



**ETUDE DE FAISABILITE TECHNIQUE ET FINANCIERE
DE LA VALORISATION DES DECHETS MENAGERS
ORGANIQUES, PAPIERS ET CARTONS POUR LA
FABRICATION DES BRIQUETTES COMBUSTIBLES A
BUJUMBURA, BURUNDI**

**MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU
MASTER EN INGENIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT**

OPTION : Eau et Assainissement

Présenté et soutenu publiquement le [Date] par

Marie Sandrine DUSABE

Travaux dirigés par : Dr. Andrianisa ANDERSON

Enseignant chercheur

UTER ---

Jury d'évaluation du stage :

Président : Prénom NOM

Membres et correcteurs : Prénom NOM

Prénom NOM

Prénom NOM

Promotion [2013/2014]

REMERCIEMENTS

A l'issu de ce travail, je remercie tout d'abord le programme pavage de la CTB à travers son délégué à la cogestion, Mr Olivier Chanoine de m'avoir donné l'opportunité de ce stage.

Mes remerciements vont également à Mr Fabien De Angelis, mon maitre de stage, et Mr Pierric RAULIN, le responsable de la cellule « assainissement » au Programme Pavage qui m'ont beaucoup aidée avec la mise en disposition de tous les moyens nécessaires au bon déroulement de ce stage sans oublier leur assistance durant mon stage ;

J'adresse ma profonde gratitude au Dr A. Andrianisa pour son encadrement sans oublier les conseils que j'ai reçu de lui;

Je remercie tout l'équipe « Assainissement » du programme pavage pour leur collaboration pendant mon stage;

A tous les employés des zones de transit pour leur collaboration charitable ;

Mes remerciements vont également à Dr Théophile de nous avoir accueilli dans son laboratoire pour d'éventuelles analyses ;

Je remercie l'ensemble des enseignants du 2iE pour leur formation dispensée précieuse soit-elle;

Je ne peux pas terminer sans avoir exprimé ma gratitude envers ma famille pour tout ce qu'elle fait pour la réussite de mes études.

Puissent-ils trouver ici l'expression de ma reconnaissance.

DEDICACES

A Dieu le Père Tout Puissant,

*A mes parents, mes frères et sœurs et à mes amis pour leur soutien
et leurs prières.*

*A ma chère tante NZOBAK'ENGA Coloná pour son soutien
inconditionnel*

RESUME

Cette étude avait l'objectif d'étudier la faisabilité technique et financière de la valorisation des déchets ménagers organiques, papiers et cartons pour la fabrication des briquettes combustibles.

Des analyses physico-chimiques ainsi que les tests comparés de combustion ont été réalisés pour connaître les briquettes de meilleures qualités. Ces analyses et tests nous ont permis de mettre en évidence deux types de briquettes de meilleure qualité. Il s'agit de celles issues exclusivement des poussières de charbon et celles issues du mélange char et poussières du charbon. En comparaison avec le charbon du bois, le combustible le plus utilisé à BUJUMBURA, les briquettes retenues comme meilleures ont un Pouvoir Calorifique Inférieur environ deux fois moins celui du charbon du bois (14 et 30MJ/kg). Néanmoins, leur temps de consommation est plus long que celui du charbon. Les briquettes produites à partir du papier ont un Pouvoir Calorifique Inférieur acceptable et une bonne combustion mais dégagent trop de fumées. Pour y pallier, l'ajout des poussières de charbon semble être la meilleure solution. Sur le volet économique, les briquettes sont rentables avec utilisation du matériel local. Néanmoins, le gisement des déchets ménagers destinés à la carbonisation est limité.

Des pistes d'amélioration ont été proposées. Entre autres, le test du four « 3 fûts » pour optimiser la carbonisation, un système de broyage des poussières de charbon pour réduire les pertes (refus du tamisage), chercher d'autres gisements des résidus à carboniser et enfin centraliser tous les matières premières collectées dans les zones de transit dans une seule unité de production.

Mots clés : Valorisation, briquettes combustibles, déchets ménagers organiques, papiers, Bujumbura

ABSTRACT

This study had the objective to study the technical and financial feasibility of valorization of organic household waste, paper and cardboard for the manufacture of fuel briquettes.

Physico-chemical analyses and compared combustion tests were carried out to know the best briquettes. These analyses and tests have allowed us to highlight two briquettes of a good quality. These are those from exclusively coal dust and those from the char and dust coal. Compared with wood charcoal, the most fuel used in Bujumbura, the briquettes selected as the best have about half Net Calorific Value of coal wood Net Calorific Value (14 and 30MJ/kg respectively). Nonetheless, their time of smolder is longer than that of coal. Briquettes produced from the paper have an acceptable Net Calorific Value and good combustion but emit too much smoke. To overcome this, adding dust coal seems to be the best solution. On the economic side, the briquettes are profitable with the use of local materials. However, the household wastes supply to carbonize is very limited.

Areas for improvement have been proposed. Among other things, test the kiln “3 drums” to optimize the carbonization; a system of grinding dust coal to reduce losses (refusal of screening), look for other deposits of residue to be carbonized and finally centralize all raw materials collected in the transit areas in a single production unit.

Keywords: valorization, fuel briquettes, organic household wastes, paper, Bujumbura

LISTE DES ABBREVIATIONS

A : Taux de cendres

ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'énergie

BIF : Franc Burundais

Cf. : Taux de carbone fixe

CH₄ : Méthane

CO₂ : Dioxyde de carbone

CTB : Coopération technique Belge

FFOM : Forces, Faiblesses, Opportunités et Menaces

H₂O : Eau

MOV: Taux de matières volatiles

MP: Matières premières

NCV : Net Calorific Value

OM: ordures ménagères

PCI: Pouvoir calorifique Inferieur

PCS: Pouvoir calorifique Supérieur

SETEMU: Services Techniques Municipaux

SWOT : Strength, Weaknesses, Opportunities and Threats

W: Taux d'humidité

ZDT: Zone de Transit

TABLES DE MATIERES

REMERCIEMENTS	i
RESUME	iii
ABSTRACT.....	iv
LISTE DES ABBREVIATIONS.....	v
LISTES DES TABLEAUX	ix
LISTES DES FIGURES	ix
I. INTRODUCTION	1
1.1. Contexte	1
1.2. Problématique	3
1.3. Objectifs et méthodologie	3
II. GENERALITES	4
2.1 PRESENTATION DE LA ZONE D’ETUDE	4
2.1.1 Ville de Bujumbura.....	4
2.1.1.1 Géographie et hydrographie.....	4
2.1.1.2 Démographie.....	4
2.1.2 Trois communes : CIBITOKÉ, KAMENGE et KINAMA	5
2.2 GESTION DES DECHETS MENAGERS A BUJUMBURA.....	6
2.2.1 Décharge publique	7
2.2.2 Législation sur la gestion des déchets au BURUNDI	8
2.2.3 Caractérisation des déchets : Bujumbura.....	9
2.3 GESTION DES DECHETS : CAS DE KAMENGE, KINAMA ET CIBITOKÉ	9
2.3.1 Pré-collecte	10
2.3.2 Collecte	11
2.3.3 Caractérisation des déchets : Kamenge, Kinama et Cibitoke	11
2.4 ETUDE DE L’ART DE LA FABRICATION DES BRIQUETTES COMBUSTIBLES.....	12
2.4.1 Aperçu général des briquettes.....	12
2.4.2 Historique.....	12
2.4.3 Les briquettes combustibles en Afrique.....	13
2.4.4 Processus de fabrication des briquettes.....	13
2.4.4.1 Carbonisation	14

2.4.4.2	Densification ou compression	14
III.	METHODOLOGIE DE TRAVAIL.....	14
3.1	ETUDE DE FAISABILITE TECHNIQUE	14
3.1.1	Choix des matières premières.....	14
3.1.2	Choix de la composition des briquettes combustibles	15
3.1.3	Production des briquettes combustibles	15
3.1.3.1	Préparation des déchets.....	15
3.1.3.2	Carbonisation	16
3.1.3.3	Préparation du liant	17
3.1.3.4	Densification (compression)	17
3.1.3.5	Séchage des briquettes	18
3.1.4	Caractérisation des briquettes combustibles	19
3.1.4.1	Pouvoir calorifique.....	19
3.1.4.2	Taux d'humidité.....	19
3.1.4.3	Taux de matières volatiles.....	20
3.1.4.4	Taux de cendres	20
3.1.4.5	Taux de carbone fixe.....	20
3.1.5	Tests de combustion	21
3.2	ETUDE DE FAISABILITE ECONOMIQUE	21
3.2.1	Etude du marché.....	21
3.2.2	Evaluation de la rentabilité économique	22
IV.	RESULTATS ET DISCUSSIONS	22
4.1	ETUDE DE FAISABILITE TECHNIQUE	22
4.1.1	Choix de la composition pour les briquettes	22
4.1.2	Tests physico-chimiques des briquettes combustibles.....	23
4.1.2.1	Humidité	23
4.1.2.2	Taux de matières volatiles, taux de cendres et taux de carbone fixe	24
4.1.2.3	Pouvoir calorifique.....	25
4.1.3	Tests de combustion	26
4.2	ETUDE DE FAISABILITE ECONOMIQUE	28
4.2.1	Etude du marché.....	28
4.2.2	Evaluation de la rentabilité économique	29
4.3	ETUDE DES IMPACTS SOCIO-ECONOMIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX	33
4.2.2	Impacts environnementales et sanitaires	34

4.2.2.1	Préservation des forêts	34
4.2.2.2	Effets sur le changement climatique	34
4.2.2.3	Impacts sanitaires	34
4.2.3	Impacts sociaux.....	35
4.2.4	Impacts économiques.....	35
4.2.5	Analyse FFOM ou SWOT	35
5	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES D'AMELIORATION	37
5.1	Conclusion générale.....	37
5.2	Pistes d'amélioration.....	38
	BIBLIOGRAPHIE	39
	ANNEXES	41

LISTES DES TABLEAUX

Tableau 1: Caractéristiques démographiques de la zone d'étude	5
Tableau 2: Caractérisation des OM à Bujumbura	9
Tableau 3: Caractérisation des OM dans les quartiers populaires en voie de développement.....	11
Tableau 4: Composition des MP (matières premières) pour le briquetage	23
Tableau 5: coût d'investissement scenario 1	31
Tableau 6: coût de production scenario 1	31
Tableau 7: coût d'investissement scenario 2	32
Tableau 8: coût de production scenario 2	32
Tableau 9: Coût de production/Kg de briquettes	33
Tableau 10: Temps de retour sur l'investissement d'une unité de production des briquettes combustibles	33
Tableau 11: Sauvegarde des ressources forestières en cas de substitution du charbon du bois aux briquettes combustibles	34

LISTES DES FIGURES

Figure 1: Carte de Bujumbura divisée en 13 communes	6
Figure 2: Décharge publique de Bujumbura	8
Figure 3: Illustration du système de gestion des OM dans la zone d'étude.....	10
Figure 4: Four à carboniser muni d'une cheminée.....	17
Figure 6: Compression à la presse "rotor"	18
Figure 5: Compression à la presse manuelle.....	18
Figure 7: Taux d'humidité des briquettes et charbon du bois	24
Figure 8: Taux de MOV, A, Cf des briquettes et charbon du bois	25
Figure 9: Résultats du pouvoir calorifique.....	26
Figure 10: Résultats des tests de combustion pour les briquettes et charbon du bois	27
Figure 11: Presse rotor.....	30
Figure 12: Presse manuelle	30

I. INTRODUCTION

1.1. Contexte

La gestion des ordures ménagères dans la plupart des Etats est reléguée au second plan alors que, au même titre que les préoccupations de bonne gouvernance, les transports, l'éducation, la fourniture d'eau potable, la construction des infrastructures, etc., les déchets devraient faire l'objet d'une attention particulière (BEMB, 2009)

La gestion des déchets solides, particulièrement celle des déchets ménagers constitue l'un des défis de la plupart des villes des pays en voie de développement où la croissance démographique et la diversité des activités socio-économiques sont à l'origine de la dégradation de l'environnement comme c'est le cas de BUJUMBURA. Un bon système de gestion de ces déchets constituant un créneau porteur dans le développement de nos pays africains, il est indispensable de mettre en place des plans stratégiques pour atténuer les impacts liés à la mauvaise gestion de ces déchets.

Toutes les associations¹ de collecte des ordures ménagères dans la ville de Bujumbura ainsi que les travaux communautaires contribuent à l'enlèvement de 5% de la quantité totale des déchets et cela dans quelques quartiers. Les SETEMU² à qui a été confiée la tâche d'enlever les OM à Bujumbura étant capables d'enlever qu'une moyenne de 20%, on peut en déduire que 75% des déchets ménagers solides ne sont pas collectés. Ceci se justifie par le nombre important de dépotoirs sauvages, dans certains quartiers, autour des marchés et autres espaces publics (CTB, 2013). Bujumbura a donc du mal à faire face à cette situation qui devient de plus en plus critique.

Une grande partie des déchets sont potentiellement valorisables et ce, en fonction de leur nature chimique, de leurs propriétés mécaniques, physico-chimiques ou de leur pouvoir calorifique inférieur (PCI). Dans le cas des déchets solides, lorsqu'ils sont hétérogènes, chaque catégorie de déchets, voire chaque fraction au sein d'une catégorie, doit être envisagée pour effectuer le choix d'une voie de traitement. La caractérisation de ces déchets est très importante pour le choix de la filière de traitement (JUNG, 2013).

¹ Il s'agit des associations privées qui effectuent la collecte dans les ménages à l'aide des camions bennes

² Services Techniques Municipaux: ils assurent la gestion des déchets solides et des eaux usées dans la ville de Bujumbura

Ainsi, la pénurie actuelle des énergies traditionnelles au Burundi (bois et charbon du bois) entraîne un sérieux problème de déboisement et donc d'érosion et d'appauvrissement des sols, des difficultés d'approvisionnement, de désertification et des hausses des prix. Cela donne l'espoir sur le potentiel du marché des déchets valorisés : les briquettes fabriquées à partir de déchets organiques, papiers et cartons sur lesquelles porte notre étude. D'un autre côté, l'accroissement démographique et le développement socio-économique engendre l'augmentation des ordures ménagères urbains et par conséquent, les résidus organiques nécessaires pour la production de ces briquettes combustibles.

Actuellement, Bujumbura connaît un retard dans la valorisation des déchets ménagers ; très peu d'unités de transformation et de valorisation y sont présentes et cela est dû à une absence d'un plan de gestion durable des déchets solides.

Comme tant d'autres énergies renouvelables (solaires, éoliennes, thermiques, hydrauliques), les briquettes ont un potentiel d'être la source d'énergie renouvelable si elles sont fabriquées à partir de la biomasse. Selon le Ministère de l'Energie et des mines, le bois et le charbon de bois représente plus de 90% de la consommation énergétique au Burundi et selon le *rapport du Burundi à la convention sur la diversité biologique*, le Burundi connaît une surexploitation forestière ; de 1990 à 2009, le taux de déforestation était de 9%. Les terres boisées occupaient 4,7% de la superficie totale du pays. Suite à cette déforestation qui s'accroît partout au Burundi, d'autres énergies alternatives sont nécessaires pour diminuer les pressions sur les forêts. Le recours aux briquettes participerait à la protection des forêts car elles peuvent être utilisées en substitution du bois de chauffage ou du charbon de bois.

La valorisation des déchets ménagers par la fabrication des briquettes est stimulée par les avantages suivants:

- ✓ la réduction du volume des OM (ordures ménagères) à transporter vers la décharge (diminution des frais de transport, préservation de l'espace recevant les déchets et la pollution qu'ils causeraient (pollution de la nappe phréatique, émissions des gaz nuisibles à la santé humaine, odeurs nauséabondes) ;
- ✓ La prise de part dans les filières des énergies renouvelables ;
- ✓ La génération d'emplois en vue de diminuer la pauvreté de la population;
- ✓ La réduction des pressions faites sur les ressources forestières et par conséquent du changement climatique.

C'est dans ce contexte que le « Programme Pavage » de la CTB lance une étude sur la fabrication des briquettes combustibles à partir des OM organiques. Ce projet rentre dans le cadre de gestion des déchets ménagers en accompagnement de celui de pavage des routes avec construction des caniveaux d'évacuation des eaux pluviales dans les trois communes de BUJUMBURA : Kamenge, Kinama et Cibitoke en vue d'assurer leur pérennité.

1.2. Problématique

Bien que l'adhérence au système de gestion soit satisfaisante (entre 60 et 70%), cette gestion ne devrait pas se limiter à la collecte. D'une part, des nuisances liées à ces déchets sont nombreux : nuisances olfactives, contamination des eaux souterraines et de surface, etc. Egalement, l'investissement dans l'évacuation des déchets venant des zones de transit est élevé. D'autre part, la déforestation accentuée au Burundi pousse les autorités à investir dans des autres alternatives de combustibles qui pourraient se substituer au bois de chauffage et au charbon du bois.

1.3. Objectifs et méthodologie

L'objectif global de cette étude sera d'étudier la faisabilité technique et financière de la valorisation des déchets organiques, papiers et cartons dans ces trois communes pour la fabrication des briquettes combustibles.

Cette valorisation pourrait réduire le taux de déforestation mais aussi réduire la quantité des déchets évacués à la décharge. Notons que la valorisation se fait dans les zones de transit avant d'évacuer les déchets ultimes à la décharge finale qui est incontrôlée.

Ainsi, d'une façon spécifique, il sera question de:

- ✓ optimiser le processus de fabrication de ces briquettes combustibles ;
- ✓ évaluer les débouchés économiques, la viabilité financière de la filière ;
- ✓ évaluer les différents impacts socio-économiques et environnementaux des briquettes combustibles.

Les résultats des tests des briquettes (PCI, taux d'humidité, taux de matières volatiles, taux de cendres et le taux de carbone fixe ainsi que les tests de combustion contribueront à l'appréciation de ces briquettes vis-à-vis des autres combustibles (charbon du bois).

Ainsi, pour bien mener notre étude, nous avons adopté la méthodologie suivante :

- ✓ une étude de faisabilité technique par la production des briquettes et leur caractérisation ;
- ✓ une étude de faisabilité financière par une étude d'acceptabilité des briquettes combustibles par la population et une évaluation de la rentabilité d'une unité de production de ces briquettes ;

Après une présentation de la zone d'étude et un état d'art sur le briquetage, nous présenterons les méthodes et matériels utilisés suivis par les résultats obtenus avec les discussions, ensuite, nous évaluerons les débouchés économiques et nous terminerons par la conclusion.

II. GENERALITES

2.1 PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

2.1.1 Ville de Bujumbura

2.1.1.1 Géographie et hydrographie

La ville Bujumbura est la capitale politique et économique du Burundi (pays de l'Afrique de l'Est). Elle est l'une des 17 provinces du BURUNDI. Sa superficie est d'environ 110 km². Elle est située à l'Ouest du pays au bord du lac Tanganyika. Son climat est de type tropical avec quatre saisons :

- grande saison pluvieuse,
- petite saison pluvieuse
- grande saison sèche
- petite saison sèche

La ville de Bujumbura enregistre des températures moyennes de 24°C et sa pluviométrie va jusqu'à 1000mm/an.

2.1.1.2 Démographie

Bujumbura connaît une expansion rapide et une occupation anarchique des terres. Il est difficile d'estimer la population exacte vu l'occupation de la ville n'est pas stable. Un recensement a été faite en 2008, et la ville de Bujumbura comptait 497 166 habitants (ISTEEBU, 2008).

2.1.2 Trois communes : CIBITOKÉ, KAMENGE et KINAMA

Notre étude concerne la valorisation des déchets ménagers organiques, papiers et cartons dans les trois communes de la ville de Bujumbura situées au Nord de cette ville. Les caractéristiques de ces quartiers sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 1: Caractéristiques démographiques de la zone d'étude

Commune	Population	Nombre de quartiers	Nombre de ménages
CIBITOKÉ	60 235	7	10 419
KAMENGE	59 254	9	11 185
KINAMA	58 906	13	10 593

(CTB, 2013) sur base des données de l'ISTEEBU (2008).

N.B. Tous ces trois communes sont qualifiés de type A « populaires en voie de développement »

Depuis 2005, la ville de Bujumbura a été divisée en 13 communes comme la carte ci-dessous le montre :

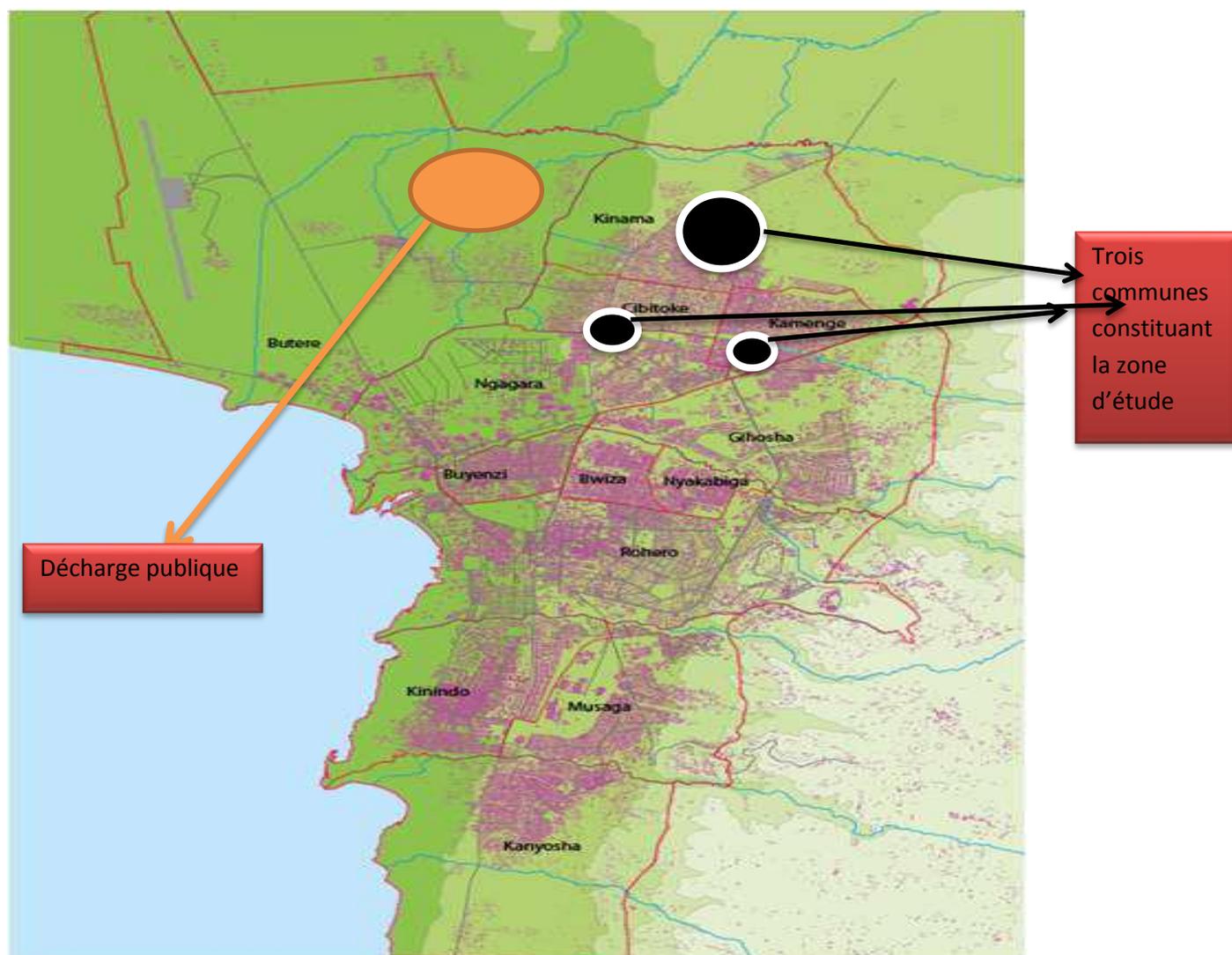


Figure 1: Carte de Bujumbura divisée en 13 communes

2.2 GESTION DES DECHETS MENAGERS A BUJUMBURA

Bujumbura, comme d'ailleurs d'autres villes africaines, présente un déficit dans la gestion des déchets solides. On observe partout dans les quartiers des immondices, des caniveaux transformés en décharges, des déchets en train d'être brûlés, etc. Dans cette ville, les eaux ruissèlent avec ces déchets dans des rivières qui, de leur tour se déversent dans le lac Tanganyika. D'où la pollution de ce dernier qui constitue actuellement la source principale des eaux de consommation. Plusieurs causes en sont responsables : mauvaise planification, non-adaptation des technologies de gestion de ces déchets, etc.

Bien que le manque des moyens financiers semble être la cause principale selon les acteurs dans le domaine de gestion des déchets, une meilleure politique est indispensable pour

instaurer tous les acteurs du domaine. La fixation des objectifs, la mise en place des stratégies pour y arriver, le contrôle devraient faire l'objet de cette politique.

Depuis 1983, la gestion des déchets solides en Mairie de Bujumbura a été confiée aux SETEMU (Services Techniques Municipaux). Le système des SETEMU est souvent freiné par le manque des moyens financiers, qui se manifestent par le manque de carburant et le manque d'entretien des véhicules de collecte. Face à l'incapacité technique et financière de SETEMU et à une augmentation et diversité des déchets ménagers produits dans la ville de Bujumbura, les pouvoirs publics ont décidé d'ouvrir le secteur de la collecte et de la gestion des ordures ménagères aux structures privées qui voulaient s'y investir. Ici on peut citer les associations comme : Burundi Family Cleaning, AJPE, BGC, EAMCO, etc.

En effet, les voies de valorisation sont moins connues. La gestion des OM se limite généralement à l'évacuation à la décharge qui est incontrôlée d'où l'augmentation de nuisances environnementales et sanitaires.

2.2.1 Décharge publique

En théorie, les déchets ultimes collectés dans la ville de Bujumbura par les services publics et privés de la gestion des OM sont acheminés directement vers la décharge située à BUTERERE. En revanche, on constate que de nombreux déchets sont déversés dans des dépotoirs sauvages. Le site de BUTERERE est une décharge non contrôlée et il n'y a eu aucun aménagement qui y a été fait pour recevoir ces déchets. Les camions de collecte viennent directement déverser les déchets sans tri, sans aucun traitement préalable. Il y a un grand risque de contamination de la nappe phréatique par le lixiviat car aucun système d'imperméabilisation ou de gestion de ce lixiviat n'a été mis en place. Aucune couverture n'est mise sur cette décharge pour éviter l'envol des déchets, ce qui fait qu'en passant dans la rue tout près de la décharge, on observe des déchets partout dans la rue. Vu la complexité de la nature, la composition des déchets et la non-adaptation de la décharge existante, la population environnante est exposée aux différentes maladies causées par les nuisances olfactives.



Figure 2: Décharge publique de Bujumbura

2.2.2 Législation sur la gestion des déchets au BURUNDI

Bien que le code de l'environnement au Burundi semble être ancien (2000), quelques articles stipulent clairement des dispositions liées à la gestion des déchets. Entre autres:

Article 120 : « Les déchets doivent faire l'objet d'un traitement adéquat afin d'éliminer ou de réduire leur effets nocifs sur la sante de l'homme, les ressources naturelles, la faune et la flore ou la qualité de de l'environnement en général. Toute personne qui produit ou détient des déchets dans les conditions de nature à entrainer des effets nocifs sur le sol, la flore et la faune, à dégrader les sites ou paysages, à polluer l'air ou les eaux, et d'une façon générale, à porter atteinte à la santé de l'homme et à l'environnement, est tenue d'en assurer ou d'en faire assurer l'élimination conformément aux dispositions du présent code et des textes pris pour son application. »

Article 121 : « Lorsque des déchets sont abandonnés, déposés ou traités en contravention avec les dispositions du présent Code et la réglementation en vigueur, l'administration concernée procède d'office à l'élimination desdits déchets aux frais des contrevenants ou des civilement responsables».

(Source : code de l'environnement du Burundi)

Le manque des textes d'application accentuent les problèmes de gestion des déchets urbains.

2.2.3 Caractérisation des déchets : Bujumbura

La caractérisation des OM produits à BUJUMBURA diffère selon les critères suivants :

- les activités menées
- le cadre de vie, etc.

En moyenne, la production spécifique des OM dans la ville de Bujumbura s'élève à **0.52Kg/hab./jr** (CTB, 2013). D'après cette même étude, les fractions souvent rencontrées dans les OM dans la ville de Bujumbura sont :

Tableau 2: Caractérisation des OM à Bujumbura

Matières organiques et inertes	86%
Papiers et cartons	2%
Textiles	3%
Sacs plastiques	4%
Plastiques durs	2%
Autres	3%

2.3 GESTION DES DECHETS : CAS DE KAMENGE, KINAMA ET CIBITOKÉ

La gestion actuelle des OM dans ces trois communes est assurée par les autorités communales avec l'appui technique du Programme Pavage de la CTB. D'une manière succincte, la filière de gestion des OM dans ces trois communes suit ce schéma :



Figure 3: Illustration du système de gestion des OM dans la zone d'étude

2.3.1 Pré-collecte

La décentralisation des pouvoirs au Burundi a fait que les autorités communales ont actuellement le devoir des mobilisations des fonds et de mise en place des systèmes de gestion des OM.

Avec l'appui technique de la CTB, un système de pré-collecte a été mis en place dans les trois communes : Kamenge, Kinama et Cibitoke. La pré-collecte se fait porte à porte à l'aide des charrettes à traction humaine. Les déchets produits sont principalement issus des ménages bien que des restaurants, marchés et d'autres petites activités économiques bénéficient également de cette pré-collecte. Une sensibilisation se fait pour que les producteurs de ces déchets mettent leurs ordures dans des sacs et les déposent devant leurs maisons pendant les jours de pré-collecte de chaque quartier. Avec une fréquence de ramassage d'une fois par semaine, tous les OM sont envoyés aux zones de transit. Le projet étant en phase de pilotage, l'enlèvement des ordures est déjà fonctionnel dans huit quartiers (sur 29 quartiers au total dans les trois communes) et 5 zones de transit reçoivent déjà les déchets qui y sont collectés.

- 3 ZDT dans la commune de Cibitoke;
- 1 ZDT dans la commune de Kinama ;
- et 1 ZDT dans la zone de Kamenge.

Le tri est effectué dans les zones de transit pour diverses valorisations. Ce sont surtout la fraction organique, les plastiques et le métal qui sont triés. Il est à signaler que le compostage utilisant est également en phase d'étude.

2.3.2 Collecte

La collecte ou transport des OM se fait à l'aide des camions bennes loués par les communes. La fréquence de collecte étant de 3 ou 4 jours par semaine (en fonction des déchets disponibles) avec une rotation par jour, les déchets ultimes sont directement évacués à la décharge publique de BUTERERE. La valorisation des OM aura absolument un impact positif sur la collecte (frais de transport et autres nuisances) car les quantités évacuées seront réduites.

2.3.3 Caractérisation des déchets : Kamenge, Kinama et Cibitoke

Les trois communes : Kamenge, Kinama et Cibitoke étant tous qualifiés des communes populaires en voie de développement, la production spécifique est de **0.47 Kg/hab./jr** avec une densité de **0.45 t/m³** (CTB, 2013). La plus grande fraction, comme le montre ce tableau est organique ; ce qui prouve le potentiel d'une valorisation des déchets organiques dans ces communes.

Tableau 3: Caractérisation des OM dans les quartiers populaires en voie de développement

Types de déchets	Pourcentage
Matières organiques et inertes	87.3%
Sachets plastiques	4.7%
Plastiques durs	1.1%
Papiers/cartons	1.2%
Verres	0.2%
Textiles	2.6%
Métaux	0.3%
Pierres + bois	1%

Couches BB	0.23%
Piles	0.1%
sacs poubelles des ménages	1.2%

2.4 ETAT DE L'ART DE LA FABRICATION DES BRIQUETTES COMBUSTIBLES

2.4.1 Aperçu général des briquettes

Une briquette est une forme de combustible solide produite à partir de la matière végétale. Elle peut être utilisée en substitution du charbon, du bois de chauffage,... pour la cuisson domestique voire la production de chaleur dans les industries (Hamish, 2012). Les principaux éléments qui constituent la biomasse, en général, et celle végétale en particulier, matière première des briquettes, sont le carbone, l'hydrogène, l'oxygène, l'azote et le soufre. Le carbone est l'élément important pour la valorisation énergétique de la biomasse grâce à son potentiel énergétique.

A part les briquettes carbonisées, on trouve également celles non carbonisées ; les briquettes carbonisées sont obtenues par la thermochimie en subissant une carbonisation contrairement aux briquettes non carbonisées qui sont obtenues par la densification directe des résidus. Comme différence, ces derniers exigent des pressions assez importantes pour pouvoir les densifier par rapport au char (produit de la carbonisation) qui est facile à compresser. Pour les caractéristiques de combustion, les briquettes non carbonisées dégagent plus de fumées que celles carbonisées et cela s'explique par le fait que la carbonisation réduit le taux de matières volatiles et par conséquent la quantité de fumées.

Le produit de la carbonisation est une poudre de charbon « char ». Ce procédé présente un avantage de produire des produits hautement valorisables, facilement stockables et transportables. Le char est riche en carbone fixe si la carbonisation est bien conduite.

La carbonisation utilisée lors de notre étude est un procédé artisanal, qui se déroule avec une quantité limitée d'oxygène au début pour permettre la combustion de la matière végétale.

2.4.2 Historique

Depuis de longues années, l'homme utilisait le charbon du bois. Ce dernier est obtenu par le même procédé que les briquettes carbonisées. Le but était d'avoir des produits facilement

transportables, propres lors de la combustion (peu de fumées, peu de cendres), meilleures pour les plats mijotés, etc. Après, est née la technique de carbonisation d'autres types de biomasse : résidus agricoles pour la production des briquettes. Cette biomasse étant peu dense et souvent jetée avec d'autres déchets ultimes, sa valorisation est à encourager.

2.4.3 Les briquettes combustibles en Afrique

La biomasse est actuellement utilisée dans la production des énergies vertes (Kers, et al., 2010). Dans certains pays de l'Europe et de l'Amérique, la densification des résidus agricoles en briquettes combustibles est devenue l'une des sources d'énergie. Néanmoins, en Asie et en Afrique, il y a eu des faillites dans cette filière dues à des mauvaises planifications mais aussi aux problèmes de marketing (Young, et al., 2003).

Plusieurs pays comme : Ouganda, Kenya, Malawi, Rwanda, Ethiopie, Haïti, Tanzanie, Mali, etc. ont déjà fait des études sur les briquettes combustibles à partir des déchets solides. La majorité des unités de production des briquettes dans ces pays déplorent des gros problèmes de vente ou des coûts élevés de maintenance des presses (surtout pour la densification des briquettes non carbonisées) ; cela est dû au fait que, généralement, les presses à haute pression sont fabriquées pour densifier des résidus spécifiques.

Les matières premières et les modes de production utilisées dans le processus de briquetage diffèrent du pays à l'autre selon la disponibilité de la biomasse et les moyens utilisés. Tous les déchets organiques n'ont pas le même potentiel énergétique d'où la nécessité d'optimiser la filière par la qualité des résidus et les techniques utilisées pour avoir le maximum possible d'énergie produite. La sciure, balle de riz, parchets de café, épis de maïs, poussières de charbon, feuilles de bananes, papiers et cartons,...sont les résidus les plus utilisés dans la production des briquettes.

Au moins 5% de la consommation du bois de chauffage et 50% de charbon de bois peuvent se substituer aux briquettes combustibles à base des déchets (DSM et résidus agricoles) en Ouganda (Hamish, 2012). D'où le potentiel des briquettes combustibles.

2.4.4 Processus de fabrication des briquettes

Comme on l'a vu en haut, deux principaux types de briquettes existent : carbonisées et non carbonisées. Suivant chaque type, les processus de production diffèrent. Notre étude se limitera à la description de la production des briquettes carbonisées :

D'une manière générale, elle suit les étapes suivantes :

2.4.4.1 Carbonisation

La carbonisation est une décomposition d'une matière carbonée par la chaleur. Au début, il y a présence d'oxygène qui permet la combustion incomplète de la matière végétale. Après, des conditions d'étouffement sans oxygène sont créées pour enfin donner le char comme produit.

En général, la biomasse est constituée de la lignine, l'hémicellulose et de la cellulose. Après décomposition de ces trois éléments, on obtient du char, H₂O, CO₂, H₂ et du CO. Par ailleurs, la poudre issue de la carbonisation (char) est composée à plus de 90 % d'atomes de carbone (si elle a été bien conduite), contenant plus de 80% de carbone fixe et ayant un PCI de 27-32 MJ/kg (COLLARD, 2012). Ce char est très friable et léger et doit donc subir une étape de densification pour être utilisé comme combustible.

Au cours de la carbonisation, il y a un dégagement, en grande quantité, des matières volatiles oxygénées. Par contre, des matières plus stables (noyaux aromatiques) contribuent à la formation du char.

2.4.4.2 Densification ou compression

Le char doit être compacté pour donner un produit solide et résistant (combustible). Un liant est donc nécessaire pour assurer la cohésion entre les particules du char. La farine de manioc et l'argile sont les liants les plus utilisés. Plusieurs types de presses sont utilisés selon les moyens et les types de matières premières disposés. On peut trouver: des presses manuelles, des presses mécaniques et des presses électriques.

III. METHODOLOGIE DE TRAVAIL

Cette partie portera sur la méthodologie suivie tout au long de notre étude. Sera présentée, en premier temps, le choix des MP, le choix de la composition des MP dans la production de briquettes, suivi par le processus de production de ces briquettes, leurs analyses physico-chimiques et les tests de combustion et enfin une brève étude de marché et une étude de rentabilité économique.

3.1 ETUDE DE FAISABILITE TECHNIQUE

3.1.1 Choix des matières premières

L'estimation des matières premières a été faite à l'aide d'un tri sélectif effectué sur la table de tri dans la zone de transit (ZDT) de Kinama (quartier NGOZI). Un suivi de tri a été fait

pendant trois jours. En se référant à la littérature qui a l'idée sur les résidus utilisés souvent dans la production des briquettes carbonisées, des résidus végétaux, difficilement fermentescibles sont couramment utilisés tels que : la balle de riz, les coques d'arachides, les feuilles de banane, la paille, etc. La zone de transit de Kinama a été ciblée pour cette étude et il est à préciser qu'elle couvre 4 quartiers de la commune de Kinama.

Notre choix s'est donc porté sur des spathes de maïs, des feuilles de banane, de mangue, la paille et les poussières de charbon. Pour notre étude, nous nous limiterons sur les spathes de maïs, feuilles de banane et poussières de charbon car ce sont eux qui étaient plus abondantes dans les déchets collectés.

Les quantités de ces MP dépendent des saisons de récolte (spathes de maïs par exemple) mais pendant la contre-saison, le gisement peut être compensé par d'autres comme les feuilles de banane, de mangue, etc.

3.1.2 Choix de la composition des briquettes combustibles

La composition se base généralement sur la proportion du liant à mettre. Sur base des expériences déjà faites (Sénégal, Madagascar), la proportion de liant varie entre 10% et 20%. Pour ce, des pré-tests ont été faits avant de décider sur la proportion à retenir. Ces pré-tests consistaient à faire brûler ces briquettes sur un fourneau et apprécier la facilité à l'allumage, la facilité d'ignition et voir si les briquettes arrivent à brûler jusqu'à la consommation.

Pour optimiser les qualités des briquettes, nous avons également considéré les combinaisons des matières premières.

3.1.3 Production des briquettes combustibles

3.1.3.1 Préparation des déchets

MP à carboniser

Les MP triées sont séchées au soleil (la température moyenne est de 24°C à Bujumbura) avant d'être carbonisées, au cas contraire, le taux élevé d'humidité rend le rendement de la carbonisation médiocre. Les matières premières de grande taille doivent être déchiquetées en petites pièces (15cm*15cm) pour faciliter la carbonisation.

Poussières de charbon

Les poussières de charbon ne sont pas triées. Elles sont collectées à part, dans les points de vente de charbon. Leur préparation a consisté à un tamisage à l'aide d'une moustiquaire (avec des mailles de 2mm*2mm) pour avoir des particules plus fines faciles à agglomérer.

Papier et cartons

Les papiers et cartons sont trempés dans l'eau pendant 4 jours et sont enlevés pour être déchiquetés en petites morceaux (environ 2cm²) faciles à densifier. Pendant ces 4 jours, les papiers sont mous, faciles à déchiqueter manuellement et par conséquent faciles à densifier. Ces papiers subissent directement la compression

3.1.3.2 Carbonisation

Un fût de 0.2 m³ (90cm de hauteur et 55cm de diamètre) a été utilisé pour la carbonisation. Ce fût a été acheté sur le marché et son volume est normalisé. Avant de l'utiliser, il a été troué de 6 trous au fond (10cm de diamètre). Ce modèle de fût ainsi que le principe de carbonisation ont été déjà testés au Royaume Uni. Ce modèle a été choisi du fait qu'elle est simple (le four moins cher et peut être fabriqué localement) mais également les résidus utilisés étaient de même catégories de nos MP.

Ainsi, pour mener à bien la carbonisation, les MP à carboniser doivent être bien secs (l'appréciation était visuelle). La carbonisation doit être bien suivie pour éviter la combustion totale qui ne donne que des cendres à la fin. Après avoir rempli le fût par les résidus végétaux, on le dépose sur trois grosses pierres pour permettre la pénétration de l'air facilitant la prise de feu des résidus. C'est à ce moment qu'on allume par-dessus (orifice d'alimentation) et par-dessous (à travers les trous). Après quelques minutes de combustion, si on voit que la plupart des résidus ont pris feu, on met une cheminée pour évacuer les fumées et créer un appel d'air pour stimuler la combustion. Après 5 minutes environ, une fumée légère et qui tend vers la couleur noire sort, et là on enlève la cheminée pour mettre le couvercle du fût. Il faut préciser que le fût doit être hermétiquement fermé avec la terre partout où l'air peut pénétrer. Cela évite la combustion totale des résidus. Par la suite, on attend le refroidissement du fût pour enlever le char. Bien que le principe suivi soit celui du Royaume Uni, la carbonisation artisanale révèle autant de l'art que de la science. Ce n'est qu'un guide à titre indicatif. Le temps dépend en quelques sortes des MP et des conditions externes (le vent par exemple), ce qui veut dire que rien ne remplace l'expérience.



Figure 4: Four à carboniser muni d'une cheminée

3.1.3.3 Préparation du liant

Pour assurer l'adhésion entre les particules du char et la solidité des briquettes combustibles, un liant a été ajouté. Dans cette étude, l'argile a été choisie comme liant. L'argile utilisée a été extraite dans la rivière NYABAGERE qui traverse la commune de CIBITOKÉ et KAMENGE. Elle est mélangée à l'eau (4 fois la quantité d'argile environ) pour former une pâte d'argile. Cette dernière est immédiatement mélangée au char et/ou aux poussières de charbons tamisés.

Notons que le liant n'était utilisé que pour le char et les poussières de charbon. Pour les briquettes en papier, un liant n'est pas nécessaire. Les papiers sont des matières fibreuses. Ils contiennent des protéines et les longues fibres cellulosiques qui assurent la liaison (Dermibas, 1997).

3.1.3.4 Densification (compression)

Au terme de la production des briquettes combustibles, des produits solides, résistants, denses faciles à transporter sont attendus; une compression du char et du poussier du charbon mélangé au liant est alors indispensable. Ces deux types de poudre ont une densité très faible. Donc, il doit, dès lors, subir une densification pour augmenter sa densité mais également donner la forme souhaitée à la briquette. Dans cette étude, une presse manuelle et une presse rotor ont été utilisées pour la densification en vue d'examiner les performances de chacune

d'elles. Elles ont été choisies pour les critères suivants: moins chères car elles sont fabriquées localement, simples à utiliser car elles ne demandent pas de main d'œuvre qualifiée et donnent des briquettes ayant une résistance acceptable. La taille des briquettes est de 5cm de diamètre et 5cm de hauteur. (Avec la presse manuelle)

La presse rotor a un fonctionnement similaire à un hachoir. En tournant son levier à la main ; une vis à l'intérieur assure la compression des MP mis dans sa cuve et la briquette sort par une moule installée à la sortie.

Quant à la presse manuelle, la moule étant à part, on la remplit de MP, et on la pose sous le piston et on compresse jusqu'à sentir une résistance à bout. Le démoulage de la briquette se fait facilement à l'aide de l'éjecteur.



Figure 6: Compression à la presse "rotor"



Figure 5: Compression à la presse manuelle

3.1.3.5 Séchage des briquettes

Après la densification, les briquettes sont toujours humides. Elles doivent être séchées avant d'être utilisées pour favoriser leur combustion. Le séchage s'est fait pendant 3 à 4 jours selon l'ensoleillement (ce séchage s'apprécie visuellement). Avant qu'elles soient bien sèches, des manipulations incontrôlées qui peuvent causer la dégradation des briquettes sont à éviter. Après le séchage, les briquettes sont prêtes à être utilisées.

NB: Les photos sur tout le processus de production des briquettes sont présentées en **annexe I**

3.1.4 Caractérisation des briquettes combustibles

La performance des briquettes est déterminée à partir des paramètres physico-chimiques tels que l'analyse immédiate et du pouvoir calorifique. L'objectif est de pouvoir dégager une comparaison avec le charbon du bois qui est le combustible le plus utilisé à Bujumbura.

3.1.4.1 Pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique d'un combustible représente la quantité d'énergie contenue dans une unité de masse de ce combustible. Elle s'exprime en terme d'énergie par unité de masse (pour les solides : MJ/Kg) et par unité de volume (pour les gaz : MJ/m³).

On parle de « pouvoir calorifique inférieur (PCI) », lorsque la combustion s'effectue à une pression constante c'est-à-dire à l'air libre. C'est à dire que la chaleur latente (qui est difficilement récupérable) de la vapeur d'eau n'est pas récupérée à ce moment (ADEME, et al. 2001). C'est cette valeur du PC qui est récupérable comme énergie par l'utilisateur.

Principe de mesure

Le PCI est déterminé à l'aide d'une bombe calorimétrique (PHYWE B1245) en présence d'oxygène et un suivi de température à chaque 30 sec doit être assuré jusqu'à la stabilisation. Sa détermination suit la norme française NF ISO, 2004.

3.1.4.2 Taux d'humidité

Le taux d'humidité d'une briquette combustible représente sa teneur en eau par rapport à sa masse humide. Il est à noter que le séchage des briquettes ne peut pas éliminer toute la quantité d'eau contenue dans une briquette. D'où l'humidité obtenue ici est la quantité d'eau restante après séchage des briquettes. C'est un paramètre déterminant pour la combustion des briquettes : s'il est élevé, la combustion est quasi-impossible.

Principe de mesure : L'échantillon est chauffé dans une étuve CARBOLITE R38 à 105 °C et on effectue une pesée après 24h. Sa détermination suit la norme européenne EN 14774. La valeur trouvée a été vérifiée par celle obtenue par la thermo-balance ADAM PMB53 qui, à 105°C, donne automatiquement la valeur du taux d'humidité après 12minutes. Le taux d'humidité (avec une étuve) est obtenu par la formule suivante :

$$W(\%) = \frac{M \text{ humide} - M \text{ seche}}{M \text{ humide}} * 100$$

Avec : W : taux d'humidité; M humide : masse de l'échantillon ; M sèche : masse obtenu après chauffage à 105°C à l'étuve.

3.1.4.3 Taux de matières volatiles

Les matières volatiles d'un combustible est la partie de la MO qui s'échappe sous forme de gaz pendant sa combustion. Le taux de MOV cautionne l'inflammabilité du combustible.

Principe de mesure : Le même échantillon utilisé pour trouver le taux d'humidité est chauffé dans un four a moufle Nabertherm B180 à une température allant jusqu' à 550 °C. Sa détermination suit la norme française NF, 1985. Le taux de matières volatiles est déterminé par la perte de masse pendant ce chauffage. La formule suivante permet de calculer le taux de

$$\text{matières volatiles : } MOV = \frac{M_{105^{\circ}C} - M_{550^{\circ}C}}{M_{\text{humide}}} * 100$$

Avec : MOV : Taux de matières volatiles, M_{105°C} : Masse obtenu après chauffage à 105°C, M_{550°C} : masse obtenu après chauffage 550°C.

3.1.4.4 Taux de cendres

Le taux de cendres représente la quantité des matières minérales contenues dans un combustible. Il est important pour l'appréciabilité du combustible du fait que quand il est très élevé, ces cendres deviennent obstacle à la progression de la combustion.

Principe de mesure : Le taux de cendres est obtenu par le chauffage de l'échantillon jusqu'à 850°C dans un four a moufle Nabertherm B180. Sa détermination suit la norme européenne EN 14775. Le taux de cendres est déterminé par la masse des résidus après incinération. Le résultat est obtenu avec la formule suivante :

$$A(\%) = \frac{M_{850^{\circ}C}}{M_{\text{humide}}} * 100$$

Avec : A : taux de cendres, M_{850°C} : masse de la poudre obtenu après incinération à 850°C, M_{humide} : masse de l'échantillon.

3.1.4.5 Taux de carbone fixe.

Généralement, si la carbonisation est bien conduite, le char contient environ 80% de carbone fixe. Élément indispensable dans la composition des briquettes et autres combustibles, le carbone fixe a un grand potentiel énergétique. C'est la quantité de carbone restante après élimination des matières volatiles, des cendres et de l'humidité. Il est différent de carbone total qui est la somme du carbone fixe et le carbone contenu dans la partie volatilisé.

Le taux de carbone fixe a été déterminé en suivant la norme ASTM et il est calculé avec la formule suivante :

$$Cf(\%) = \frac{M550^{\circ}C - M850^{\circ}C}{M550^{\circ}C}$$

NB. Le matériel de détermination de tous les paramètres physico-chimiques est présenté en **annexe II**

3.1.5 Tests de combustion

L'objectif était d'apprécier la combustion des briquettes produites. Il s'agissait de comparer le temps mis par ces briquettes pour bouillir une même quantité d'eau, le temps de consommation mais aussi de faire des observations visuelles sur les fumées, les cendres et les odeurs en comparaison avec le charbon du bois. Nous avons procédé comme suit :

- Mettre séparément 0.8 Kg de briquettes combustibles et 0.4 kg de charbon de bois sur le foyer ; les analyses du PCI ont révélé que 0.8Kg de briquettes a presque le même contenu énergétique que 0.4 Kg de charbon. Des marmites, fourneaux de mêmes caractéristiques ont été utilisés dans les mêmes endroits pour garantir les mêmes conditions environnantes.
- Avec 3 morceaux de charbon du bois qui ont déjà pris feu, attiser le feu aux briquettes
- Attendre que les briquettes prennent feu et mettre la casserole contenant 1l d'eau ;
- laisser que l'eau bouille, attendre la fin d'ébullition, enlever la marmite et laisser les briquettes/charbon du bois brûler jusqu'à la consommation.

Un chronomètre nous a permis de noter, à chaque intervalle, le temps écoulé.

3.2 ETUDE DE FAISABILITE ECONOMIQUE

3.2.1 Etude du marché

Une enquête auprès de la population dans les deux communes Kinama et Cibitoke a été faite. Elle avait comme objectif principal l'étude d'acceptation de la population sur l'utilisation des briquettes et évaluer la potentialité du marché des briquettes combustibles.

Pour ce, 10 petits restaurants et 35 ménages ont été interviewés dans les deux communes (CIBITOKÉ et KINAMA). (Le questionnaire de cette enquête est présenté en **annexe III**). Notons que cette enquête est considérée comme pré-enquête pour donner une idée sur la perception de la population sur les briquettes au service marketing de la CTB chargé de la

commercialisation des produits issus des différentes valorisation des déchets dans les ZDT pour enfin préparer une étude de marché rigoureuse.

En plus de l'interview, des échantillons ont été distribués à quelques ménages pour évaluer l'acceptabilité de ces briquettes par la population. 6 ménages parmi les enquêtés et plus de 15 employés des ZDT ont reçues ces briquettes. Il leur a été demandé de cuisiner toute la journée avec ces briquettes à la place du charbon du bois, faire des commentaires sur les fumées, les cendres et odeurs et le temps de consommation. La quantité variait selon leurs utilisations habituelles du charbon du bois. Après, nous avons recueillis des retours de la part de ces ménages.

3.2.2 Evaluation de la rentabilité économique

Le calcul de rentabilité qui se focalise principalement sur les investissements, le coût de production et les recettes, nous a permis d'analyser la viabilité économique de la filière. Les calculs se sont effectués sur des briquettes retenues comme meilleures. Nous avons considéré une unité de production des briquettes combustibles dans une seule ZDT (celle de Kinama). Le temps de retour sur l'investissement a été utilisé comme paramètre d'évaluation de la rentabilité d'une unité de production des briquettes. Il se calcule par la formule suivante :

$$TRI = \frac{\text{coût d'investissement}}{\text{Bénéfice}}$$

IV. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Ce chapitre a pour but de présenter les résultats auxquels notre méthodologie a abouti c'est-à-dire obtenus à toutes les étapes de production des briquettes combustibles. Nous allons présenter les résultats de l'étude de faisabilité technique et ensuite ceux de l'étude de faisabilité économique.

4.1 ETUDE DE FAISABILITE TECHNIQUE

4.1.1 Choix de la composition pour les briquettes

Le tableau 4 montre les proportions des matières premières retenues après les pré-tests de cuisine. La meilleure proportion d'argile retenue est de 10%. 5% de cendres ajoutée au papier (Briq P95 A5) avait pour but de voir si les matières minérales influent sur la réduction des fumées des briquettes en papier.

Tableau 4: Composition des MP (matières premières) pour le briquetage

Numero des tests	Matières premières utilisés
B.S90	Spathes de maïs (90%) + argile (10%)
B.B90	Feuilles de banane (90%) + argile (10%)
B.S20 B20 C50	Feuilles de banane (20%) + spathes de maïs (20%) + poussières de charbon (50%) + argile (10%)
B.P 75 C25	Papier (2/3) + poussières de charbon (1/4)
B.P100	Papier 100%
B.C90	Poussières de charbon 90%+argile 10%
B.P95 A5	Papier 95%+cendres5%
Charbon du bois ³	Témoin

4.1.2 Tests physico-chimiques des briquettes combustibles

Pour ces analyses, le taux d'humidité qui sera représenté est le pourcentage de la teneur en eau du combustible à l'état naturel (humide) alors que les valeurs des trois paramètres (taux de matières volatiles, taux de cendres et le taux de carbone fixe qui seront présentées ont été analysées sur la matière sèche. Ces analyses ont été effectuées dans le laboratoire de physico-chimie de l'Université du Burundi. Les résultats détaillés sont présentés en **annexe IV**.

4.1.2.1 Humidité

La figure 7 montre les résultats obtenus après l'analyse de l'humidité pour tous les 7 types des briquettes et le charbon du bois.

Les briquettes présentent un taux d'humidité faible qui varie entre 7-10%. On constate que le charbon du bois a un taux d'humidité très faible (5.28%) par rapport aux briquettes. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que le charbon subit plusieurs jours de séchage avant sa vente voire même son utilisation. Les B.P95 A5 affichent un taux d'humidité élevé (16%). Ceci s'explique par le fait que le séchage lors de notre étude se faisait par une appréciation visuelle (3-4jours). Les conditions climatiques peuvent changer d'un jour à l'autre d'une part et d'autre part le mode de production des briquettes en papier qui sont trempées dans l'eau pendant plusieurs jours peut aussi affecter le taux d'humidité.

³ Il s'agit du charbon du bois le plus utilisé : celui issu de l'eucalyptus

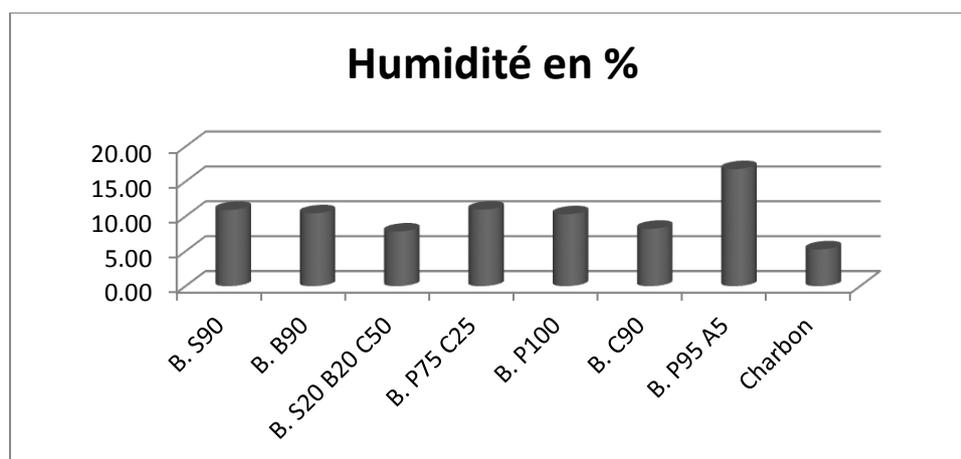


Figure 7: Taux d'humidité des briquettes et charbon du bois

4.1.2.2 Taux de matières volatiles, taux de cendres et taux de carbone fixe

La figure 8 montre la répartition en % de ces trois paramètres (MOV, A et Cf) dans la matière sèche des combustibles considérés. On constate que :

- ✓ les taux en MOV des briquettes en papiers sont plus élevés que ceux des briquettes à base des déchets organiques. (Plus de 70% pour le papier et moins de 30% pour les déchets organiques). Le taux en MOV des briquettes à base des déchets organiques se justifie par la carbonisation qui élimine une grande partie des matières gazeifiables. Plus les MOV sont importantes, plus le combustible est fumant. Le charbon du bois possède un taux en MOV supérieur à celui des briquettes à base des déchets organiques. Ces résultats sont similaires à ceux trouvés par Njenga. et al. (2009) montrant le charbon du bois possède un taux en MOV supérieur à celui des briquettes carbonisées (Onuegbu, et al., 2011).
- ✓ On constate que le taux de cendres du charbon est très faible par rapport aux briquettes. Ceci s'explique par l'argile (riche en matières minérales) utilisée pour les briquettes. Le faible rendement (10%) de la carbonisation influe également sur le taux de cendres car plus le rendement est faible, plus le char contient plus de cendres que de carbone fixe. Le four « 3 fûts » pourrait faire l'objet des tests d'amélioration de rendement de la carbonisation dans les prochaines études. Il s'agit d'un gros four de carbonisation muni de 3 fûts à l'intérieur. Ce four joue le rôle d'isolant en réduisant

les pertes de chaleur. Il présente de bons rendements par rapport à un four simple selon des tests réalisés au Sénégal. (cfr annexe V).

- ✓ le carbone fixe du charbon du bois est considérablement élevé vis-à-vis des briquettes. Ceci se justifie par la lignine contenue dans le bois et qui a un fort pouvoir énergétique. Notons que le Cf renseigne sur le PCI. Plus il est important, plus le PCI est important.

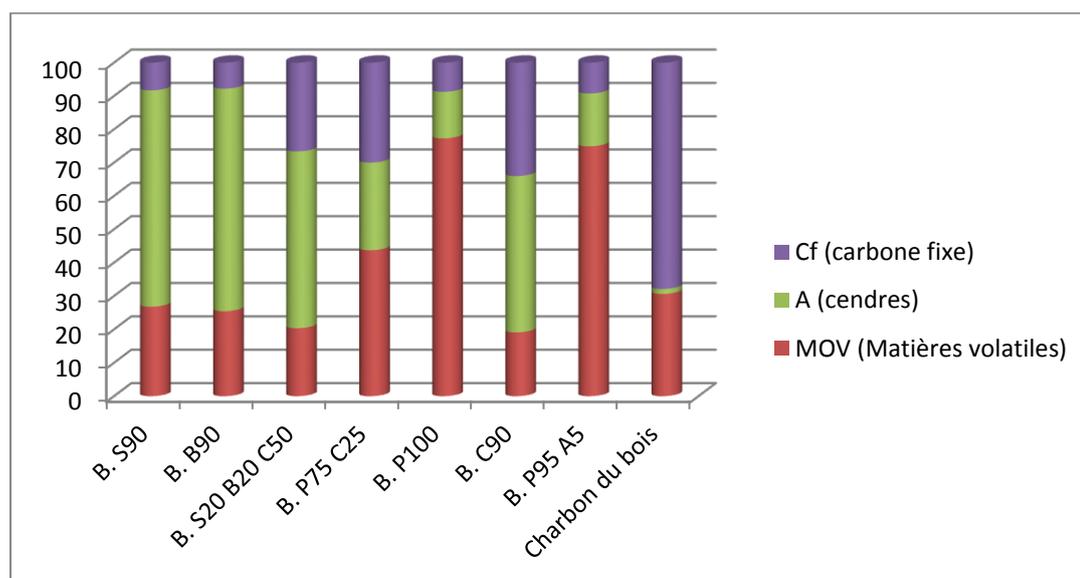


Figure 8: Taux de MOV, A, Cf des briquettes et charbon du bois

4.1.2.3 Pouvoir calorifique

La figure 9 montre que le charbon du bois a un PCI fortement élevé par rapport aux briquettes (30MJ/Kg pour le charbon et 13Mj/Kg pour les briquettes). Ces résultats sont proches par ceux trouvés par MIZERO (2011) sur le même type de charbon du bois (32.5 MJ/Kg). Ceci est dû à la lignine dont la décomposition donne un taux élevé de carbone fixe et par conséquent du PCI (COLLARD, 2012). L'argile utilisée dans la production des briquettes réduit le PCI car elle est riche en matières minérales.

Les briquettes issues du papier ont également un PCI supérieur à celles issues des déchets ménagers. Parmi ces dernières, les briquettes issues exclusivement du char ont un PCI faible (environ 8MJ/Kg). Ceci pourrait s'expliquer par le rendement faible de la carbonisation qui donne du char contenant un taux élevé de cendres en réduisant celui du carbone fixe.

L'ajout des particules du charbon donne aux briquettes issues de la biomasse la durabilité et la solidité (Phonphuak, et al., 2011). Ceci justifie le fait que les B.C90 et B.S20 B20 C50 (13 MJ/Kg) ont un PCI supérieur aux briquettes B.S90 (9MJ/Kg) et B. B90 (8MJ/Kg).

Egalement, les poussières de charbon, ajoutées au papier font augmenter le PCI (14MJ/Kg pour B.P75 C25 et 13 MJ/Kg pour B.P100). Ceci se justifie par le taux élevé de carbone fixe contenu dans le charbon.

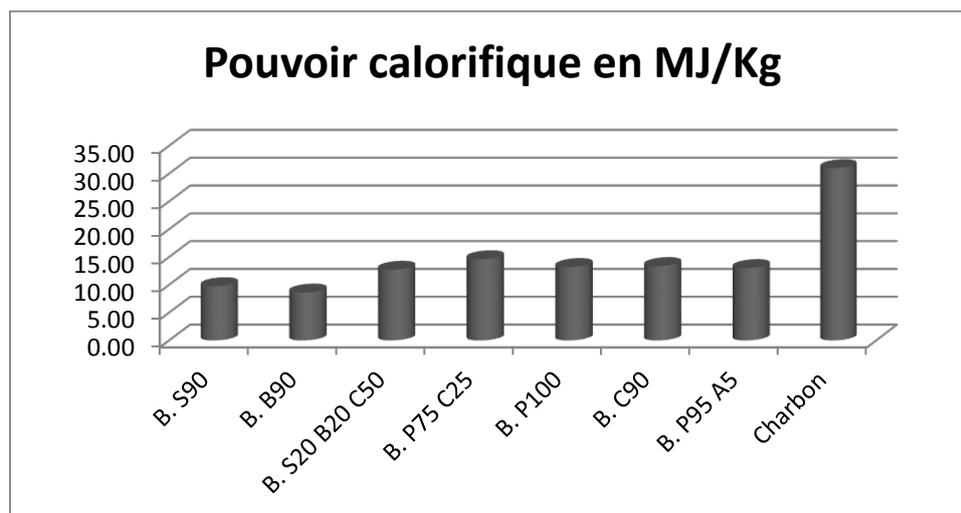


Figure 9: Résultats du pouvoir calorifique

4.1.3 Tests de combustion

La figure 10 ci-dessous montre les résultats obtenus lors des tests de combustion effectués en faisant bouillir 1L d'eau. Les résultats détaillés sont présentés en **annexe VI**.

En général, la prise de feu a été facile pour toutes ces briquettes mais la durée mis pour bouillir l'eau et celle de consommation diffère. On peut remarquer que ce sont les briquettes en papier qui mettent moins de temps pour bouillir l'eau (12minutes) mais par contre leur temps de consommation est court (environ une heure). L'ajout des poussières de charbon augmente le temps de consommation des briquettes en papier mais également réduit les fumées dégagées. Ces résultats sont proches de ceux trouvés au KENYA qui prouvent que les briquettes papier plus poussière de charbon ne dégagent pas beaucoup de fumées et sont faciles à allumer (Njenga, et al., 2009).

Par contre, l'ajout de 5% de cendres ne semble pas avoir une influence significative sur le dégagement des fumées des briquettes en papier (B.P95 A5). La présence des fumées restent le point faible des briquettes en papier.

Le temps d'ébullition du charbon du bois est inférieur à celui des briquettes à base des déchets organiques grâce à son PCI élevé. Par contre le temps de consommation de ces briquettes (3heures et 20minutes) est supérieur à celui du charbon du bois (2heures et 10minutes). Cela est dû à l'argile qui, en augmentant la solidité de la briquette, augmente son temps de consommation. Le point faible de ces briquettes à base des déchets organiques est qu'elles sont très cendreuse à cause de l'argile. Ces résultats sont proches de ceux trouvés au Sénégal par GTZ (2006) qui disent que le charbon se consomme plus vite que les briquettes à base des poussières de charbon mais présentent un taux élevé de cendres.

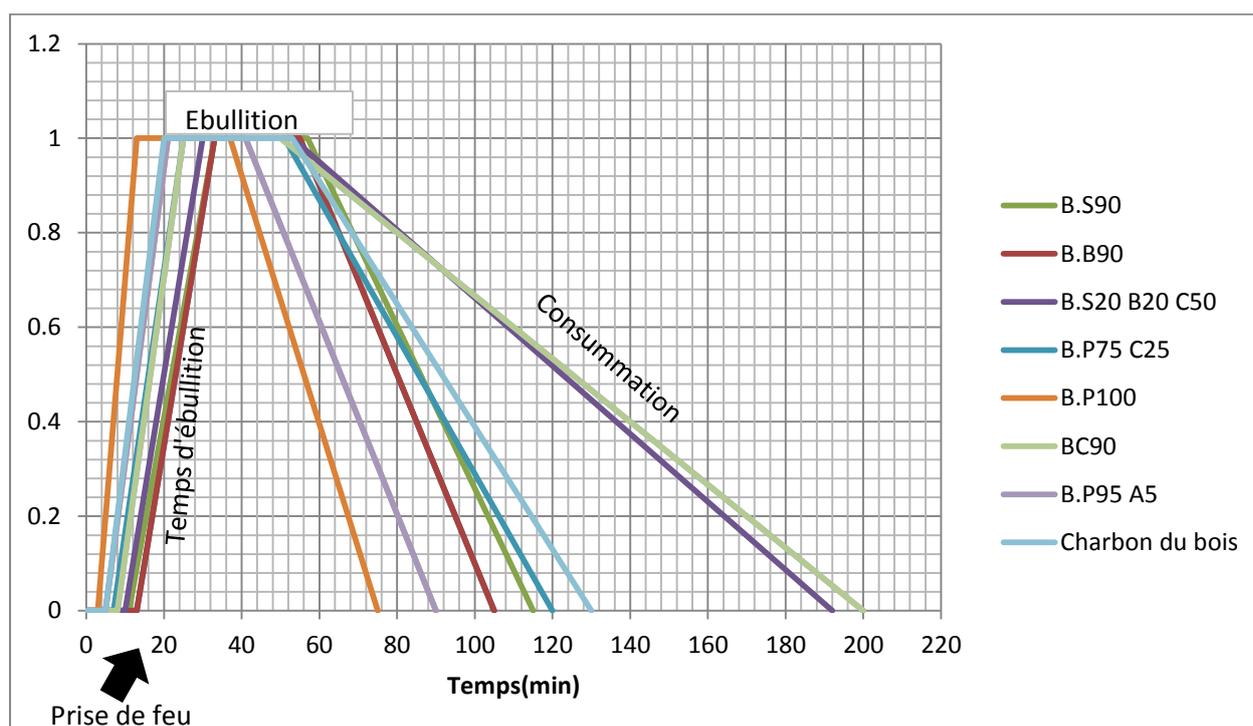


Figure 10: Résultats des tests de combustion pour les briquettes et charbon du bois

Relation entre les analyses physico-chimiques et les tests de cuisine

Ces deux types d'analyses de briquettes qui ont été réalisés lors de notre étude révèlent une cohérence entre eux. Par exemple, les briquettes issues des déchets ménagers sont caractérisées par un taux élevé de cendres et les tests de cuisine le confirment. Cependant, les

poussières de charbon qui ont été ajoutées au char (B.S20 B20 C50) ont eu un impact positif notamment sur le taux de cendres, le carbone fixe et le PCI ; les tests de cuisine le confirment. Les briquettes en papier sont caractérisées par des taux élevés en matières volatiles par rapport aux autres et l'ajout des poussières de charbon au papier diminue fortement ce taux de MOV (ce qui se manifeste par la réduction des fumées et de flamme pendant la combustion) et augmente le PCI.

De ces deux types de résultats, nous pouvons conclure que :

- ✓ les B.S20 B20 C50 et B.C90 sont les meilleures des briquettes issues des déchets ménagers car elles sont moins cendreuses que celles issues du char et ont un fort PCI. Leur temps de consommation est également long.
- ✓ les B.P75 C25 sont les plus meilleures des briquettes en papier car elles dégagent moins de fumées que celles issues exclusivement du papier (B.P100) et ont un fort PCI.

4.2 ETUDE DE FAISABILITE ECONOMIQUE

4.2.1 Etude du marché

A l'issu des résultats, en moyenne 65% des enquêtés connaissent déjà les briquettes non carbonisées mais personne n'a jamais essayé les briquettes carbonisées ; 100% des enquêtés ont affirmé que ces briquettes carbonisées sont introuvables sur le marché raison pour laquelle elles ne sont pas utilisées dans les ménages.

Dans les deux communes (Cibitoke et Kinama), tous les enquêtés utilisent le charbon comme combustible. A Kinama, on trouve quelques-uns qui utilisent le bois de chauffage comme deuxième combustible. Le charbon coûte en moyenne 625BIF/Kg et ce charbon est satisfaisant selon 62% des enquêtés. Pour les autres, des fois, ce charbon est souvent de mauvaise qualité ou même des fois il y a une insuffisance dans les points de vente. Pour les restaurants, un combustible qui dure longtemps est préférable car ils préparent continuellement dans la journée.

La majorité des enquêtés à Cibitoke, s'est montrée prête à payer les briquettes si elles brûlent bien avec moins de fumées et si elles sont moins cher que le charbon. Cependant, à Kinama, plus de 90% dit qu'il suffit que les briquettes soient moins chères et brûlent bien (peu importe les fumées ou cendres), elles seront achetées. Pour les ménages à qui ont été distribuées les

briquettes en vue de tests de cuisson, 100% disent qu'ils pourront payer ces briquettes si leur prix est moins cher au charbon à cause des cendres qu'elles produisent.

A travers ces résultats, nous pouvons sans doute constater que les briquettes combustibles sont moins connues par la population. Cela s'explique par le fait qu'il n'existe pas des entreprises de production des briquettes carbonisées pour le moment au Burundi et même les briquettes non carbonisées produites au Burundi sont actuellement vendus dans les camps militaires ou les camps des réfugiés. Cependant, la population manifeste leur soif pour les autres alternatives de combustibles à cause du prix très élevé ainsi que sa rareté du charbon du bois.

En conclusion, les enquêtés affirment que la combustion de ces briquettes les satisfait et qu'une fois disponibles sur le marché, elles seront payées à condition que leur prix soit inférieur à celui du charbon du bois. Ce qui s'explique par le fait que les enquêtés étant des habitants des quartiers populaires en voie de développement, le prix est le facteur le plus déterminant dans le marketing.

4.2.2 Evaluation de la rentabilité économique

Avec les résultats de la faisabilité technique, 3 types de briquettes ont été retenues comme meilleures. Il s'agit de B.S20 B20 C50 et B C90 pour les déchets ménagers et B.P75 C25 pour le papier. La rentabilité économique pour les briquettes en papier n'a pas été abordée suite au manque des données. En effet, les écoles et bureaux administratifs d'où viennent ces papiers ne sont pas encore adhérents au système de gestion des OM de notre zone d'étude, donc nous n'avons pas pu quantifier leur gisement.

Après les observations faites dans la zone de transit de Kinama recevant les déchets de 4 quartiers (environ 4 000 ménages), nous avons émis des hypothèses de calcul qui nous ont permis d'obtenir les résultats des coûts.

Scenario 1: B.S20 B20 C50

- 200 kg de déchets organiques sont triés par 2 personnes par jour (4 quartiers sont couverts par la collecte dans la zone de transit de Kinama) ;
- 2 personnes assurent la carbonisation et la préparation du liant;
- 300Kg de poussières de charbons sont recueillis après tamisage par 4 personnes par jour qui sont également chargées de la récolte d'argile.

- 70Kg de briquettes produites par jour par 2 personnes avec la presse manuelle à temps plein et 50Kg par la presse rotor. Signalons que dans les calculs, la presse manuelle a été retenue grâce à sa capacité de production journalière élevée.



Figure 11: Presse rotor



Figure 12: Presse manuelle

Scenario 2 : B.C90

- 300Kg de poussières de charbon sont tamisés par 4 personnes par jour qui sont également chargées de la récolte de l'argile.
- Une presse manuelle a la capacité de production de 70Kg/jour par 2 personnes.

Les tableaux suivants (5 à 8) montrent les coûts d'investissement et de production d'une unité de fabrication des briquettes dans la zone de transit de Kinama.

Tableau 5: coût d'investissement scenario 1

Investissement Scenario 1(B. S20 B20 C50)

Matériels	Quantité	Prix unitaire (BIF)	Prix total	Durée de vie	Amortissement
Four avec cheminée	4	100000	400000	2	200000
Presse manuelle	4	100000	400000	2	200000
Brouettes	2	65000	130000	2	65000
Divers			250000	1	250000
Total			1180000		715000

Tableau 6: coût de production scenario 1

Coût de production Scenario1 (B.S20 B20 C50)

	Nombre	salaire/personne/mois (BIF)	Salaire annuel
Trieurs	2	75000	1800000
Agents de carbonisation, et préparation du liant	2	75000	1800000
Tamiseurs de poussières de charbon	4	75000	3600000
Producteurs (compression)	8	75000	7200000
Amortissement			715000

Maintenance (5% de l'investissement)			59000
Total			15174000

Tableau 7: coût d'investissement scenario 2

Investissement Scenario 2 (B. C90)

Matériels	Quantité	Prix unitaire (BIF)	Prix total	Durée de vie	Amortissement
Presse manuelle	4	100000	400000	2	200000
Brouettes	2	65000	130000	2	65000
Divers			150000	1	150000
Total			680000		415000

Tableau 8: coût de production scenario 2

Coût de production Scenario 2 (B.C90)

	Nombre	salaire/personne/mois (BIF)	Salaire annuel
Tamiseurs de poussière de charbon	4	75000	3600000
Producteurs (compression)	8	75000	7200000
Amortissement			415000
Maintenance (5% de l'investissement)			34000
Total			11 249 000

Le tableau 9 montre les coûts de production par unité de poids des briquettes pour les deux scénarios. Il représente le rapport entre les coûts de production annuels et la quantité produite annuellement des briquettes.

Tableau 9: Coût de production/Kg de briquettes

	Coût de production/Kg de briquette (BIF)
Scenario 1	200 ou 0.1 euros
Scenario 2	150 ou 0.08 euros

En effet, le prix du charbon du bois au marché dans les trois communes varie entre 600 et 650 BIF. Le prix de vente d'1 Kg de briquettes a été fixé à 300BIF. Ce prix a été fixé en tenant compte du PCI des briquettes (inférieur à celui du charbon du bois) et du temps de consommation des briquettes (supérieur à celui du charbon du bois).

Les résultats obtenus des bénéfices annuels et du temps de retour sur l'investissement (TRI) sont présentés dans le tableau 10.

Tableau 10: Temps de retour sur l'investissement d'une unité de production des briquettes combustibles

	Bénéfices annuels	TRI
Scenario 1	6 666 000 ou 3330 euros	2 mois
Scenario 2	10 591 000 ou 5290 euros	0.8mois

Pour les B.C90, à moins d'1 mois, les bénéfices auront couverts les coûts d'investissement alors que pour la production des B.S20 B20 C50, le TRI est d'environ 2mois. Bien que le second scénario ait un TRI supérieur au premier, il faut noter que le premier a l'avantage de valoriser non seulement des résidus de charbon mais également des déchets ménagers organiques.

4.3 ANALYSE DES IMPACTS SOCIO-ECONOMIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX

La valorisation des OM organiques en briquettes combustibles répond aux besoins urbains tels que la génération des revenus et le maintien de la qualité de l'environnement. Ainsi, les trois composantes bénéficient de cette valorisation :

4.2.2 Impacts environnementales et sanitaires

4.2.2.1 Préservation des forêts

Il est évident que la production des briquettes combustibles à partir des OM permet la sauvegarde de ressources forestières. Même si le bois est théoriquement considéré neutre vis-à-vis des émissions de carbone, si la déforestation est plus amplifiée que la régénération, cette situation idéale n'est pas concédée : c'est le cas actuel du BURUNDI qui est exposée à une forte déforestation.

Le tableau 11 indique le nombre d'hectares de boisement qui seraient protégés en cas d'une production journalière de 280 Kg/jour de briquettes combustibles sur la zone de transit de Kinama couvrant 4 quartiers. En effet, un hectare (1ha) de boisement âgé de 10 ans peut fournir 9.63tonnes de charbon de bois si la carbonisation se fait avec la meule traditionnelle (environ 10% de rendement) (MIZERO, 2011). En considérant un PCI de 13,5 MJ/Kg pour les briquettes et 30 MJ/Kg pour le charbon du bois, nous avons calculé l'équivalent des briquettes produites annuellement en charbon du bois.

Tableau 11: Sauvegarde des ressources forestières en cas de substitution du charbon du bois aux briquettes combustibles

Briquettes produites/an	Equivalent en charbon du bois	Boisement sauvegardée/an
72 800 Kg	32 760 Kg	3.4 ha

4.2.2.2 Effets sur le changement climatique

Le Burundi n'est pas écarté du réchauffement climatique. La hausse de la température moyenne au Burundi au 21^e siècle a été au-dessus de la moyenne planétaire (1.5°C au Burundi et 0.74°C au niveau mondial) (SABUSHIMIKE, 2008). Ce qui interpelle les scientifiques à lancer des études sur les technologies propres. N'oublions pas que pendant la décomposition des OM, il y a dégagement des gaz à effet de serre (CH₄ et CO₂). Nous pouvons alors dire que la production des briquettes contribue à l'atténuation de ces gaz en réduisant la quantité des matières organiques à évacuer à la décharge.

4.2.2.3 Impacts sanitaires

D'après les résultats, les briquettes combustibles sont moins fumantes que le charbon du bois. Ces fumées sont nuisibles à la santé humaine. Nous pouvons alors conclure que l'utilisation de ces briquettes aura un impact positif sur les maladies respiratoires

4.2.3 Impacts sociaux

Les personnes à faible revenus sont les premiers à profiter de l'utilisation des briquettes combustibles par la génération des emplois. L'approche participative de ce projet permettra à la population de se former sur la potentialité énergétique des OM et les nouvelles technologies des énergies renouvelables. Les briquettes combustibles sont propres par rapport au bois de chauffage. Leur utilisation assure la propreté dans les ménages, et donc l'amélioration du cadre de vie. Ajoutons que les briquettes sont compatibles avec les appareils existants car elles peuvent être utilisées dans les foyers habituels des utilisateurs de charbon.

4.2.4 Impacts économiques

En plus de la technique de production qui est simple, l'utilisation des briquettes combustibles comme source d'énergie vient consolider l'économie par la création d'emplois et la diminution des dépenses pour les utilisateurs. Ces briquettes sont facilement accessibles à la population et réduit la dépendance vis-à-vis des autres combustibles. D'ailleurs, pour les communes, les fonds alloués au transport des déchets vers la décharge seront réduits.

4.2.5 Analyse FFOM ou SWOT

Ce modèle renseigne sur les forces, les faiblesses, les opportunités et les menaces auxquelles une unité de production peut faire face pendant le marketing. C'est un modèle qui permet, non seulement de se contenter sur des points positifs mais également analyser les dysfonctionnements que peut avoir une unité commerciale. Il permet de discerner les relations aussi complexes qu'il peut y avoir, entre l'environnement externe (opportunités et menaces) et l'interne (forces et faiblesses).

<p style="text-align: center;"><u>Forces</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Avantage environnementale (sauvegarde du bois et réduction du volume des déchets à évacuer à la décharge) • Une briquelette combustible est une source d'énergie renouvelable • Les briquettes brûlent plus longtemps que le charbon de bois • Investissements moins importants grâce à l'utilisation du matériel moins coûteux • main d'œuvre non qualifiée 	<p style="text-align: center;"><u>Faiblesses</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Le taux de cendres des briquettes est très élevé par rapport au charbon de bois • La production des briquettes sera conditionnée par des enjeux politiques et financiers qui pourront influencer le système de gestion des déchets et par conséquent la disponibilité des MP. • Les caractéristiques de combustion du charbon qui est le plus utilisé sont meilleures (PCI élevé) par rapport aux briquettes combustibles
<p style="text-align: center;"><u>Opportunités</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Les restaurants, les petits maquis et les ménages proches de la zone de production, sont les clients potentiels • Prix compétitif vis-à-vis du charbon de bois 	<p style="text-align: center;"><u>Menaces</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Il s'agit d'une nouvelle filière au Burundi qui pourra être fortement concurrencée

5 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES D'AMELIORATION

5.1 Conclusion générale

La gestion des déchets ménagers solides reste un défi majeur pour nos autorités. La diversité, la quantité énorme des déchets ménagers ainsi que les décharges non conformes à la réglementation incitent de nos jours le recours à la valorisation de ces déchets.

Notre étude avait pour objet la valorisation des déchets ménagers organiques, papiers et cartons pour la fabrication des briquettes combustibles dans les trois communes Kinama, Kamenge et Cibitoke de la ville de BUJUMBURA. Cette valorisation rentre dans le cadre de gestion durable des ordures ménagères et participera à l'atténuation des pressions faites aux ressources forestières. Ces briquettes peuvent se substituer au charbon du bois et sont compatibles avec les foyers habituellement utilisés dans les ménages.

A l'issue des résultats physico-chimiques et les tests de combustion, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- ✓ Les briquettes issues exclusivement du char sont de mauvaises qualités (trop cendreuse avec faible un PCI). Il est donc nécessaire d'y ajouter des poussières de charbon. Par contre les poussières du charbon à elles seules ou en mélange avec le char (50% ou plus de poussières de charbon) produisent de bonnes briquettes ;
- ✓ les briquettes combustibles (retenues comme meilleures) ont environ un PCI deux fois moins le PCI du charbon du bois ; il s'agit de B.C90 et B.S20 B20 C50) ;
- ✓ les briquettes issues des déchets ménagers organiques ont en général un temps de consommation plus long que celui du charbon du bois, ne dégagent pas de fumées mais sont plus cendreuse que le charbon du bois ;
- ✓ les briquettes en papier présentent de bons résultats de PCI mais par contre, elles dégagent beaucoup de fumées par rapport au charbon du bois et les autres briquettes. Pour y pallier il faudrait ajouter des poussières de charbon.

L'étude économique s'est faite sur une zone de transit recevant actuellement les déchets de 4 quartiers. Le projet concerne au total 29 quartiers. D'après les résultats, les briquettes combustibles issues des DMS organiques sont rentables avec un TRI maximum de 2 mois. Leur production requiert du matériel fabriqué localement et d'une main d'œuvre non qualifiée. Une pré- étude de marché nous a révélé que la population est prête à payer ces

briquettes avec un prix moins bas que celui du charbon. Un long temps de consommation des briquettes constituera un atout majeur pour les utilisateurs.

5.2 Pistes d'amélioration

Au terme de notre travail, en vue d'optimisation de la filière valorisation des ordures ménagères en briquettes combustibles, nous recommandons ce qui suit :

1. La disponibilité des matières premières constituent une limite importante de cette étude. Pour ce faire, envisager la collecte dans les ateliers de menuiserie, les points de décorticage de riz ou du café proches du lieu de production pour augmenter le gisement des déchets ménagers organiques à carboniser. Caractériser ces déchets pour étudier leur faisabilité technique.
2. Le rendement de carbonisation des fûts actuels est faible (8-10%) d'où la quantité des résidus végétaux après carbonisation devient très faible. Pour l'augmenter, tester le four « 3 fûts » ; bien assurer la surveillance durant toute la procédure de carbonisation pour empêcher que le char soit cendreux. Le séchage des matières premières et celui des briquettes constituent également une limite pour ce système du moment où il ne se fait que par une appréciation visuelle.
3. Envisager un système de broyage mécanique pour réduire les pertes de poussières de charbon (refus au tamisage) et la main d'œuvre nécessaire au tamisage ;
4. Envisager des presses rotor « type haïtien » pour augmenter capacité de production (42Kg/h selon l'expérience au Sénégal). La photo de cette presse est présentée en **annexe VI**.
5. Centraliser toutes les productions des briquettes dans les ZDT dans un lieu de production unique pour tous les trois communes. Cela nécessitera sûrement des moyens de transport supplémentaires des matières premières mais facilitera la bonne gestion de cette valorisation. Au cas où les techniques de production sont optimisées (broyage, presse), la production journalière sera importante et par conséquent il y aura une forte demande en matières premières. Cette centralisation sera à mesure de pallier à ce problème d'insuffisance de matières premières.

BIBLIOGRAPHIE

- ADEME, Critt Bois, Fibois, & CTBA. (2001). *Mesure des caractéristiques des combustibles bois*.
- BEMB, G. C. (2009). *Le traitement des ordures ménagères et l'agriculture urbaine et périurbaine dans la ville de Bertoua*. Cameroun: Institut National de la Jeunesse et des Sports - Conseiller Principal de Jeunesse et d'Animation 2009.
- COLLARD, X. F. (2012). *Nouvelles stratégies catalytiques pour la gazéification de la biomasse: influence de métaux imprégnés sur les mécanismes de pyrolyse*. Burkina Faso: 2iE.
- CTB. (2013). *Etude du potentiel de valorisation des déchets ménagers solides de Bujumbura*. Bujumbura: Le Ministère de l'eau, de l'environnement, de l'aménagement du territoire et de l'urbanisme conjointement avec le Ministère de l'intérieur.
- Dermibas, A. (1997). Physical properties of briquettes from waste paper and wheat straw mixtures. *Karadeniz Technical University, Department of Science Education, 61365 Akcaabat-Trabzon, Turkey*, 437-445.
- Ferguson, H. (2012). *Briquette businesses in Ouganda: The potential for briquette enterprises to address the sustainability of the Ougandan biomass fuel market*. Ouganda: GVEP International.
- GTZ. (2006). *Tests de cuisine comparés: charbon de bois et bio-charbon, agglomération par "rotor press". Deux liants: l'argile et la farine*. Sénégal: Promotion de l'Electrification Rurale et de l'approvisionnement durable en combustibles domestiques.
- Hamish, F. (2012). *Briquette businesses in Ouganda: The potential for briquette enterprises to address the sustainability of the Ugandan biomass fuel market*. Ouganda: GVEP International.
- ISTEEBU. (2008). *Rapport du recensement général de la population et de l'habitat du BURUNDI 2008*. Bujumbura: Ministère de l'intérieur, bureau central de recensement.
- JUNG, G. C. (2013). Voies de traitements de déchets solides: valorisation matière et énergie. *Université Libre de Bruxelles (ULB) – Centre Emile Bernheim - Service 4MAT*, 50-54.
- K.Jacob. (2007). Recycling Waste into Fuel Briquettes.
- Kers, J., Kulu, P., Aruniit, A., Laurmaa, V., Krizan, P., Soos, L., et al. (2010). Determination of physical, mechanical and burning characteristics of polymeric waste material briquettes. *Estonian Journal of Engineering*, 2010, 16, 4, 307–316.
- Kibwage, J. K., Munywe, S. N., Mutonyi, J., Savala, C. N., & Wanyonyi, E. (2007). Recycling Waste into Fuel Briquettes. 5.
- MATEKE, N. J.-A. (2009). *Etude de la carbonisation-pyrolyse du bois d'eucalyptus par méthode thermogravimétrique*. 2iE.

- MIZERO, M. (2011). *Contribution à l'élaboration d'une stratégie de gestion des déchets solides en milieu urbain: cas de la ville de Bujumbura*. Burundi: Université du Burundi.
- Njenga, M., Karanja, N., Prain, G., Malii, J., Munyao, P., Gathuru, K., et al. (2009). Community-based energy Briquette production from urban organic waste at Kahawa Soweto. Informal settlement, Nairobi. *ISSN 1811-1440, Urban Harvest*.
- Onuegbu, T., Ekpunobi, U., Ekeoma, M., & Obmselu, F. (2011). Comparative studies of ignition time and water boiling test of coal and biomasse briquettes blend. *1Department of Pure and Industrial Chemistry, Nnamdi Azikiwe University, Awka, Anambra State,, 153-159*.
- Peter, Y. S. (2003). Feasibility and Impact Assessment of a Proposed project to Briquette Municipal waste for use as a cooking fuel in RWANDA.
- Phonphuak, N., & Thiansem, S. (2011). Using charcoal to increase properties and durability of fired test briquettes. *Department of Physics and Materials Science, Faculty of Science, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand, 612-618*.
- SABUSHIMIKE, J. M. (2008). *Evaluation des impacts économiques du changement climatique au Burundi*. BURUNDI: UNIVERSITE DU BURUNDI.
- Singh, M. R. (2010). Les champs produisent du combustible: du charbon de bois est fabriqué à partir des résidus agricoles.
- Young, P., & Khennas, S. (2003). *Feasibility and Impact Assessment of a Proposed project to Briquette Municipal waste for use as a cooking fuel in RWANDA*. Rwanda: Intermediate Technology Consultants (ITC).

Sites internet

<http://www.legacyfound.org/> consulté le 29 Mai 2014

ANNEXES

Annexe I: Différentes étapes de production des briquettes combustibles	42
Annexe II: Mode opératoire d'analyse de PCI	44
Annexe III: Matériels de détermination des paramètres physico-chimiques.....	46
Annexe IV: Fiche d'enquête	47
Annexe V: Résultats physico-chimiques des briquettes et du charbon du bois	49
Annexe VI: Four "3 fûts"	50
Annexe VII: Résultats des tests de combustion	51
Annexe VIII: Presse rotor du type "haïtien"	53

Annexe I: Différentes étapes de production des briquettes combustibles

Au début, des déchets végétaux sont brûlés par-dessus et par-dessous.



Photo 1: Combustion des résidus au début de la carbonisation



Photo 2: Pose de cheminée



Photo 3: Tamisage des résidus de charbon



Photo 4: Compression

Annexe II: Mode opératoire d'analyse de PCI

Dans un premier temps, l'appareillage est étalonné avec une pastille d'acide benzoïque pour mesurer la masse en eau (bombe calorimétrique et ses accessoires) :

- Les échantillons sont broyés pour avoir une granulométrie inférieure à 0.2 mm, ils sont ensuite pesés à 0.1 mg près à l'aide de la balance analytique.
- L'échantillon est placé dans la coupelle et on introduit 2 ml d'eau distillée à l'intérieur de la bombe.
- Le dispositif d'allumage est préparé en reliant les deux électrodes par un fil de fer pesé au préalable.
- La bombe calorimétrique est fermée hermétiquement et placée dans le calorimètre dans lequel on a préalablement versé 850 g d'eau du robinet. Elle est ensuite chargée en oxygène à une pression de 10 à 11 bars alimentée à partir d'une bombonne à gaz.
- Un thermomètre est introduit et l'agitation est mise pour homogénéiser la température de l'eau contenue dans le calorimètre.
- La combustion est déclenchée électriquement par un court-circuit. Le fil de fer fond en enflammant la substance. La température s'élève rapidement.
- Un suivi de la température d'eau est effectué toutes les trente secondes avant et après la combustion jusqu'à l'obtention d'un plateau linéaire de refroidissement.
- Lorsque la température est constante au bout de quelques minutes, la bombe calorimétrique est démontée pour vérifier que la combustion est complète (ni dépôt de suie ni carbone résiduel).

La formule appliquée pour trouver la masse en eau est la suivante :

$$E = \frac{\left(\frac{771 \times p}{A}\right)^{+q}}{T1 - T2}$$

Dans cette formule:

E : Equivalent en eau du calorimètre, (la bombe, les accessoires et l'eau du calorimètre)

771 kcals : Chaleur molaire de combustion de l'acide benzoïque

p : Quantité d'acide benzoïque utilisée

q : Quantité de chaleur dégagée par l'oxydation du fil de clavecin (1600 calories/g de fer)

A : Masse molaire de l'acide benzoïque

Des corrections doivent être apportées pour tenir compte :

- des acides formés lors de la combustion et qui peuvent être dosés avec des solutions de carbonate de sodium et d'hydroxyde de baryum s'il y en a eu.
- de la chaleur de combustion du fil d'allumage (par pesée puis calcul)

Modèle de calcul

Le pouvoir calorifique supérieur est déterminé par la formule suivante :

$$Py = \frac{(4.1868 \times E) \times (tm - ti + c) - (a + b)}{M}$$

Source : (ADEME, 2001)

Dans la formule ci-dessus :

Py : est le pouvoir calorifique supérieur du combustible analysé (y = charbon ou briquette)

E = Equivalent en eau du calorimètre (la bombe calorimétrique, ses accessoires et l'eau introduite dans la bombe)

ti = Température initiale en degrés Celsius,

tm = Température maximale en degrés Celsius,

a = Correction nécessitée par la formation des acides (celle-ci est nulle)

b = Correction nécessitée par la chaleur de combustion du fil d'allumage,

c = Correction de température nécessitée par l'échange de chaleur avec l'extérieur. Celle-ci est nulle car le calorimètre utilisé est adiabatique.

M = Masse de la prise d'essai en grammes

4,1868 : facteur de conversion des calories en joules

Annexe III: Matériels de détermination des paramètres physico-chimiques



Photo 5: Thermo balance ADAM PMB53



Photo 6: Four à moufle Nabertherm B180

Annexe IV: Fiche d'enquête

Fiche de renseignement des clients « Briquettes combustibles »

Briquettes

1. Connaissez-vous les briquettes de combustion ?
 Oui
 Non
2. Utilisez-vous ces briquettes ou les avez-vous au moins essayées ?
 Oui
 Non
3. Si oui, comment avez-vous trouvé ces briquettes ?
.....
.....
4. Quel est votre fournisseur ou votre lieu d'approvisionnement ?
.....
5. Si vous ne les utilisez pas, pourquoi ?
.....
6. Seriez-vous prêts à les essayer ?
 Oui
 Non
7. Combien êtes-vous prêts à payer pour 1Kg de briquettes ?
.....

Autres combustibles

8. Qu'est-ce que vous utilisez pour cuire vos repas ?
 - Bois
 - Charbon
 - Autres (A spécifier).....
9. Etes-vous satisfaits ?
 Oui
 Non
Pourquoi ?.....
.....
10. Quelle quantité utilisez-vous par jour ?.....
11. Combien dépensez-vous en combustibles par jour pour cuire vos aliments ?
.....
12. Combien de repas préparez-vous par jour ?.....
13. Trouvez-vous que le prix des combustibles est trop cher pour le moment ?
 Oui
 Non

14. Si oui, souhaiteriez-vous voir naitre d'autres alternatives meilleures marché ?

.....
.....

COMMENTAIRES

.....
.....

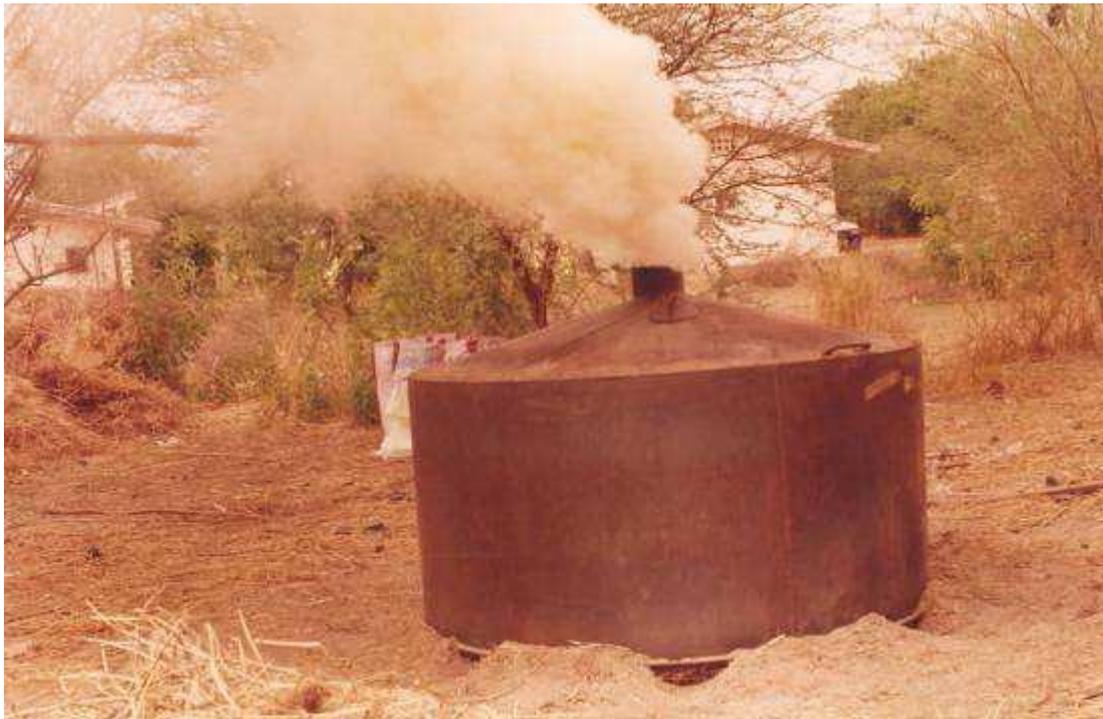
Age :..... Sexe :

Quartier :..... Taille du ménage:.....

Annexe V: Résultats physico-chimiques des briquettes et du charbon du bois

Combustibles	W en %	MOV en %	A en %	Cf en %	PCI en MJ/Kg
B. S90	10.94	26.81	64.88	8.31	9.75
B. B90	10.45	25.46	66.72	7.82	8.6
B. S20 B20 C50	7.84	20.36	53.01	26.63	12.71
B. P75 C25	10.98	43.72	26.31	29.97	14.6
B. P100	10.32	77.27	13.98	8.75	13.19
B. C90	8.23	19.12	46.85	34.03	13.36
B. P95 A5	16.78	74.91	15.84	9.25	13
Charbon du bois	5.28	30.63	1.5	67.87	30.97

Annexe VI: Four "3 fûts"



Ce four contient trois fûts à l'intérieur. Ce four extérieur joue le rôle d'isolant pour réduire les pertes de chaleur et par conséquent augmenter le rendement de la carbonisation. Il a été testé au Sénégal pour la carbonisation de la balle de riz, les coques d'arachide, le typha...

Annexe VII: Résultats des tests de combustion

Types de briquettes combustibles	Temps pris pour prendre feu	Fumée émise	Temps d'ébullition	Temps pour rester à ébullition	Temps mis pour être consommé	Observations (odeur, cendres, chaleur)
B.S90	11 min	Pas de fumées	22 min	24 min	1h 55min	Après quelques dizaines de minutes, une grande quantité de cendres rend difficile la combustion et si on secoue le fourneau, les briquettes se cassent car elles sont très fragiles, moins résistantes
B.B90	13min	Pas de fumées	20min	22min	1h45min	Idem B.S90
B.S20 B20 C50	10min	Pas de fumées	20 min	23min	3h 12min	Bonne combustion, secouer et ventiler régulièrement le foyer pour faire descendre les cendres à travers les trous du fourneau
B.P 75 C25	7 min	Peu de fumées	18 min	26min	2h 30min	Bonne combustion, peu de cendres
B.P100	3min	Trop de fumées	10min	24min	1h15min	Bonne combustion, présence de flamme, trop de cendres, une odeur gênante
B.C90	8min	Pas de fumées	17min	25 min	3h 20min	Une très petite flamme, pas d'odeur,

						besoin de secouer le fourneau pour faire descendre les cendres freinant la bonne combustion
B.P95 A5	5 min	Trop de fumées (moins par rapport au test 5)	16min	20min	1h30min	Bonne combustion, présence d'une petite flamme, beaucoup de cendres et une odeur gênante
Charbon du bois	5		15	28min	2h 35	Bonne combustion, petite flamme, peu de fumées, moins de cendres

Annexe VIII: Presse rotor du type "haïtien"



Cette presse testée par la GTZ au Sénégal a une forte capacité de production. Elle est d'origine haïtien et peut être adaptée selon les formes de briquettes voulues.