% (Lebourg, Maupin et al. 1994).

**TABLEAU 17 : ANALYSE IMMÉDIATE DU POLYÉTHYLÈNE**

Sources	Matière volatile	Carbone fixe	Taux de cendre	Humidité
<i>Mark and Martin, 1995 &amp; Lebourg, Maupin et al. 1994</i>	99%	1%	1%	2-3%

Le Pouvoir Calorifique Inférieur (P.C.I.) du PEbD est de l'ordre de 43 000 kJ.kg<sup>-1</sup> (Melhyas KPLE, 2015). Son pouvoir calorifique est donc 3 fois plus élevé que celui du carton (15 500 kJ.kg<sup>-1</sup>).

### DÉTERMINATION DE LA COMPOSITION TYPE DES DÉCHETS MÉNAGERS

Afin d'étudier les différents traitements thermochimiques possibles pour les déchets ménagers tel que caractérisés au chapitre X, il est nécessaire de déterminer une composition type. Cette dernière devra correspondre au plus proche possible de la composition des déchets ménagers étudiés. Pour le traitement thermochimique, cette composition type doit tenir compte de la part combustible des déchets ménagers.

Le modèle proposé ici se limitera donc à la fraction combustible des déchets ménagers des villes de Ouagadougou et de Pô. Diverses analyses chimiques et physiques ont montré que les composés complexes comme les fermentescibles et les papiers ont des propriétés très proches des éléments moins complexes tels que le bois et le carton (DUMONT et. GELUS, BEAUMONT).

Ainsi, les hypothèses suivantes ont été posées :

- ✓ Les déchets fermentescibles sont assimilés au bois car leur composition est proche de ce dernier (lignocellulosique) ;
- ✓ Les cartons et les papiers, fabriqués à partir des fibres végétales (et dont le carton est obtenu par agglomération de papier (T. Rogaume,2001)), sont assimilés au carton ;
- ✓ Les plastiques sont assimilés au polyéthylène basse densité (PEbD) ;
- ✓ Les complexes, constitués de mélanges de carton et de films plastiques (c'est le cas par exemple des emballages alimentaires en carton renforcées d'une couche interne en plastique), sont assimilés pour moitié au carton et pour moitié au PEbD ;
- ✓ Les textiles, pouvant être constitués de fibres végétales et animales ainsi que de fibres synthétiques, sont assimilés pour moitié au carton et pour moitié au PEbD ;
- ✓ Les composites non classés (autres) sont assimilés pour moitié au carton et pour moitié au PEbD ;
- ✓ Les inertes sont constitués des gravats, de débris de nettoyage des habitations (cailloux, sable, etc.). Ils ne sont pas pris en compte ici de par leur nature incombustible (en effet, ils ne participent pas aux réactions chimiques qui ont lieu pendant l'incinération des déchets).
- ✓ Les métaux et le verre ne sont pas pris en compte car ce sont des inertes thermiquement parlant.

A partir de ces hypothèses, les répartitions massiques suivantes sont obtenues :

**TABLEAU 18 : REPARTITION MASSIQUE DES TYPES DE DÉCHETS SELON LES COMPOSANTES COMBUSTIBLES « BOIS, CARTON, PEbD »**

**Pour Ouagadougou :**

Type de déchet	Assimilation au...			
	Bois	Carton	PEbD	Total
Inertes	-	-	-	19.5%
Fermentescibles	39.5%	-	-	39.5%
Papier/carton		8.6%		8.6%
Textiles		2.9%	2.9%	5.8%
Plastiques mous	-	-	9.6%	9.6%
Complexes		2%	2%	4%
Verres	-	-	-	2.7%
Métaux ferreux & non-ferreux	-	-	-	4.2%
Déchets électroniques & piles	-	-	-	1.6%
Autres	-	2.3%	2.3%	4.5%
<b>Total</b>	<b>39.5%</b>	<b>15.8%</b>	<b>16.8%</b>	<b>100%</b>

Pour Pô :

Type de déchet	Assimilation au...			
	Bois	Carton	PEbD	Total
Inertes	-	-	-	56.9%
Fermentescibles	26.3%	-	-	26.3%
Papier/carton	-	3.3%	-	3.3%
Textiles	-	0.9%	0.9%	1.7%
Plastiques mous	-	-	7.1%	7.1%
Verres	-	-	-	1%
Métaux ferreux & non-ferreux	-	-	-	0.9%
Autres	-	1.4%	1.4%	2.8%
<b>Total</b>	<b>26.3%</b>	<b>5.6%</b>	<b>9.4%</b>	<b>100%</b>

Il est maintenant nécessaire d'établir le rapport de la masse de chaque constituant combustible sur la masse totale combustible.

TABLEAU 19 : PROPORTIONS PAR RAPPORT À LA FRACTION COMBUSTIBLE

Ouagadougou	Bois	Carton	PEbD	Total
Masse (%)	39.5	15.8	16.8	72.1
Proportion (%)	54.8	21.9	23.3	100

Pô	Bois	Carton	PEbD	Total
Masse (%)	26.3	5.6	9.4	41.3
Proportion (%)	63.7	13.6	22.7	100

Le Tableau 20 fait la synthèse des compositions types utilisés par certains auteurs dans des études semblables afin de les comparer à celles de la présente étude.

TABLEAU 20 : COMPOSITION DE DIFFÉRENTS MÉLANGES TYPES

Composition	Ouagadougou	Ouagadougou	Présente étude	
	Nzhiou, 2005	Hamidou, 2005	Ouagadougou	Pô
Bois [%]	53	54	55	64
Carton [%]	25	24	22	13
PEbD [%]	22	22	23	23
Total [%]	100	100	100	100

Les résultats obtenus à Ouagadougou dans la présente étude sont très proche de ceux obtenus par (Nzhiou, 2005) et (Hamidou, 2005). Il est donc possible d'affirmer que les hypothèses posées ci-dessus sont censées.

Par contre, l'analyse du Tableau 20 montre que la composition type des déchets de la ville de Pô démontre une quantité de bois plus élevée que celle de la ville de Ouagadougou et des quantités plus faibles en carton. Ces différences s'expliquent facilement par le fait que les déchets de la ville de Pô ont une proportion plus élevée de matières putrescibles. En effet, le taux élevé de fermentescibles fait baisser les taux des autres constituants. Pour rappel, les déchets de Pô possèdent un taux supérieur de plastique et un taux inférieur de papier/carton en termes de pourcentage sur la masse brute totale de déchet « hors inertes ».

Ainsi, le déchet type de Ouagadougou se compose de 55 % de bois, 22 % de carton et 23 % de plastique. Et celui de Pô de 64 % de bois, 13 % de carton et 23 % de plastique.

De plus, deux mélanges combustibles supplémentaires sont étudiés, l'un tenant compte de la modification de la composition du déchet par compostage des fermentescibles (mélange 2) et l'autre, par recyclage des plastiques (mélange 3). La composition massique de chacun de ces trois mélanges est donnée dans le Tableau 21 ci-dessous.

TABLEAU 21

Lieu	Mélange 1			Mélange 2			Mélange 3		
	Bois	Carton	PEbD	Bois	Carton	PEbD	Bois	Carton	PEbD
Ouagadougou	55%	22%	23%	0%	49%	51%	63%	25%	12%
Pô	64%	13%	23%	0%	36%	64%	77%	16%	7%

### COMPOSITION ÉLÉMENTAIRE ET ANALYSE IMMÉDIATE DU DÉCHET TYPE

Comme précisé précédemment et tout comme (Nzhiou 2005), la composition de bois retenue pour la caractérisation du déchet type dans la présente étude est celle de (Beaumont 1985). Celle du carton est celle de (T. Rogaume, 2001) et celle du PEbD est celle de (Melhyas KPLE, 2015). La composition élémentaire de ces trois principaux constituants des déchets ménagers est redonnée par le Tableau 22.

TABLEAU 22 : ANALYSE ÉLÉMENTAIRE DES CONSTITUANTS (BEAUMONT 1985 ; T. ROGAUME 2001 ; MELHYAS KPLE 2015)

Nature du combustible	C [%]	H [%]	N [%]	O [%]	S [%]	Cl [%]	Cendres [%]
Bois	50.9	5.76	0.2	42.1	0.04	0	1
Carton	43.7	5.8	0.2	44.9	0.1	0	5.3
Polyéthylène	86.4	13.6	0.1	0	0.07	0.01	0

L'analyse du Tableau 22 montre que les différents constituants du déchet type que sont le bois, le carton et le plastique sont essentiellement constitués d'atomes de carbone, d'hydrogène et d'oxygène.

La composition élémentaire du déchet type se déduit de celles de ses constituants et de leurs proportions respectives comme le montre les Tableaux 23.

TABLEAU 23 : COMPOSITION ÉLÉMENTAIRE DU MÉLANGE 1

Ouagadougou	C [%]	H [%]	N [%]	O [%]	S [%]	Cl [%]	Cendres [%]	Total [%]
Bois	28	3.2	0.1	23.2	0.02	0	0.6	55
Carton	9.6	1.3	0.04	9.9	0.02	0	1.2	22
Plastique	19.9	3.1	0.01	0	0.02	0	0	23
<b>Total [%]</b>	<b>57.5</b>	<b>7.6</b>	<b>0.2</b>	<b>33.1</b>	<b>0.1</b>	<b>0</b>	<b>1.8</b>	<b>100</b>

Pô	C [%]	H [%]	N [%]	O [%]	S [%]	Cl [%]	Cendres [%]	Total [%]
Bois	32.6	3.7	0.13	26.9	0.03	0	0.6	64
Carton	5.7	0.8	0.03	5.8	0.01	0	0.7	13
Plastique	19.9	3.1	0.01	0	0.02	0	0	23
<b>Total [%]</b>	<b>58.1</b>	<b>7.6</b>	<b>0.2</b>	<b>32.8</b>	<b>0.1</b>	<b>0</b>	<b>1.3</b>	<b>100</b>

Les compositions chimiques des deux types de déchets étudiés se trouvent être quasiment identiques. Une différence relativement conséquente est constatée uniquement dans le taux de cendres. Ceci est dû au taux supérieur de carton trouvé dans les déchets de Ouagadougou en comparaison de celui trouvé à Pô.

TABLEAU 24 : COMPOSITION ÉLÉMENTAIRE DU MÉLANGE 2

Ouagadougou	C [%]	H [%]	N [%]	O [%]	S [%]	Cl [%]	Cendres [%]	Total [%]
Carton	21.4	2.8	0.1	22	0.05	0	2.6	49
Plastique	44.1	6.9	0	0	0.04	0	0	51
<b>Total [%]</b>	<b>65.5</b>	<b>9.8</b>	<b>0.1</b>	<b>22.0</b>	<b>0.1</b>	<b>0</b>	<b>2.6</b>	<b>100</b>

Pô	C [%]	H [%]	N [%]	O [%]	S [%]	Cl [%]	Cendres [%]	Total [%]
Carton	15.7	2.1	0.1	16.2	0.04	0	1.9	36
Plastique	55.3	8.7	0	0	0.05	0	0	64
<b>Total [%]</b>	<b>71</b>	<b>10.8</b>	<b>0.1</b>	<b>16.2</b>	<b>0.1</b>	<b>0</b>	<b>1.9</b>	<b>100</b>

TABLEAU 25 : COMPOSITION ÉLÉMENTAIRE DU MÉLANGE 3

Ouagadougou	C [%]	H [%]	N [%]	O [%]	S [%]	Cl [%]	Cendres [%]	Total [%]
Bois	32.1	3.6	0.1	26.5	0.025	0	0.6	63
Carton	10.9	1.5	0.1	11.2	0.025	0	1.3	25
Plastique	10.4	1.6	0	0	0.008	0	0	12
<b>Total [%]</b>	<b>53.4</b>	<b>6.7</b>	<b>0.2</b>	<b>37.7</b>	<b>0.1</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>100</b>

Pô	C [%]	H [%]	N [%]	O [%]	S [%]	Cl [%]	Cendres [%]	Total [%]
Bois	39.2	4.4	0.2	32.4	0.031	0	0.8	77
Carton	7	0.9	0	7.2	0.016	0	0.8	16
Plastique	6	1	0	0	0.005	0	0	7
<b>Total [%]</b>	<b>52.2</b>	<b>6.3</b>	<b>0.2</b>	<b>39.6</b>	<b>0.1</b>	<b>0</b>	<b>1.6</b>	<b>100</b>

Sachant que la masse atomique de ces composants est :

TABLEAU 26 : MASSE ATOMIQUE DES PRINCIPAUX COMPOSANT DU DÉCHET TYPE

	C	H	N	O	S
Masse atomique	12	1	14	16	32

**TABEAU 27 : NOMBRE DE MOLES D'ATOMES DES CONSTITUANTS DU DÉCHET TYPE**

	Lieu	C	H	N	O	S
Mélange 1	<i>Ouagadougou</i>	4.79	7.6	0.007	1.38	0.003
	<i>Pô</i>	4.84	7.6	0.007	1.01	0.003
Mélange 2	<i>Ouagadougou</i>	5.46	9.8	0.014	2.36	0.003
	<i>Pô</i>	5.92	10.8	0.007	1.01	0.003
Mélange 3	<i>Ouagadougou</i>	4.45	6.7	0.014	2.36	0.003
	<i>Pô</i>	4.35	6.3	0.014	2.48	0.003

Au vu de la forte similitude des valeurs obtenues, la formule « brute » de la fraction combustible du déchet ménager dans le mélange 1, qu'il provienne du moyen ou du haut standing, peut être approximée ainsi :  $C_{4.8} H_{7.6} O_{1.2} N_{0.007} S_{0.003}$

Celle du mélange 2 :  $C_{5.7} H_{10.3} O_{1.2} N_{0.01} S_{0.003}$  et celle du mélange 3 :  $C_{4.4} H_{6.5} O_{2.4} N_{0.014} S_{0.003}$

Les formules brutes des mélanges 1 et 3 sont relativement semblables. Par contre, une grande variance en hydrogène est constatée dans la formule brute du mélange 2.

#### DIAGRAMME TRIANGULAIRE D'INCINÉRABILITÉ

Le présent travail vise à décrire les caractéristiques de choix des méthodes de traitement et « parmi les différentes techniques de traitement des déchets (stockage, compostage, incinération, pyrolyse, méthanisation...), l'incinération se révèle une des plus pertinente et performante et apparaît le plus souvent comme incontournable » (Nzihou et al., 2008). En effet, en plus de permettre une forte réduction des déchets ; jusqu'à 70 % de leur masse et 90% de leur volume (PANTALONI et TADRIST, 1996), elle permet la destruction des germes pathogènes et dangereux (Maes, 1992).

Les déchets ménagers sont constitués de matières combustibles, de matières inertes (métaux, sable, ...) et d'eau tel que :

- Une fraction combustible composée principalement de carbone (C) et d'hydrogène (H) ;
- Une fraction inerte regroupant les matières minérales contenues dans les déchets (verre, métaux, terre,...) et celles qui sont formées lors de la combustion ;
- L'humidité qui est un paramètre déterminant dans la combustion à l'air.

La proportion et la nature de ces trois fractions définit l'incinérabilité des déchets. En effet, de par ses caractéristiques, l'incinération ne s'applique qu'à des déchets respectant certaines propriétés, telles que :

- un taux de fraction combustible > 25 % ;
- un taux d'inertes < 55 % ;
- un taux d'humidité < 50 % ;
- et un Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) suffisamment élevé.

Afin de déterminer les différents taux (combustible, inertes et d'humidité) correspondant aux déchets ménagers étudiés, les hypothèses suivantes ont été posées sur la base des analyses immédiates des constituants :

- ✓ Les déchets fermentescibles (assimilés au bois) sont considérés à 70% de fraction combustible et 30% de taux d'humidité ;
- ✓ Les cartons et les papiers sont considérés à 80% de fraction combustible, 10% d'inertes et 10% d'humidité ;
- ✓ Les plastiques sont considérés comme 100% combustibles ;

- ✓ Les complexes, constitués de mélanges de carton et de films plastiques, sont considérés à 90% combustibles et 10% inertes ;
- ✓ Les composites non classés (autres) et les textiles sont considérés à 70% combustibles, 20% inertes et avec un taux de 10% d'humidité ;
- ✓ Les inertes, les métaux et le verre sont considérés à 100% de fraction inertes ;

Le Tableau 28 regroupe les paramètres de combustion des déchets ménagers des villes de Ouagadougou et de Pô. Ces paramètres ont été déterminés à partir des hypothèses posées ci-dessus et en considérant les éléments combustibles et les éléments inertes déterminés précédemment. Les valeurs sont arrondies au 5<sup>ème</sup>.

**TABLEAU 28 : PARAMÈTRE DE COMBUSTION DES DÉCHETS MÉNAGERS**

Scénario III	Ouagadougou		Pô	
	Sans fines	Avec fines	Sans fines	Avec fines
Fraction combustible	60%	55%	45%	30%
Proportion inerte	25%	30%	45%	60%
Proportion d'eau	15%	15%	10%	10%

Scénario II & IV	Ouagadougou		Pô	
	Sans inertes & fermentescibles	Mis en décharge	Sans inertes & fermentescibles	Mis en décharge
Fraction combustible	70%	85%	80%	90%
Proportion inerte	25%	10%	15%	5%
Proportion d'eau	5%	5%	5%	5%

Sans les plastiques mous dans les mélanges :

Scénario I	Ouagadougou		Pô	
	Sans fines	Avec fines	Sans fines	Avec fines
Fraction combustible	55%	50%	40%	30%
Proportion inerte	30%	35%	50%	65%
Proportion d'eau	15%	15%	10%	5%

Scénario I	Ouagadougou		Pô	
	Sans inertes & fermentescibles	Mis en décharge	Sans inertes & fermentescibles	Mis en décharge
Fraction combustible	55%	75%	65%	80%
Proportion inerte	35%	15%	30%	15%
Proportion d'eau	10%	10%	5%	5%

La Figure 7 illustre le diagramme triangulaire d'incinérabilité des déchets ménagers.

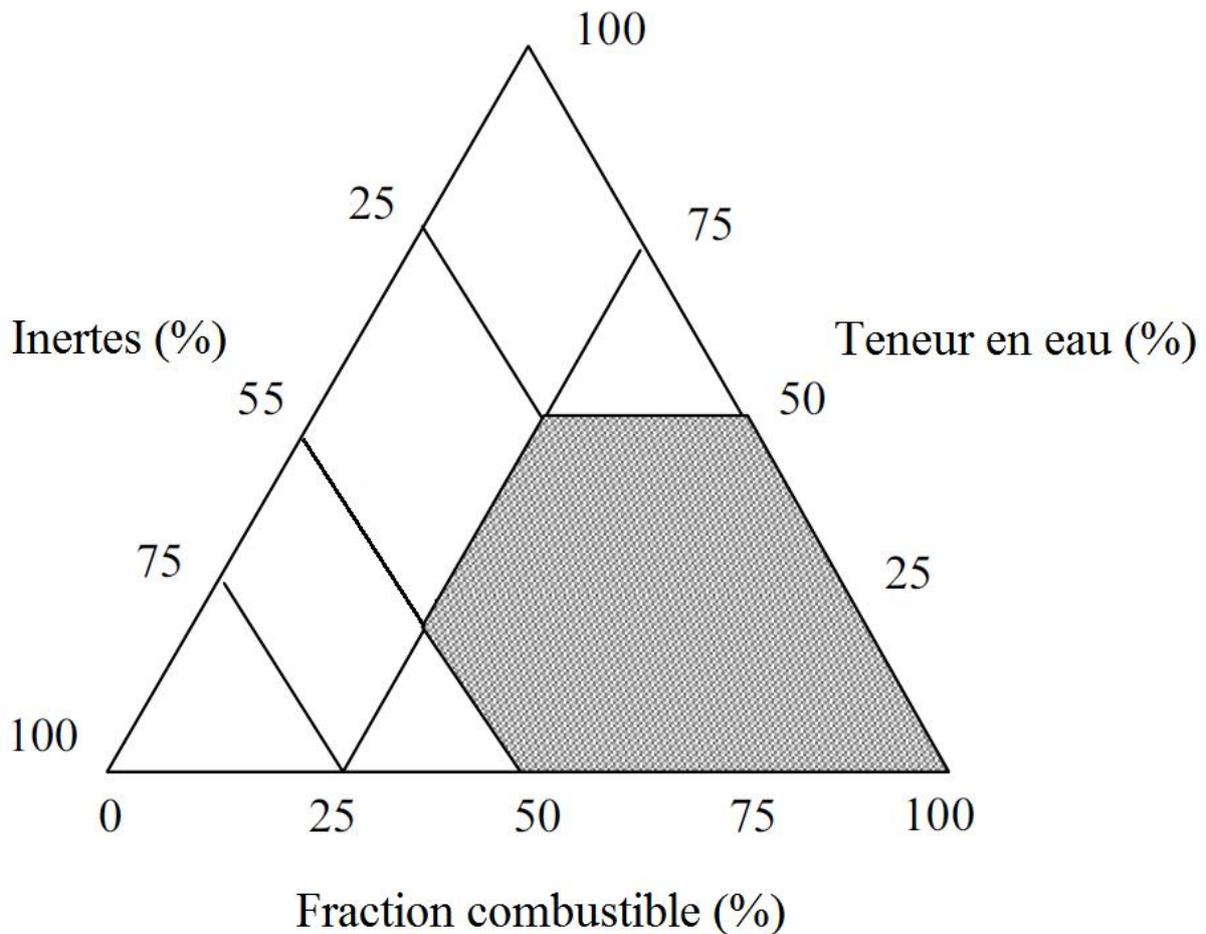


FIGURE 7 : DIAGRAMME TRIANGULAIRE D'INCINÉRABILITÉ

Il ressort de ce graphique que presque tous les points représentatifs de la composition des déchets ménagers sont inscrits dans la zone de combustion (fraction combustible  $\geq 25\%$ , inerte  $\leq 55\%$  et teneur en eau  $\leq 50\%$ ), par conséquent, les déchets de Ouagadougou et de Pô satisfont aux conditions nécessaires à leur dégradation thermo-chimique. Par contre, la présence des inertes (principalement le sable et autres combustibles) représente un frein pour la dégradation thermo-chimique des déchets comme il est constaté principalement à Pô. En effet, les mélanges prenant en compte les fines de Pô sont hors zone combustible selon le diagramme triangulaire d'incinérabilité. Mais les mélanges avec les fines de Ouagadougou se trouvent, quant-à-eux, dans la zone. En effet, bien que le taux d'inertes soit tout de même important, ce qui devrait conduire à un relativement faible pouvoir calorifique inférieur (PCI), cette fraction combustible remplit néanmoins les conditions d'incinérabilité.

Par conséquent, qu'importe le tri effectué en amont, les déchets ménagers sont incinérables. Un tamisage suffirait comme unique préparation des déchets en amont du traitement par incinération. En effet, si on sépare les « fines » du reste des déchets, ces derniers sont bien situés dans la zone d'incinérabilité.

L'incinération permettrait de réduire la quantité de déchets à stocker dans les CET. Toutefois, cette dernière n'est pas viable sur le plan industriel. En effet, les incinérateurs coûtent chers. Afin de payer les coûts liés à l'incinération, elle devrait au mieux être couplée avec une valorisation énergétique. Cette valorisation énergétique est d'autant plus bénéfique qu'il semblerait que les déchets ménagers aient un fort pouvoir calorifique. Ce dernier est déterminé au chapitre suivant.

### POUVOIR CALORIFIQUE INFÉRIEUR (PCI)

La connaissance du pouvoir calorifique inférieur (PCI) d'un déchet est importante car elle est l'un des paramètres déterminant l'incinérabilité de ce dernier. Le PCI du modèle de la fraction combustible des déchets ménagers de Ouagadougou et de Pô a donc été déterminé théoriquement dans le cadre de cette étude.

Sachant que le Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) d'un combustible ne dépend que de sa composition chimique, la méthode de calcul du PCI utilisée dans cette étude fait appel à des formules basées sur l'analyse immédiate des déchets (C. G. Jung, 2007).

En effet, c'est le pouvoir calorifique de la matière organique qui donne au déchet sa valeur énergétique. Les trois données principales à prendre en compte pour la détermination du PCI sont :

- La teneur en Matière Sèche (MS) du déchet brut ;
- La teneur en Matière Organique (MO) du déchet brut ;
- La teneur en humidité (W) du déchet brut ;

La teneur en MS peut être déduite ainsi :  $MS = 100 - W$ .

La teneur en humidité correspond à la teneur en eau déterminée au chapitre précédent (  $W = \text{teneur en eau } [\%]$ ).

Et la teneur en MO correspond à la fraction combustible également déterminée au chapitre précédent (  $MO = \text{fraction combustible } [\%]$ ).

Il est dès lors facile de calculer le PCI du déchet brut ( $PCI_{brut}$ ) en fonction de ces trois paramètres :

$$PCI_{BRUT} = (PCI_{MO} * MO) * MS - (40W) \quad \text{EN MJ/KG} \quad \text{ÉQUATION 1}$$

Le taux d'humidité est multiplié par 40 afin de tenir compte de l'énergie de vaporisation de l'eau (40 MJ/kg).

$PCI_{MO}$  correspond au pouvoir calorifique inférieur de la matière organique. Il a été estimé à 30 MJ/kg.

Les valeurs obtenues pour chaque typologie de déchet sont résumées dans le Tableau 29 :

**TABLEAU 29 :  $PCI_{BRUT}$  DES DÉCHETS MÉNAGERS DE OUAGADOUGOU ET DE PÔ**

$PCI_{brut}$ [MJ/kg]	Ouagadougou	Pô
Avec fines	8	4.1
Sans fines	9.3	8.2
Sans inertes & fermentescibles	17.9	20.8
Mis en décharge	22.2	23.6

Sans les plastiques mous dans les mélanges :

$PCI_{brut}$ [MJ/kg]	Ouagadougou	Pô
Avec fines	6.8	6.6
Sans fines	8	6.8
Sans inertes & fermentescibles	10.9	16.5
Mis en décharge	16.3	20.8

Selon (Ngnikam, 2002), si le PCI des déchets ménagers est inférieur ou égal à  $5,016 \text{ MJ.kg}^{-1}$ , les déchets ménagers ne peuvent pas être incinérés sans apport extérieur d'énergie. Par conséquent, la présence des inertes au sein des déchets à incinérer est décidément à éviter. En effet comme prévu, la présence d'inertes baisse considérablement le PCI du déchet. Le fait de séparer les fines permet d'augmenter quelque peu ce dernier, mais il reste faible en comparaison du PCI des déchets sans aucune présence d'inertes. Il est également constaté que la présence de plastique permet d'augmenter le PCI et comme l'a souligné Aloumeine (2006), les déchets ménagers préconisant un PCI élevé sont généralement constitués d'un taux de plastiques élevé avec un faible taux de fermentescibles. En effet, l'absence de matière fermentescible permet un PCI élevé puisque le taux d'humidité des déchets ménagers est faible.

Les résultats de PCI ci-dessus confirme les précédents résultats obtenus via le diagramme d'incinérabilité. Par conséquent, les déchets ménagers des villes secondaires du Burkina Faso possèdent un potentiel énergétique suffisant pour être incinéré. L'incinération peut donc être une option de traitement intéressante pour le Burkina Faso, mais cette option serait encore plus intéressante s'il y a une quelconque récupération d'énergie en sortie.

La technologie d'incinération dépend de la capacité de traitement (en t/h) et du PCI du déchet (en MJ/kg). Il est donc maintenant possible de déterminer les technologies de traitement remplissant ces conditions. En effet, La figure 8 donne les conditions d'exploitation, selon le PCI, pour différentes technologies d'incinération.

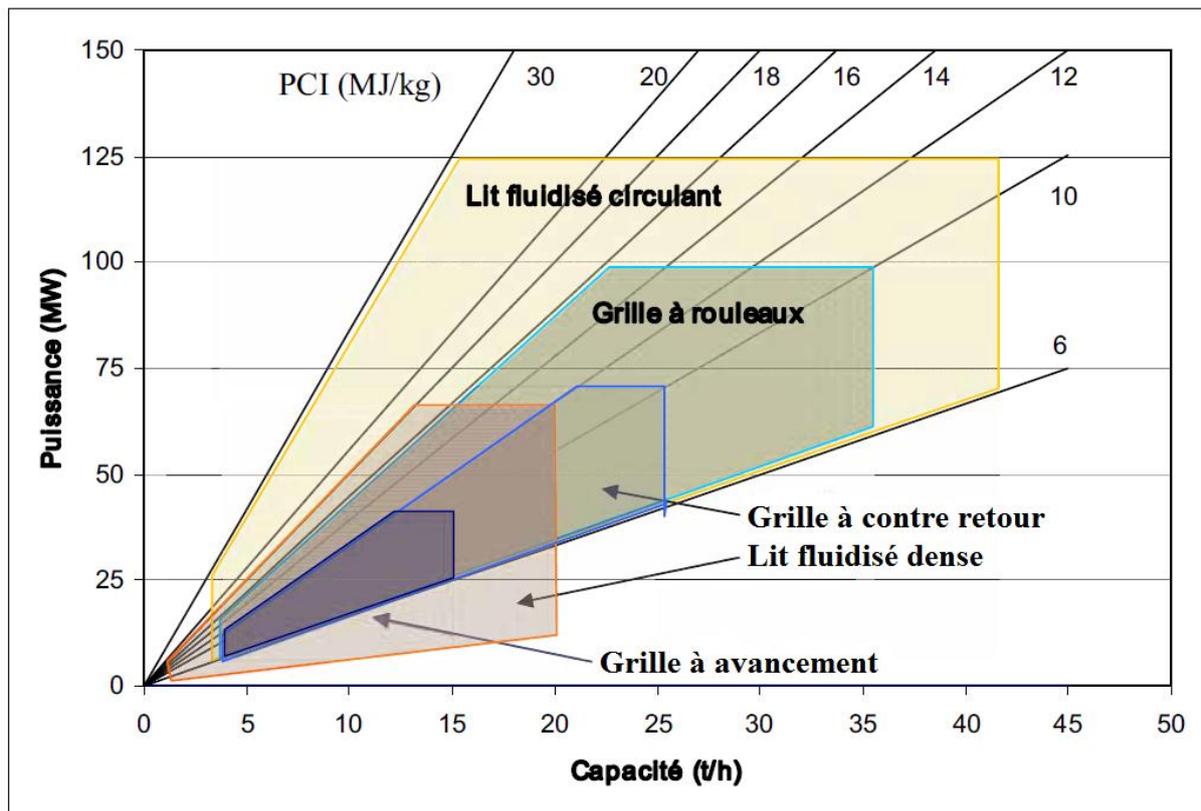


FIGURE 8 : CONDITIONS D'EXPLOITATION ET TECHNOLOGIES D'INCINÉRATION DISPONIBLES (LURGI ENGINEERING)

Comme constaté sur la figure ci-dessus, plusieurs technologies sont disponibles pour l'incinération des déchets ménagers, mais la technique de combustion sur grille est la mieux adaptée dans le cas de figure du Burkina Faso. En effet, les techniques telles que celle du lit fluidisé demandent une préparation du déchet en amont. Evidemment, cela a un coût non négligeable. Les déchets ménagers, de nature hétérogène, doivent obligatoirement être triés et broyés en amont. De plus, les métaux ferreux doivent être retirés par électro-aimant et les objets lourds et légers, séparés par tri aérialique.

Par contre, lors de la pyrolyse d'un déchet ménager, un gaz contenant les matières volatiles et l'eau est produit ainsi qu'une phase solide contenant le carbone fixe (CF) et les matières minérales et métaux (MM). Il est par conséquent possible d'en déduire les proportions de gaz et de solide ainsi :

$$\text{Gaz} = \text{MV} + \text{W} \quad \text{et} \quad \text{Solide} = \text{CF} + \text{MM}$$

Les matières minérales et métaux (MM) correspondent à la fraction d'inertes déjà déterminée ci-dessus. Le taux d'humidité (W) a également été déterminé ci-dessus. Maintenant, il reste à définir les fractions de Matière Volatile (MV) et de Carbone Fixe (CF). Ces dernières composent la Matière Organique (MO). En effet :

$$\text{MO} = \text{MV} + \text{CF}$$

Connaissant la fraction combustible et selon l'analyse immédiate des constituants principaux, il est possible de déterminer le taux de matière volatile (MV) et de carbone fixe (CF) de chaque typologie des déchets ménagers étudiés.

TABLEAU 30 : MATIÈRE VOLATILE ET CARBONE FIXE DES DÉCHETS MÉNAGERS

Scénario III	Ouagadougou		Pô	
	Sans fines	Avec fines	Sans fines	Avec fines
Matière volatile	50%	45%	40%	25%
Carbone fixe	10%	10%	5%	5%
<b>Fraction combustible</b>	<b>60%</b>	<b>55%</b>	<b>45%</b>	<b>30%</b>

Scénarii II & IV	Ouagadougou		Pô	
	Sans inertes & fermentescibles	Mis en décharge	Sans inertes & fermentescibles	Mis en décharge
Matière volatile	65%	80%	75%	85%
Carbone fixe	5%	5%	5%	5%
<b>Fraction combustible</b>	<b>70%</b>	<b>85%</b>	<b>80%</b>	<b>90%</b>

Sans les plastiques mous dans les mélanges :

Scénario I	Ouagadougou		Pô	
	Sans fines	Avec fines	Sans fines	Avec fines
Matière volatile	45%	40%	30%	25%
Carbone fixe	10%	10%	10%	5%
<b>Fraction combustible</b>	<b>55%</b>	<b>50%</b>	<b>40%</b>	<b>30%</b>

Scénario I	Ouagadougou		Pô	
	Sans inertes & fermentescibles	Mis en décharge	Sans inertes & fermentescibles	Mis en décharge
Matière volatile	50%	70%	60%	75%
Carbone fixe	5%	5%	5%	5%
<b>Fraction combustible</b>	<b>55%</b>	<b>75%</b>	<b>65%</b>	<b>80%</b>

Le taux de matières volatiles (MV) correspond à la fraction qui devient volatile en brûlant le déchet à 550°C. Cette indication est très importante dans le choix de la filière de traitement des déchets ménagers. En effet, une faible valeur de MV présente aucun intérêt pour l'incinération si une valorisation énergétique est souhaitée.

Ainsi, les proportions de gaz et de solide obtenus après un traitement par pyrolyse sont les suivantes :

TABLEAU 31 : PROPORTION DE GAZ ET DE SOLIDE APRÈS TRAITEMENT PAR PYROLYSE

Scénario III	Ouagadougou		Pô	
	Sans fines	Avec fines	Sans fines	Avec fines
Gaz	65%	60%	50%	35%
Solide	35%	40%	50%	65%
<b>Total</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>

Scénarii II & IV	Ouagadougou		Pô	
	Sans inertes & fermentescibles	Mis en décharge	Sans inertes & fermentescibles	Mis en décharge
Gaz	70%	85%	80%	90%
Solide	30%	15%	20%	10%
<b>Total</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>

Sans les plastiques mous dans les mélanges :

Scénario I	Ouagadougou		Pô	
	Sans fines	Avec fines	Sans fines	Avec fines
Gaz	60%	55%	40%	30%
Solide	40%	45%	60%	70%
<b>Total</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>

Scénario I	Ouagadougou		Pô	
	Sans inertes & fermentescibles	Mis en décharge	Sans inertes & fermentescibles	Mis en décharge
Gaz	60%	80%	65%	80%
Solide	40%	20%	35%	20%
<b>Total</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>

Les gaz condensables issus de la pyrolyse peuvent être condensés en huile alors que les gaz non condensables peuvent être recyclés directement dans l'alimentation du réacteur de pyrolyse.

## L'ÉTAT ACTUEL DES FILIÈRES THERMIQUES

Il est évident que la filière thermique est plus importante dans les pays du nord que dans ceux du sud. Deux raisons ont été avancées pour expliquer cette situation :

- La nécessité du chauffage urbain (il est de plus, séduisant et intéressant de chauffer en brûlant les déchets) ;
- La nécessité d'éliminer la quantité astronomique de déchet dont l'Occident a été inondé bien avant l'Afrique et ce, en évitant les rejets systématiques liés à l'incinération (cette filière dispose depuis longtemps du traitement des fumées).

## L'INCINÉRATION

Pour l'incinération, technologie inexistante au Burkina Faso (seul l'incinération sauvage est pratiquée), il est possible de déterminer pourquoi la mise en place de cette technologie en Afrique de l'Ouest n'a pas été effectuée. Les principaux freins sont :

- L'état de la technologie disponible actuellement. En effet, seul des technologies de grande capacité sont disponibles sur le marché, à un coût élevé. Le Burkina Faso ne s'est penché que récemment sur la gestion et le traitement des déchets, par conséquent, la filière de ramassage est trop jeune actuellement pour obtenir les quantités de déchets demandées par ces installations ;
- L'absence de possibilité de valorisation de l'énergie obtenue. L'Afrique, n'ayant que très peu de besoin en chaleur, n'a jamais ressenti le besoin de se pencher sur des technologies d'incinération coûteuses s'il n'y a aucun « retour sur investissement » ;
- La gestion des traitements en aval (fumées, mâchefers...) qui coûte cher et qui demande des connaissances techniques poussées.

Par conséquent, dans l'état actuel de la gestion des déchets effective au Burkina Faso, une chambre de combustion en terre et briques suffirait puisqu'il est préconisé de diminuer uniquement le volume des déchets à mettre en décharge (et non de valoriser énergétiquement les déchets via l'incinération).

Puisque les technologies actuelles ne répondent pas aux souhaits et contexte du Burkina Faso, l'état des lieux de la filière sera bref. En effet, la plus petite usine d'incinération complète (avec traitement des fumées et valorisation énergétique) existante actuellement sur le marché se trouve être, le four oscillant de Laurent Bouillet.

### Four oscillant de forme cylindro-conique :

Le four oscillant de petite capacité est un procédé inventé par Laurent Bouillet. Les déchets sont introduits par un vérin-poussoir dans la partie cylindrique du four où ils sont réchauffés et séchés puis brûlés. Ils progressent dans le four vers la partie conique au fur et à mesure que leur volume se réduit. Les fumées sont évacuées vers une chambre de tranquillisation où leur température est homogénéisée et où une partie des poussières et des grosses particules sont déjà récoltées avant le passage dans l'électrofiltre. La chaleur des fumées produit de la vapeur d'eau qui, au sortir d'une chaudière alimente un turboalternateur. L'électricité ainsi produite permet de couvrir en partie les besoins de l'installation. Mais pour faciliter l'allumage du four et soutenir éventuellement la combustion lorsque les produits à incinérer ont un pouvoir calorifique trop faible, ce four est équipé d'un brûleur capable de débiter 180, 360 ou 540 l. de fuel par heure.

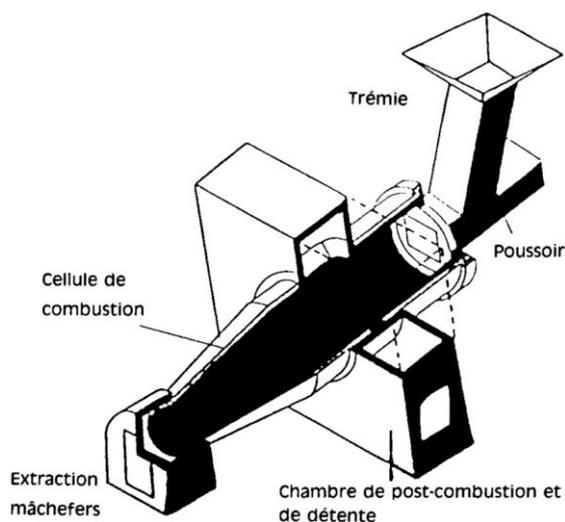


FIGURE 9 : FOUR OSCILLANT DE LAURENT BOUILLET

TABLEAU 32 : CARACTÉRISTIQUES DU FOUR « LAURENT BOUILLET »

Exploitations / Exploitants	Technique	Chauffé par	Nature des déchets traités	Capacité [t/h]	Remarques éventuelles
Industrielles de petite capacité	Four oscillant	Brûleur à pétrole	Vrac	4-8	La cellule de combustion mesure 13,70 m de long et de 3,20 m de diamètre.

## LA PYROLYSE ET LA GAZÉIFICATION

La pyrolyse / gazéification en est encore au stade du développement pour le traitement des déchets ménagers à capacité limitée. En revanche en Occident, notamment en Europe, cette technologie présente déjà des unités qui ont atteint le stade industriel. Cette technologie a été développée dans les années 80 (Technologie Kiener) et développée par Noell, Technip, Babcock, Mitsui (anciennement Siemens), PKA, etc... Dans les développements actuels, c'est Technip qui possède la plus grande expérience avec de nombreux fours utilisés pour le traitement de déchets très divers.

Il existe également des technologies de petite capacité, tel que le brûleur contrôlé de Jean Dispos, la technologie « Biogreen » d'ETIA et le navire prototype « Ulysse » de Plastic Odyssey (premier navire au monde capable d'avancer uniquement grâce aux déchets plastiques).

### LE BRÛLEUR CONTRÔLÉ DE JEAN DISPONS :

Le brûleur contrôlé est un procédé inventé par Jean Dispos qui permet de « brûler » les plastiques de toutes sortes contenu dans les déchets ménagers. Les hydrocarbures se décomposent en donnant des hydrocarbures liquides tels que le gasoil et le white-spirit (une essence qui peut servir de solvant pour peinture ou même d'essence 2-temps), du gaz type GPL + du gaz incondensable dont une partie est brûlée pour chauffer le brûleur. De plus, il est possible de n'obtenir que du gaz directement utilisable dans une turbine à gaz entraînant un alternateur et fournissant donc directement de l'électricité. Si la production de liquides est privilégiée, une moyenne de 750 kg de liquides par tonne de PE est obtenu, soit (en moyennes arrondies) 300 kg (375 litres) de gasoil, 450 kg (600 litres) de white-spirit et essence. Le gaz obtenu (250 kg) est brûlé pour produire la vapeur surchauffée nécessaire. Mais on peut préférer obtenir seulement du gaz, auquel cas le rendement est d'environ de 700 kg de gaz (commercial) par tonne de PE.



FIGURE 10 : BRÛLEUR CONTRÔLÉ DE JEAN DISPONS (DISPONS, J.)

### « ULYSSE » DE PLASTIC ODYSSEY :

Le bateau « Ulysse », voguant depuis mars dernier sur les océans, est équipé d'une unité de pyrolyse afin de transformer des plastiques non-recyclables en énergie, il est propulsé uniquement grâce aux déchets plastiques récupérés à terre puis triés et transformés par pyrolyse en énergie à bord. Sa technologie sera diffusée à travers le monde pour développer l'économie locale tout en dépolluant l'environnement. Cette technologie pourra être installée en Afrique de l'Ouest, une analyse devra être effectuée.



FIGURE 11 : « ULYSSE » DE PLASTIC ODYSSEY (PLASTICODYSSEY.ORG)

« BIOGREEN » D'ETIA :

Quant à Biogreen, il s'agit d'un procédé novateur de conversion thermo-chimique de biomasse et d'autres déchets comme le plastique. Biogreen peut être utilisé pour la torréfaction, la pyrolyse et la gazéification. Cette technologie de pointe permet d'extraire le fort pouvoir calorifique des déchets plastiques et de les transformer en un gaz de synthèse (syngas) très riche en énergie. La pyrolyse à haute température est réalisée grâce à un équipement précurseur et unique, le « Spirajoule ». Cette longue vis pousse la matière plastique au sein d'un compartiment étanche tout en la chauffant par effet Joule. La matière est ainsi transportée à allure régulière au sein de l'appareil. Cela permet d'adapter parfaitement le temps de séjour et la température au matériau à traiter et au produit final désiré. Le syngas est ensuite raffiné grâce à différentes étapes de filtration, d'épuration et de condensation. L'objectif de cette étape cruciale est d'éliminer les poussières, les particules fines, les goudrons, les gaz condensables ainsi que les polluants tels que le chlore. Le gaz est donc purifié, non toxique et peut être utilisé comme carburant dans des moteurs ou turbines afin de produire de l'électricité. Les résidus solides et liquides issus de cette transformation sont optimisés puisque la fraction gazeuse atteint jusqu'à 80%.



FIGURE 12 : « BIOGREEN » D'ETIA (RACEFORWATER.COM)

Ces trois solutions techniques de petites capacités favorisent une gestion de déchets et une production énergétique décentralisées. Les déchets plastiques sauvages sont ainsi une ressource additionnelle à la transition énergétique. Ces prototypes sont très intéressants pour répondre au scénario I (filière « plastiques mous »). Ces deux technologies devront être étudiées plus spécifiquement dès que les retours (données diverses, problèmes rencontrés...) seront publics.

La dimension de ce type de fours (industriels ou pilotes) dépend de la nature des déchets et de la capacité en [t/h]. Des approches de modélisation permettent de dimensionner les fours en vue de garantir une carbonisation complète. Les différentes unités existantes, industrielles ou pilotes, identifiées lors de ce travail sont présentées dans le tableau X ci-dessous.

**TABLEAU 33 : ETAT ACTUEL DE LA FILIÈRE « PYROLYSE/GAZÉIFICATION »**

<b>Exploitations / Exploitants</b>	<b>Technique</b>	<b>Chauffé par</b>	<b>Nature des déchets traités</b>	<b>Capacité [t/h]</b>	<b>Remarques éventuelles</b>
<b>Industrielles</b>					
Procédé PKA (Aalen, Allemagne)	Pyrolyse	Gaz de pyrolyse craqué	Déchets ménagers et encombrants		Mise en service en 98 (a succédé à Kiener pyrolyse débuté en 83)
PIT Pyroflam de SERPAC Environnement (Budapest, Hongrie)	Gazéification		Mélange (vrac)	0.8 – 1.5	Mise en service en 96 / Conduite délicate (difficultés de mise au point) / Imbrûlés mâchefer
Pyropleq de TECHNIP Germany GmbH	Pyrolyse	Gaz naturel ou fuel	Déchets industriels banals		Nombreuses réalisations
Babcock (Burgau, Portugal)	Pyrolyse	Fumées de combustion des gaz de pyrolyse	Déchets ménagers et encombrants		Mise en service en 87 / toujours en exploitation
Noell (Salzgitter)	Pyrolyse	Gaz naturel ou fuel	Déchets industriels banals et spécifiques	5	Difficulté due au coût et à la complexité
<b>Pilotes</b>					
Brûleur de Jean Dispons	Pyrolyse	Gaz de pyrolyse craqué	Déchets ménagers avec beaucoup de plastiques	0.1 - 1	Une unité d'une t/h coûte ~300'000 €, si l'unité travaille en continu 24/7 -> économie de 8'400 t/an de fuel (avec un prix du fuel de 0,25 €/l, l'économie annuelle serait de plus de 2,5 millions d'euros)
Biogreen d'ETIA	Pyrolyse	Effet Joule	Biomasse et plastiques	0.2 – 0.5	Fonctionnement parallèle possible (afin d'atteindre des capacités de traitement plus élevées)
« Ulysse » de Plastic Odyssey	Pyrolyse		Plastiques		En cours d'expérimentation (depuis mars 2018)

L'efficacité du processus de thermolyse dépend des transferts de chaleur au matériau et à l'intérieur de celui-ci. La préparation de la charge est donc essentielle (généralement granulométrie de 5 à 100 cm (selon la technologie) pour les procédés de pyrolyse et pour les procédés de gazéification, il s'agit juste d'éviter les encombrants).

Plusieurs enseignements peuvent être tirés des expériences réalisées :

- Globalement, recul limité pour juger la plupart des expériences identifiées. Les données de base (temps d'arrêt / an, maintenance, capacité installée et testée, nombre d'heures cumulées par an...) sont, difficilement ou pas encore disponibles.
- Echecs / difficultés constatés pour certaines opérations : explosions, rentabilité insuffisante, difficultés d'exploitation, etc. . . Une analyse approfondie est nécessaire pour identifier les causes, proposer des remèdes et définir les coûts associés pour la résolution.
- Pour les déchets plastiques, la thermolyse est certainement une alternative meilleure que l'incinération directe.

De plus, notons que la technologie « pyrolyse / gazéification » fonctionne depuis longtemps en tant qu'unité industrielle, pour le traitement de produit bien défini (piles, accumulateurs, bobinage en cuivre...). La principale difficulté pour son transfert aux déchets en vrac réside dans l'hétérogénéité et la volatilité de ces déchets.

Par conséquent, avant d'envisager le traitement de déchets ménagers en mélange (en vrac), il conviendrait plutôt de porter l'effort sur des déchets spécifiques (pneus, plastiques mous). Mais attention, il a été constaté que s'il existe des unités prometteuses à petite échelle, à grande échelle ce peut être la catastrophe. Là encore, une analyse approfondie est nécessaire.

## QUALITÉ DES PRODUITS DE THERMOLYSE

Etant donné que le déchet est chauffé de manière indirecte, les gaz de pyrolyse ne sont pas dilués par des fumées de combustion. Les quantités et qualités des produits issus de la pyrolyse de déchets ménagers sont intimement liées à leur typologie. Tout comme la qualité des combustibles produits par gazéification, qui est liée à la richesse en matières organiques du déchet de départ et varie selon les procédés mis en œuvre.

## GISEMENT DISPONIBLE (FLUX DE MATIÈRE DANS LES DIFFÉRENTS SCÉNARIIS)

Dans chacune des villes secondaires de Saaba, Gourcy et Pô, le gisement de déchets ménagers récoltés est estimé à 4 t/j en 2015, ce qui correspond à 1'460 t/an de déchets en mélange. Mais ce mélange est constitué de « fines » (<20 mm) et de « gros et moyens » (>20 mm) à proportion de 60/40 pour Gourcy et Pô et de 50/50 pour Saaba.

Dans le scénario I « Filière centralisée de traitement des plastiques mous », le gisement centralisé des plastiques mous est estimé à 1.5 t/j (3x ~0.5 t/j), correspondant à environ 550 t/an de plastiques mous collectés (sans les « fines »). Toujours dans ce scénario, 0.35 t/j (~130 t/an) est mis en décharge dans chaque centre de tri, ce qui correspond environ à ~1 t/j (380 t/an) au total. De plus, 0.3 t/j (~110 t/an) est composté et la même quantité est stocké (au total, environ 2x 0.9 t/j (~2x 330 t/an)).

Dans le scénario II « Filière décentralisée d'incinération des déchets « en refus de tri », le gisement (sans les « fines ») à incinérer dans chaque centre de tri est estimé à 0.85 t/j (~310 t/an). De plus, 0.3 t/j (~110 t/an) est composté et la même quantité est stocké.

Dans le scénario III « filière décentralisée d'incinération des déchets après tamisage », le gisement à incinérer à Saaba est estimé à 4-2 t/j (~730 t/an) (en effet, le pourcentage de « fines » se trouvant dans les déchets collectés, est estimé à ~50% à Saaba). Concernant Gourcy et Pô, le gisement à incinérer dans chacun des centres de tri est estimé à 4-2.4 = 1.6 t/j (~585 t/an) (le pourcentage de « fines » se trouvant dans les déchets collectés, est estimé à ~60%).

Concernant le scénario IV « Filière décentralisée de traitement des déchets « en refus de tris » par pyrolyse ou gazéification », le gisement à « thermolyser » (sans les « fines ») dans chacun des centres de tri est estimé à 0.85 t/j (~310 t/an). De plus, 0.3 t/j (~110 t/an) est composté et la même quantité est stocké.

## QUELLE TECHNOLOGIE PRÉCONISER POUR CHAQUE SCÉNARIO ?

Dans le cas du scénario I « Filière centralisée de traitement des plastiques mous », le gisement de 550 t/an (correspondant à 0.06 t/h) préconise la technologie de pyrolyse (plus particulièrement, le brûleur de Jean Dispons ou peut-être la technologie utilisée sur « Ulysse » de Plastic Odyssey). Mais dans les deux cas, la filière doit être améliorée afin que le gisement de plastiques mous collecté soit plus élevé. Puisque cette filière consiste en un rachat auprès des ménages, il est fort probable que le gisement collecté soit beaucoup plus élevé. Une étude doit être effectuée avant tout dimensionnement d'unité de pyrolyse et ce, afin de déterminer la quantité de plastiques mous qu'il est possible de collecter en porte-à-porte auprès de la population des communes.

Pour ce qui concerne le scénario II « Filière décentralisée d'incinération des déchets « en refus de tris », le gisement de 310 t/an (~0.04 t/h) est comme déjà dit, beaucoup trop faible pour envisager une incinération avec valorisation énergétique.

Dans le scénario III « filière décentralisée d'incinération des déchets après tamisage », le gisement de 730 t/an (0.08 t/h) n'est toujours pas assez conséquent pour envisager une incinération avec valorisation énergétique. En effet, l'incinérateur de Laurent Bouillet vu ci-dessus, demande un minimum de 4 t/h pour un fonctionnement optimal (et il s'agit du plus petit incinérateur existant actuellement). Même si l'on centralise les déchets des trois communes, cela ne suffirait pas (~0.25 t/h). En revanche, il a été constaté que ces déchets sont incinérables, par conséquent, brûler les déchets dans l'unique but d'en diminuer les quantités est tout à fait envisageable dans un simple « four » en terre et briques.

Et finalement, dans le cas du scénario IV « Filière décentralisée de traitement des déchets « en refus de tris » par pyrolyse ou gazéification », le gisement de 310 t/an (~0.04 t/h) n'est non plus pas suffisant pour que le brûleur de Jean Dispons soit opérationnel. De plus, ce dernier préfère les plastiques et ici, il est question des déchets en mélange avec 60% de plastique. Le pourcentage de plastique dans le mélange suffit au bon fonctionnement du brûleur, mais les quantités ne sont pas suffisante pour une utilisation optimale de la technologie. Cependant, il est plus que probable que les quantités collectées soient de plus en plus importante au fil des années et de l'amélioration de la filière de gestion des déchets. Par conséquent, cette technologie pourra surement être mise en place dans le futur.

## ANALYSE COMPARATIVE DE LA THERMOLYSE ET DE L'INCINÉRATION (ANALYSE PESTEL)

Puisque la thermolyse semble plus appropriée au cas du Burkina Faso, l'analyse a été effectuée plus spécifiquement sur les avantages concurrentiels de la thermolyse :

### SUR LE PLAN POLITIQUE

La demande énergétique ne cesse de croître au Burkina Faso, en effet, la consommation énergétique du pays reste tributaire des importations de produits pétroliers. Face à cette demande croissante et à la fluctuation du prix du pétrole, les politiques souhaitent s'orienter de plus en plus vers le développement des énergies renouvelables. Par conséquent, la thermolyse a un avantage certain puisqu'il est possible d'obtenir des combustibles ayant presque les mêmes caractéristiques que le pétrole.

### SUR LE PLAN ÉCONOMIQUE

Il ne semble pas y avoir avantage à la thermolyse de nos jours, exception faite de quelques applications spécifiques (traitement de déchets spécifiques, tel que les plastiques mous) ou pour des faibles capacités installées.

Dans ce dernier cas (petites installations), la position de la thermolyse pourrait être fragilisée par l'apparition d'une offre d'incinération de petite capacité (four oscillant de Laurent Bouillet par exemple).

A titre indicatif, il est présenté dans le tableau 34 ci-dessous des exemples de coûts d'investissement et de traitement pour les déchets ménagers (données fournies par Jung et Fontana (2003)). Il conviendrait certainement de procéder à des analyses de ce type pour le traitement spécifique des déchets type « plastiques mous ».

**TABLEAU 34 : COÛTS D'INVESTISSEMENT ET DE TRAITEMENT POUR LES DÉCHETS MÉNAGERS**

	<b>Incineration (200'000 t/an)</b>	<b>Pyrolyse (50'000 t/an)</b>	<b>Gazéification (50'000 t/an)</b>
<b>Investissement (Euro/t/an)</b>	600	290 - 610	300 - 460
<b>Coût de traitement (Euro/t/an)</b>	80	50 - 90	50 - 80

### SUR LE PLAN SOCIAL

Au-delà des contraintes technico-économiques, le contexte socio-politique peut aussi constituer un facteur limitant au développement des filières thermiques. En effet, les déchets, qualifiés de sales, de rebus, amènent des maladies et autres inconvénients. Cette « dramatisation », vis à vis de la gestion des déchets, génèrent des problèmes d'acceptation. De plus, le prix faible de la mise en décharge supprime toute motivation de création de filière.

Cependant, notons tout de même que la thermolyse bénéficie d'une image plus positive que l'incinération, auprès de certaines collectivités locales (c'est nouveau et enfin, on ne parle plus d'incinération !).

### SUR LE PLAN TECHNOLOGIQUE

La proportion des incombustibles doit se limiter à 30% du mélange, sauf si la solution thermique est un moyen efficace de séparer les incombustibles des combustibles.

De plus, le niveau de formation technique des opérateurs pourrait dans certains cas constituer un frein à la diffusion de la thermolyse. La plupart des unités fonctionnent aujourd'hui avec des équipes qualifiées, la question des compétences peut donc se poser dans le cas de l'Afrique de l'Ouest. D'autant plus pour des petites unités décentralisées, les équipes sur place risquent de ne pas être hyper compétentes et la maintenance préventive risque de ne pas être traitée de façon satisfaisante.

Mais en aucun cas le niveau de qualification ne doit constituer un point de blocage pour la thermolyse. En effet, l'usine de pyrolyse intégrée de Budapest (SERPAC Environnement) fonctionne depuis 1997 avec du personnel hongrois non qualifié, sous la responsabilité d'un maître d'ouvrage, ce qui démontre que le procédé peut être exploité par du personnel non qualifié (tant qu'un maître d'ouvrage qualifié supervise).

#### SUR LE PLAN ENVIRONNEMENTAL

La quantité des fumées est plus faible avec la thermolyse en comparaison à l'incinération. En revanche, la qualité des fumées n'est pas un critère discriminant tant que les unités d'incinération sont dotées d'équipement de traitement de fumées adéquats (ce qui est le cas aujourd'hui en Europe, mais le serait-ce en Afrique de l'Ouest ?).

La quantité des résidus est plus faible avec la thermolyse. Cet argument, souvent présenté comme un « plus » n'est pas un avantage objectif dans la mesure où les cokes produits doivent normalement être traités avant enfouissement (mais le serait-ce en Afrique de l'Ouest ?).

De plus, cela représente un avantage sur le plan environnemental s'il y a valorisation ultérieure de ces sous-produits (char, huile, gaz...). Par conséquent, dans le cas du Burkina Faso, la thermolyse se voit avoir plus d'avantages sur le plan environnemental puisque l'incinération n'a pas vraiment de sens en termes de « valorisation énergétique ».

#### SUR LE PLAN LÉGISLATIF

La qualité des gaz et huiles produits doivent être certifiées conformes par des tests analytiques et le semi-coke doit être traité par séparation mécanique des métaux et minéraux pour pouvoir être acceptés en tant que combustibles de substitution. De plus, les gaz produits contiennent généralement des goudrons et des fines particules, alors, lorsque les gaz sont utilisés dans des turbines ou moteurs thermiques pour produire de l'électricité, ils doivent être traités selon des spécifications très strictes.

De même pour l'incinération, le traitement des fumées et des mâchefers sont réglementés par des normes strictes. En effet, au Burkina Faso, les normes sur l'environnement sont tout aussi rigoureuses et strictes qu'en Suisse.

De façon très générale, cette analyse PESTEL indique que les aspects « environnementaux » de la thermolyse ne constituent pas le seul facteur à prendre en compte. Les aspects techniques (fiabilité / sécurité / niveau de qualification), économiques (rentabilité) ou réglementaires apparaissent essentiels. De plus, le principal avantage de la thermolyse sur le plan environnemental, social et économique réside dans l'image négative véhiculée par l'incinération ainsi que le fait que les « sous-produits » obtenus peuvent être valorisés et revendus sous forme de combustible.

## CONCLUSION

L'objectif de cette étude a été de proposer aux différents acteurs en charge de la gestion des déchets au Burkina Faso des solutions techniques de traitement et valorisation des déchets ménagers sur la base de données caractéristiques fiables.

Les résultats obtenus suite à la caractérisation physico-chimique des déchets de Ouagadougou et Pô (taux d'humidité, taux d'inertes, fraction combustible, taux de matière volatile etc...) ont démontré que ces derniers sont favorables à l'incinération ainsi qu'au traitement via pyrolyse.

Mais du point de vue énergétique, le traitement via pyrolyse devrait être privilégié par rapport à l'incinération. En effet, la pyrolyse a l'avantage de créer un sous-produit combustible transportable alors que l'incinération crée de l'énergie chaleur devant être valorisée directement sur place ou permet uniquement de diminuer les quantités de déchets à mettre en décharge.

La filière thermique pourrait donc être amenée à se développer dans les prochaines années en Afrique de l'Ouest. Ce travail a permis d'affirmer qu'il y a avantages à développer les technologies plus spécifiques aux typologies des déchets ménagers collectés (filiale « plastiques mous ») ainsi que les technologies rendant possible une valorisation énergétique (thermolyse). Et ce, au détriment des solutions plus traditionnelles mais moins adaptées au contexte des pays (incinération). Mais compte tenu du niveau de développement de la pyrolyse / gazéification, il faut encore attendre que la technologie s'améliore.

Dans tous les cas, le développement de cette filière technologique en Afrique de l'Ouest pourra se faire que si les problèmes techniques rencontrés en phase d'exploitation sont résolus. Plus largement, si les retours d'expérience (industrielle ou pilote) sont positifs (technique, risque, coût,...) et la caractérisation des déchets maîtrisée.

Au-delà, les procédés industriels qui ont besoin d'énergie devraient également profiter du développement de la filière thermique. Cette dernière pourra donc se développer pour des installations de petites capacités, que ce soit au niveau des collectivités locales, des industriels ou des groupements d'industriels.

Aujourd'hui, il a été constaté que des freins au développement de la filière thermique existent tel que :

- Chaîne logistique imparfaitement maîtrisée (gestion des déchets ménagers) : rayon de collecte, capacité des centres de tris, niveau de tris requis... ;
- Caractère volatil du gisement des déchets ménagers : Les déchets représentent un gisement évoluant rapidement, les informations disponibles deviennent donc rapidement obsolètes et mène donc à un surdimensionnement ou sous-dimensionnement des installations ;
- Forte concurrence des combustibles obtenus après traitement (char, huile, gaz...) avec de nombreux combustibles aujourd'hui disponibles sur le marché et généralement à moindres coûts ;

Mais le principal frein au développement de cette technologie semble être dans la maîtrise dans le temps de la qualité et de la quantité de l'approvisionnement en déchets. De plus, la valeur marchande d'un produit (combustible ou énergie quelconque), aux yeux d'un utilisateur potentiel, dépend de la stabilité de la composition, du prix et de la garantie de disponibilité des quantités souhaitées en fonction du temps. C'est une difficulté supplémentaire qu'il faudra analyser (la qualité des combustibles solides issus de la thermolyse par différentes méthodes est en cours de développement).

Constatons enfin que les gisements en matière collectés actuellement ainsi que les données disponibles aujourd'hui sur les technologies existantes permettent difficilement de procéder au dimensionnement d'un projet. A cet égard, des études plus poussées doivent être effectuées avant toute décision de s'orienter vers un traitement thermique.

## LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

### FIGURES

Figure 1 : carte de localisation du PAGDM-SGP (ISF-direction, T’kint, 2012) .....	11
Figure 2 : état actuel de la gestion des déchets ménagers dans les communes de Saaba, Gourcy et Pô .....	15
Figure 3 : Scénario I – filière centralisée de traitement des plastiques mous .....	17
Figure 4 : Scénario II – Filière décentralisée d’incinération des déchets « en refus de tris » .....	18
Figure 5 : Scénario III – Filière décentralisée d’incinération des déchets après tamisage .....	19
Figure 6 : Scénario IV - Filière décentralisée de traitement des déchets « en refus de tris » par pyrolyse ou gazéification .....	20
Figure 7 : Diagramme triangulaire d’incinérabilité .....	36
Figure 8 : Conditions d’exploitation et technologies d’incinération disponibles (Lurgi Engineering) .....	38
Figure 9 : Four oscillant de Laurent Bouillet .....	41
Figure 10 : Brûleur contrôlé de Jean Dispons .....	42
Figure 11 : « Ulysse » de Plastic Odyssey .....	43
Figure 12 : « Biogreen » d’ETIA .....	43

TABLEAUX

Tableau 1 : Critères de détermination des zones de standing .....	12
Tableau 2 : pourcentage en masse par rapport à la masse brute totale .....	22
Tableau 3 : Comparaison et récapitulation des valeurs obtenues .....	23
Tableau 4 : proportion du pourcentage masse sans prendre en compte les inertes .....	23
Tableau 5 : Principales composantes en % de la masse brute des gros et des moyens .....	24
Tableau 6 : Composantes en % de la masse brute des gros et des moyens .....	25
Tableau 7 : Masse (%) « sans les inertes & les fermentescibles » .....	25
Tableau 8 : Masse (%) « déchets mis en décharge ».....	26
Tableau 9 : Masse (%) « sans les inertes & les fermentescibles » .....	26
Tableau 10 : Masse (%) « sans les plastiques mous » .....	26
Tableau 11 : Composition pondérale du bois selon son essence (Dumon and Gelus, 1982 ; NGOLLO MATEKE, 2010) .....	27
Tableau 12 : Composition pondérale du bois de sapin selon son auteur (Dumon and Gelus, 1982 ; Beaumon, 1986) .....	27
Tableau 13 : Analyse immédiate du bois (Leppa and Saarn,i 1982 ; Van de Velden M and al. 2009) .....	28
Tableau 14 : Composition élémentaire du carton .....	28
Tableau 15 : Analyse immédiate du carton.....	29
Tableau 16 : Composition élémentaire du polyéthylène basse densité .....	29
Tableau 17 : Analyse immédiate du polyéthylène .....	29
Tableau 18 : repartition massique des types de déchets selon les composantes combustibles « bois, carton, pEBD » .....	30
Tableau 19 : Proportions par rapport à la fraction combustible.....	31
Tableau 20 : Composition de différents mélanges types .....	31
Tableau 21.....	32
Tableau 22 : Analyse élémentaire des constituants (Beaumont 1985 ; T. Rogaume 2001 ; Melhyas KPLE 2015) .....	32
Tableau 23 : Composition élémentaire du mélange 1 .....	32
Tableau 24 : Composition élémentaire du mélange 2 .....	33
Tableau 25 : Composition élémentaire du mélange 3 .....	33
Tableau 26 : Masse atomique des principaux composant du déchet type .....	33
Tableau 27 : Nombre de moles d’atomes des constituants du déchet type .....	34
Tableau 28 : Paramètre de combustion des déchets ménagers .....	35
Tableau 29 : PCI <sub>brut</sub> des déchets ménagers de ouagadougou et de pô .....	37
Tableau 30 : Matière volatile et carbone fixe des déchets ménagers .....	39
Tableau 31 : Proportion de gaz et de solide après traitement par pyrolyse.....	40
Tableau 32 : Caractéristiques du four « Laurent Bouillet ».....	41
Tableau 33 : Etat actuel de la filière « Pyrolyse/Gazéification » .....	44
Tableau 34 : Coûts d’investissement et de traitement pour les déchets ménagers .....	47

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

**ADEME (1996).** *"La collecte et le traitement des déchets."* Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, France.

**Aloueimine, S. O., G. Matejka, et al. (2006 a).** *"Caractérisation des ordures ménagères à Nouakchott – Partie 1 : Méthode d'échantillonnage."* Déchets, Sciences et Techniques n° 44.

**Aloueimine, S. O., G. Matejka, et al. (2006 b).** *"Caractérisation des ordures ménagères à Nouakchott – Partie 2: Résultats en saison sèche et en saison humide » "* Déchets, Sciences et Techniques n° 44.

**Alouemine, S. O. (2006).** *Méthodologie de caractérisation des déchets ménagers à Nouakchott (Mauritanie) : Contribution à la gestion des déchets et outils d'aide à la décision. Chimie et Microbiologie de l'eau, Université de Limoge. Thèse de Doctorat N° 012-2006: 195.*

**Beaumont, O. (1985.).** *"« La combustion du bois »."* Biomasse actualité n° 17.

**Cooper, C. D., B. Kim, et al. (1999).** *"Estimating the Lower Heating Values of Hazardous a Solid Waste."* Journal of the Air and Waste Management Association 49: 471 – 476 Pages.

**Diop, O. (1988).** *Contribution à l'Etude de la Gestion des Déchets Solides de Dakar: Analyse systématique et aide à la décision. Département de Génie Rural et Géométrie, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse. Thèse de doctorat N°757: 292 pages.*

**Dispons, J.** *Procédé de transformation des déchets de PE en hydrocarbures : 6 pages.*

**Dumon, R. and M. Gelus (1982).** *"« Valorisation chimique du bois », cha III : « Préparation chimique du bois de feu » "* Edition Masson: Pp 8, 9,11.

**Hamidou, S. (2005).** *Gestion des déchets ménagers dans les Pays En Développement : Cas du Burkina Faso. Dégradation thermique de leur fraction combustible. Energétique, Thermique, Combustion, Université de Ouagadougou. Thèse de Doctorat: 153 Pages.*

**A. Fontana et C. G. Jung (2003).** *Préparation thermique de combustibles alternatifs par biométhanisation, thermolyse et gazéification ». Les techniques de l'Industrie Minérale, 18: 95-100*

**C. G. Jung and A. Fontana (2006) .** *Pyrolysis and gasification of mixed plastics. Production of substitution fuels, Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste plastics. Chapitre 10: p 251-284.*

**C. G. Jung (2008) .** *Pyrolysis and gasification of industrial waste towards substitution fuels", High*

**Kandel N. (2000).** *Synthèse de dires d'experts sur les filières appliquées aux déchets industriels banals.*

**Maes M. (1994).** *La maîtrise des déchets industriels. Ed. P.Johanet S.A.*

**Ngnikam E. (2002).** *La maîtrise de la collecte et de traitement des déchets solides dans les pays en développement et réduction des émissions de gaz à effet de serre, rencontre de la coopération technologique nord-sud pour le développement durable et le climat organisées dans le cadre de POLLUTEC, Lyon 25 et 26 Novembre 2002, 22 pages.*

**Nzhiou, F. (2005).** *Modélisation d'un four thermique rotatif. Energétique, Thermique, Combustion. Burkina Faso, Université de Ouagadougou. Doctorat de l'Université de Ouagadougou.*

**Nzhiou, J. F. (2013).** "Improving Municipal Solid Waste Land Filling Disposal Process : Experiments with a laboratory Scale Rotary Kiln." *Journal of Environmental Protection* 4: 753-759.

**Nzhiou, J. F., T. Rogaume, et al. (2008).** "Contribution à la mise en place d'un modèle de la fraction combustible des déchets ménagers de la ville de Ouagadougou." *Rev. CAMES Science et Médecine, série A* 6: 7.

**Proust M. 2001.** *Caractérisation des déchets ménagers de la ville de Ouagadougou. Université de Ouagadougou, Mémoire de Master, 100.*

**Rogaume T (2001).** *Caractérisation expérimentale et modélisation de l'émission de polluants lors de l'incinération des déchets ménagers, université de Poitiers. Thèse de Doctorat*

**Rogaume, T., M. Auzanneau, et al. (2002).** "The effects of different airflows on the formation of pollutants during waste incineration." *Fuel* Vol 81: pp. 2277-2288.

**Rogaume, T., M. Auzanneau, et al. (2003).** "« Computational model to investigate the effect of different airflows on the formation of pollutants during waste incineration »." *Combustion Science and Technology* 175: pp 1501-1533.

**Tezanou, J. (2003).** *Evaluation environnementale et technique de la gestion des déchets ménagers de Ouagadougou : Schéma de gestion et Expérimentation de traitement thermique. Ecole Doctorale des Sciences pour l'Ingénieur : Energie, Thermique, Combustion. France, Université de Poitiers. Thèse de Doctorat: 197 pages.*

**Tezanou, J., J. Koulidiati, et al. (2001).** "Caractérisation des déchets ménagers de la ville de Ouagadougou (Burkina Faso)." *Annales de l'Université de Ouagadougou.*

**Thonart, P. and S. D. (2005).** "Guide pratique sur la gestion des déchets ménagers et des sites d'enfouissement techniques dans les pays du sud. Collection points de repère, OIF." 121 pages.

**ZHOU X.,** « Contribution à l'étude de l'incinération des déchets urbains :expérimentation en réacteur en lit fixe à contre-courant, approche théorique du déplacement du front d'inflammation » *Thèse de Doctorat de J'Université de Poitiers, 1994,page 33.*

SITES INTERNET :

BLEST (Japon) : <http://www.blest.co.jp/eng/> consulté le 22 janvier 2018

BIOGREEN (ETIA) : <http://www.biogreen-energy.com/> consulté le 16 février 2018

<http://raceforwater.com> consulté le 8 juin 2018

DOING GROUP: <http://www.doinggroup.com> consulté le 22 janvier 2018

FOUR OSCILLANT DE LAURENT BOUILLET : <http://environnement.wallonie.be> consulté le 8 juin 2018

MAVEL ENGINEERING : <https://www.mavel.biz/mavel-engineering/> consulté le 22 janvier 2018

PLASTIC ODYSSEY : <http://plasticodyssey.org> consulté le 8 juin 2018

PYROCRAT: <http://pyrolysisplant.com/pyrolysis-plant/> consulté le 16 février 2018

SCIENCEDIRECT :<https://www.sciencedirect.com/science/article/> consulté le 17 janvier 2018