

BURKINA FASO  
UNITE - PROGRES - JUSTICE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET DE L'INOVATION

.....  
UNIVERSITE POLYTECHNIQUE DE BOBO-DIOULASSO

.....  
INSTITUT DU DEVELOPPEMENT RURAL



MEMOIRE DE FIN DE CYCLE  
*Présenté en vue de l'obtention du*  
DIPLOME D'INGENIEUR DU DEVELOPPEMENT RURAL

OPTION : Eaux et Forêts

THEME :

Optimisation énergétique et conditionnement du  
tourteau solide de beurre de karité sous forme de  
briquettes combustibles.

Présenté par : NAKOULMA LASSANÉ

Maîtres de stage : M. Loïc SIMMONOT

Co-maître de stage : M. Etienne PERRIER

Directeur de mémoire : Dr Jean Baptiste ILBOUDO

N° : .....2016/GAEF

AVRIL 2016

## DEDICACE

AU NOM D'ALLAH LE TOUT MISÉRICORDIEUX, LE TRÈS MISÉRICORDIEUX.

A MES PARENTS POUR TOUT CE QUE VOUS AVIEZ FAIT POUR MA RÉUSSITE, POUR L'AMOUR QUE VOUS ME PORTIEZ, POUR L'ESPRIT DE TOLÉRANCE ET D'HUMILITÉ QUE VOUS M'AVIEZ INCULQUÉ.

A MES FRÈRES, SŒURS ET AMIS

JE DÉDIE LE FRUIT DE CE TRAVAIL

## REMERCIEMENTS

La réalisation de ce document a été possible grâce à la contribution de plusieurs personnes. Je tiens à exprimer mes sincères reconnaissances et remerciements à tous ceux qui ont contribué à sa réalisation. Ainsi, mes remerciements vont à l'endroit :

- Du **Docteur Jean Baptiste ILBOUDO**, Enseignant à l'Institut du Développement Rural (IDR), notre Directeur de mémoire pour le suivi et l'attention critique qu'il a portés à notre travail ; pour les conseils et suggestions qui nous ont été d'une grande utilité pour la rédaction de ce document;
- De **Monsieur Loïc SIMONNOT**, Coordinateur de l'ONG RONGEAD-Bobo, et **Monsieur Etienne PERRIER** Ingénieur énergéticien, nos encadreurs techniques pour d'abord, nous avoir accepté dans la structure RONGEAD, pour l'encadrement technique, leurs disponibilités et conseils qui ont permis l'aboutissement de ce travail ;
- Du **Professeur Aboubacar TOGUYENI** enseignant/Chercheur à l'IDR, pour ses conseils précieux et orientations ;
- De **Monsieur Inoussa COMPAORE**, Enseignant à l'IDR, dont nous avons bénéficié de son encadrement, à savoir l'analyse statistique de nos données et les multiples corrections qu'il a apportées au document malgré ses occupations. Votre contribution et votre grande sympathie nous resteront toujours en mémoire ;
- Du **Dr Mipro HIEN**, pour ses conseils et orientations qui nous ont été très bénéfiques ;
- De **Monsieur Lamoussa KOALA**, Ingénieur des Eaux et Forêts, pour nous avoir encouragé moralement et soutenu techniquement tout au long de cette étude. Votre simplicité nous ont vraiment marqué ;
- De **Monsieur Moussa WEREME**, Ingénieur de recherche du département énergie de l'IRSAT/Bobo pour ses conseils multiples et son soutien technique ;
- De **Monsieur Paul Manéré OUEDRAOGO**, Analyste de marché de produits agricoles au RONGEAD-Bobo pour ses conseils et son assistance morale ;
- De **Monsieur Ousmane TOURE**, Adjoint administratif au RONGEAD-Bobo, pour sa disponibilité dans les procédures administratives ;
- De **Monsieur Ibrahim COULIBALY**, Agent technique au RONGEAD pour sa disponibilité et son appui inestimable à la réalisation de nos activités de terrain ;

- De l'ensemble du personnel de RONGEAD-Bobo et d'Agropol pour l'environnement agréable de travail qu'ils ont créé autour de nous et pour leur franche collaboration lors de notre stage ;
- De l'ensemble des camarades de la promotion 2012 de l'IDR pour leur soutien et la fraternité qui a toujours régné entre nous ;
- De tous ceux dont les noms n'ont pu être cités pour leur soutien multiforme, qu'ils trouvent ici, l'expression de notre profonde gratitude.

## TABLE DES MATIERES

DEDICACE.....	i
REMERCIEMENTS .....	ii
SIGLES ET ABREVIATIONS.....	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	viii
LISTE DES FIGURES.....	ix
RESUME.....	x
ABSTRACT .....	xi
INTRODUCTION.....	1
PREMIERE PARTIE: REVUE DE LA LITTERATURE.....	3
I. Energie au Burkina Faso.....	4
1.1. Différentes sources d'énergies domestiques au Burkina Faso .....	4
1.1.1.  Energies traditionnelles.....	4
1.1.2.  Energies modernes .....	5
1.2.  Contraintes énergétiques du Burkina Faso.....	6
1.3. Etat des lieux de la valorisation énergétique des sous-produits industriels au Burkina Faso .....	7
II. Différents procédés de valorisation des produits et sous-produits industriels et agricoles .....	9
2.1. Valorisation énergétique de la biomasse par voie thermochimique.....	9
2.2.  Valorisation énergétique de la biomasse par voie biochimique.....	10
2.3. Transformation de la biomasse en combustible .....	10
2.3.1. Outils de transformation de la biomasse en briquettes combustibles.....	11
2.3.1.1. Presses mécaniques .....	11
2.3.1.2. Presses manuelles.....	14
2.4. Chaîne de densification .....	14
2.4.1. Préparation des résidus.....	14
2.4.2. Principe de la densification .....	14
2.5. Caractéristiques générales des produits densifiés .....	15
2.5.1. Dimension .....	16
2.5.2. Densité.....	16
2.5.3. Taux d'humidité.....	17

2.5.4. Pouvoir calorifique .....	17
2.5.5 Taux de cendre .....	17
DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET METHODES .....	18
I.  MATERIELS .....	19
1.1.  Présentation de la zone d'étude .....	19
1.1.1.  Situation géographique.....	19
1.1.2.  Relief.....	19
1.1.3.  Sols.....	20
1.1.4.  Végétation .....	20
1.1.5.  Faune/Pêche .....	20
1.1.6.  Hydrographie.....	21
1.1.7.  Climat.....	21
1.1.8.  Milieu humain .....	22
1.2.  Matériel de la fabrication des briquettes .....	23
1.2.1.  Matière première .....	23
1.2.2.  Liants.....	24
1.3.  Matériel de compactage du tourteau .....	24
1.4.  Matériel de test d'ébullition de l'eau.....	25
II.  METHODOLOGIE .....	27
2.1  Conditionnement du tourteau.....	27
2.1.1.  Préparation du liant .....	28
2.1.2.  Densification de la matière première .....	28
2.1.3.  Fabrication du combustible .....	28
2.3.  Test d'Ebullition de l'Eau (TEE) ou Water boiling test (WBT).....	32
2.3.1.  Déroulement du test d'ébullition de l'eau .....	32
2.3.2.  Mesure des variables .....	33
TROISIEME PARTIE: RESULTATS- DISCUSSION.....	36
I.  RESULTATS .....	37
1.1.  CONDITIONNEMENT DU TOURTEAU DE KARITE SOUS FORME DE BRIQUETTES COMBUSTIBLS .....	37
1.1.1.  Briquettes sans liants.....	37
1.1.2  Briquettes avec liant .....	46
1.1.3.  Caractéristiques du combustible.....	49
1.1.3.1.  Dimensions.....	49

## **SIGLES ET ABREVIATIONS**

**CEDEAO:** Communauté Economique des Etats de l'Afrique de l'Ouest

**CEMAC:** Communauté Economique et Monétaire de l'Afrique Centrale

**CDI/CRA:** Centre pour le Développement Industriel - Centre de Recherches Agronomique de Gembloux.

**CEFREPADE :** Centre Francophone de Recherche Partenarial sur l'Assainissement, les Déchets et l'Environnement.

**DDO:** Diesel Distillate Oil

**DGE:** Direction Générale de l'Energie

**FAO:** Food and Agricultural Organisation (Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture)

**GIZ :** Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit

**IRSAT :** Institut de Recherches en Sciences Appliquées et Technologies

**INSD :** Institut National des Statistiques et de la Démographie

**MCM-PF :** Ministère Chargé de Missions auprès du Président du Faso

**ONG :** Organisation Non Gouvernementale

**PREDAS:** Programme Régional de Promotion des Energies Domestiques et Alternatives au Sahel

**RGPH :** Recensement Général des Populations et des Habitations

**SN-SOSUCO :** Nouvelle Société Sucrière de la Comoé

**SONABEL:** Société Nationale Burkinabé d'Electricité

**SONABHY :** Société Nationale Burkinabé des Hydrocarbures

**SOPAL:** Société de Production d'Alcool

**SOS :** Save Our Self

**SOTOKACC :** Société Toussiana Karité Comestibles et Cosmétiques

**TEE:** Test d'Ebullition de l'Eau

**UEMOA :** Union Economique et Monétaire Ouest Africaine

**UGPPK-Houet:** Union des Groupements des Productrices de Produits Karité du Houet

**WBT:** Water Boiling Test

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Valeurs caractéristiques de quelques produits densifiés .....	15
Tableau 2: Dimensions de quelques produits densifiés .....	16
Tableau 3: Densité des produits densifiés .....	16
Tableau 4: Répartition de la population de la commune de Koundougou. ....	22
Tableau 5 : Paramètres étudiés pour le conditionnement du tourteau en briquettes (sans liant) .....	29
Tableau 6: Briquettes fabriquées en fonction de divers paramètres (tourteau de baratte et de presse).....	30
Tableau 7: Différentes recettes utilisées dans la fabrication des briquettes.....	31
Tableau 8: Nombre de briquettes cassées et leur durée de vie (teneur en eau initiale de 53,5%) .....	39
Tableau 9: Influence de la pression appliquée sur le temps et l'efficacité du séchage (tourteau baratte/ tourteau de presse).....	41
Tableau 10: Variation du temps de séchage en fonction de la qualité de la briquelette souhaitée. ....	42
Tableau 11: Influence de la présence ou non d'un cylindre creux au centre de la briquelette sur le temps et l'efficacité du séchage (baratte/ presse).....	43
Tableau 12: Résultat du test de résistance au choc des briquettes .....	47
Tableau 13: Moyennes des variables de caractérisation et de mesure d'efficacité des foyers (phase 1) .....	51
Tableau 14: Moyennes des variables de caractérisation et de mesure d'efficacité des foyers (phase 2).....	53
Tableau 15: Moyennes des variables de caractérisation et de mesure d'efficacité des foyers (phase 3) .....	54

## **LISTE DES FIGURES**

Figure 1: Presse à piston.....	12
Figure 2 : Schéma de la presse à vis japonaise à manteau chauffant .....	12
Figure 3: Schéma de la presse à granuler avec matrice annulaire.....	13
Figure 4: Localisation de la commune rurale de Koundougou. ....	19
Figure 5: Evolution de la pluviométrie et du nombre de jours de pluies de 2007 à 2015 dans la commune rurale de koundougou. ....	21
Figure 6: Perte d'humidité en fonction du type de tourteau.....	40
Figure 7: Comparaison des deux types de séchages. ....	43

## **LISTE DES ANNEXES**

Annexe 1 : Photos de quelques briquettes.....	B
Annexe 2 : Aperçu des deux types de grilles du foyer à marmite unique (GIZ) .....	C
Annexe 3 : Schéma technique de la nouvelle grille adaptée aux briquettes de tourteau de karité (foyer GIZ) .....	D
Annexe 4: Description des trois phases du test d'ébullition de l'eau (TEE).....	E
Annexe 5: Formules de calcul des variables mesurées. ....	G
Annexe 6: Fiche de collecte de données du test d'ébullition de l'eau. ....	J
Annexe 7 : Quelques résultats intermédiaires du test d'ébullition de l'eau (water boiling test)J	
Annexe 8: Presse à vis motorisée de type BRADES. ....	M

## **RESUME**

L'énergie est un facteur clé du développement économique et social tant pour les pays développés que pour les pays en développement. Dans le contexte de pression sur la ressource forestière en vue de la satisfaction des besoins énergétiques, d'autres sources d'énergie sont nécessaires pour préserver et protéger l'environnement. C'est dans ce cadre que notre étude vise à proposer un combustible alternatif au bois dans les unités de production de beurre de karité. L'objectif général est de conditionner le tourteau de karité sous forme de briquettes combustibles et de proposer un type de foyer amélioré performant qui utilise efficacement ce combustible. Ce travail a été réalisé dans la commune rurale de Koundougou dans la province du Houet au Burkina Faso. Plusieurs formes de briquettes avec des recettes différentes de liant ont été réalisées en utilisant une presse simple à double levier en vue de trouver la forme la plus adaptée. Aussi des séries de tests d'ébullition de l'eau ont été réalisés sur deux types de foyers améliorés en utilisant les briquettes comme combustible dans le but de connaître le plus efficace. Les résultats obtenus montrent qu'il est possible de compacter le tourteau de karité sous forme de combustible en utilisant une presse simple fabriquée localement. Les briquettes de petites tailles avec un trou au centre sèchent plus vite et sont plus aptes à se consumer par rapport à celles qui sont pleines ou de grandes tailles. L'étude révèle que les briquettes sont plus solides avec l'amidon (gommy blanc) comme liant. En ce qui concerne les tests d'ébullition de l'eau, l'étude révèle que le foyer à marmite unique de type GIZ avec la nouvelle grille est plus efficace. Nous avons observé les rendements thermiques moyens de 38,7 % pour le foyer GIZ avec la nouvelle grille contre 27,93 % avec l'ancienne grille. Le foyer multi-marmites a donné un rendement moyen de 27%. Les durées du test à température corrigée sont de 49 min et 54,5 min respectivement pour le foyer à marmite unique avec nouvelle grille et ancienne grille. Ce temps est de 55,5 min pour le foyer à multi-marmites. Les consommations de briquettes à température corrigée révélées par l'étude sont de 47 g/l pour le foyer à marmite unique en utilisant la nouvelle grille et respectivement 58,33 g/l et 96 g/l pour le même foyer avec l'ancienne grille et le foyer à multi-marmite. Le tourteau de karité sous forme de briquettes peut être utilisé comme combustible alternatif à la place du bois tout en utilisant les foyers de types GIZ à marmite unique réadaptés.

**Mots clés** : Tourteau de karité, briquettes, foyer améliorés, test d'ébullition de l'eau, Burkina Faso.

## **ABSTRACT**

Energy is one of the key factor for economic and social development worldwide. In the local context of deforestation to satisfy energy needs, alternative energy sources are needed to protect the environment. This is the background of our study which aims at proposing an alternative fuel for the shea butter processing units. The main objective is to press shea cake (co-product of butter production) into “briquettes” and to propose an adapted and improved cookstove. This study took place in Koundougou, province of Houet, Burkina Faso.

First, several shapes of “briquettes” with different binding agent quantities have been produced using a simple manual press to find the best model. Then, Water Boiling Tests (WBT) were made with two improved cookstoves using the “briquettes” to demonstrate which one is the most efficient.

The results show that it is possible to produce flammable “briquettes” using a local press. Small “briquettes” with a hole in the center dry faster and burn easier than full or big “briquettes”. The study also shows that the “briquettes” are more resistant with starch as binding agent.

Concerning the water boiling tests, the study shows that the one-cooking-plot “GIZ-type” improved cookstove with a new grill is the most efficient. The thermal yield with this “GIZ-type” improved cookstove with the new grill is 38.7 % versus 27.93 % with the traditional grill. The four-cooking-plots improved cookstove has a thermal yield of 27 %. The duration of the boiling test is 49 min with the “GIZ” improved cookstove and the new grill and 54.5 min with the old grill. With the four cooking plots improved cookstove, it lasts 55.5 min. The specific fuel consumption is 47 g/l for the one plot improved cookstove (58 g/l with the traditional grill) and 96 g/l for the four cooking plots improved cookstove.

The shea cake, pressed into “briquettes” can be used as an alternative fuel instead of wood in an one-cooking-plot “GIZ-type” improved cookstove. However, the use of a motorized press which is more efficient is required.

**Key words:** Shea cake; Briquettes; improved cookstove; water boiling test; Burkina Faso.

## INTRODUCTION

Dans le contexte de développement durable, la disponibilité et la maîtrise de la consommation énergétique mondiale font partie des défis majeurs de notre siècle. L'augmentation de la demande énergétique est inévitable surtout en raison de la forte croissance démographique et industrielle des pays en voie de développement en particulier en Afrique subsaharienne. Dans cette région, la biomasse constitue la principale ressource énergétique utilisée pour la satisfaction des besoins primaires (cuisson des aliments, éclairage, etc.) ou pour la production de biens et services. Selon Ouabo *et al.* 2008, la biomasse représente 70% de la consommation de l'énergie finale en Afrique subsaharienne. Cette même source stipule une consommation moyenne par habitant de 0,41 et 0,28 tep (tonne équivalent pétrole) respectivement pour la CEDEAO et la CEMAC.

Le Burkina Faso n'est pas en marge de ce défi du siècle. Ainsi, le Ministère Chargé de Mission auprès de la présidence stipulait en 2010, que le contexte énergétique du pays était caractérisé par une prédominance de l'utilisation des énergies de la biomasse (bois, charbon de bois, résidus agricoles, déchets) qui représente environ 86% de la consommation totale d'énergie primaire du pays. A côté de cette source, on note l'existence d'autres sources telles que l'énergie fossile (19%), l'énergie électrique (13%), l'énergie renouvelable locale très faiblement valorisée. Il s'affiche donc clairement une consommation énergétique essentiellement dominée par l'utilisation du bois et le charbon de bois. Cet état de fait engendre une forte pression sur les ressources naturelles occasionnant une dégradation du milieu physique, ce qui est préjudiciable pour un pays agricole comme le nôtre. Selon PREDAS (2004), on estime une déforestation d'environ 105 000 ha de forêts par an pour la satisfaction des besoins énergétiques.

Cependant certaines sources d'énergie disponibles et facilement valorisables telles que les sous-produits agricoles ou les déchets issus des industries de transformations sont toujours faiblement exploitées (Béré, 2008). Au nombre de sous-produits agricoles, il y'a les résidus de mil, sorgho, maïs, riz, tubercules (FAO, 2014).

Pour ce qui est des déchets industriels, on peut citer les balles de riz, les coques d'anacardes et enfin les tourteaux de karité (Lambaré, 2015). En effet, la transformation des amandes de karité en beurre produit une quantité importante de tourteau qui pourrait être valorisé comme combustible et substituer l'utilisation du bois dans la transformation des amandes du karité en beurre. Le tourteau de karité produit est déjà utilisé dans différentes centres de production comme combustible. En effet, les centres de Koundougou, de Réo et de Léo l'utilisent sous

forme poudreuse soit en association avec le bois ou en intégralité pour la combustion. Le centre de Koundougou produit des boulettes à base du tourteau pour la combustion. Cependant, l'utilisation sous la forme poudreuse ne permet pas la production d'une bonne flamme à cause l'entassement. Pour ce qui est des boulettes, c'est une opération fastidieuse surtout lorsqu'il s'agit de grande quantité de tourteau.

C'est dans ce contexte que l'ONG RONGEAD en collaboration avec l'OCCITANE en Provence, ont initié ce projet dénommé « KARITANE ». Il œuvre dans la préservation de l'environnement à travers la valorisation des déchets solides issus de la transformation des amandes de karité en beurre communément appelé « tourteau de karité ».

En effet, quel que soit le degré de mécanisation, le procédé de transformation des amandes du karité en beurre a un impact environnemental non négligeable. En ce sens qu'il est très énergivore car pour la cuisson de l'émulsion, le lavage des amandes, la torréfaction et le barattage il faut énormément de combustible qui est le plus souvent du bois. En outre, les technologies utilisées pour la combustion ne sont pas toujours adaptées, occasionnant ainsi des pertes énormes d'énergie. Il s'agit notamment des foyers à trois pierres et des torréfacteurs non adéquats. Aussi, tout au long du processus, l'eau est incontournable car elle intervient dans le lavage des amandes, de l'émulsion et du matériel. Les déchets de la transformation comme le tourteau (solide et liquide) et les eaux chargées (eau de lavage de l'émulsion) constituent un embarrât non seulement pour ces femmes et le voisinage mais constituent aussi une source de pollution de l'environnement. Notre étude s'est axée sur « l'optimisation énergétique et la valorisation du tourteau solide sous forme de briquettes combustibles ».

L'objectif général de l'étude est de contribuer à résoudre le problème énergétique en milieu rural et limiter la désertification tout en proposant un combustible alternatif efficace et adapté aux unités de transformations des amandes de karité. Il s'agit de façon spécifique:

- De conditionner le tourteau solide de beurre de karité sous forme de briquettes combustibles
- De proposer un type de foyer efficace et adapté à l'utilisation de ces briquettes de tourteau de karité.

Le présent mémoire s'articule autour de trois parties : la première est consacrée à une revue de la littérature, la seconde aborde les matériels et méthodes utilisés pour la réalisation de l'étude et la troisième partie présente les résultats obtenus suivis d'une discussion, d'une conclusion et des perspectives.

**PREMIERE PARTIE: REVUE DE LA  
LITTERATURE**

## **I. Energie au Burkina Faso**

### **1.1. Différentes sources d'énergies domestiques au Burkina Faso**

Les différentes sources d'énergies domestiques utilisées au Burkina Faso pour la satisfaction des besoins des populations proviennent de deux sources essentielles: Les énergies traditionnelles et les énergies dites modernes.

#### **1.1.1. Energies traditionnelles**

Elles concernent essentiellement le bois, le charbon de bois et les résidus agricoles.

##### **a) Bois et charbon de bois**

Le bois de feu est la principale source d'énergie pour la cuisine et le secteur des ménages en est le principal consommateur (PREDAS, 2007). Selon l'INSD (2005), le bois est utilisé par 90,7% des ménages tandis que le charbon de bois est utilisé par 3,8% des ménages qui sont principalement urbains. Selon Koutaba (2009), la consommation de bois de feu et de charbon de bois représente respectivement 0,91 kg et 0,13 kg par habitant et par jour. Cette utilisation intensive a pour conséquence la déforestation de près de 105.000 hectares de forêts par an (PREDAS, 2007).

##### **b) Résidus agricoles**

Le secteur agricole étant dominé par les cultures vivrières (notamment les céréales), il génère d'importants résidus. La méthode de densification de ces résidus sous forme de briquettes n'est pas connue des paysans alors qu'elle constitue une meilleure utilisation de ces résidus agricoles pour la cuisine domestique. La promotion de ces résidus agricoles peut contribuer à réduire considérablement les ravages occasionnés par les feux de brousse.

### 1.1.2. Energies modernes

Il s'agit généralement des énergies nouvelles (gaz butane, pétrole, électricité, etc.).

#### a) Gaz butane subventionné par l'Etat

La commercialisation du gaz butane tout comme les autres produits d'hydrocarbures reste un monopole détenu par la SONABHY. Au Burkina Faso, seulement 21 % des ménages urbains utilisent le gaz butane, soit 4,8% des ménages sur le plan national (INSD, 2005).

#### b) Pétrole lampant

Le pétrole lampant est utilisé par les ménages pour l'éclairage familial (65% de la population, source: base de données de la DGE) et aussi pour amorcer la combustion rapide du bois de chauffe ou du charbon de bois.

#### c) Energie électrique

Au Burkina Faso, l'électricité est produite par la Société Nationale d'Electricité (SONABEL). Elle est essentiellement d'origine thermique (produite à partir du DDO, Fuel Oil et Diesel) et hydrique (barrages hydro-électriques de Bagré, de Ziga et de la Kompienga).

#### d) Energie solaire

Le gisement solaire burkinabé est de 5,5 kWh/m<sup>2</sup>/jour (PREDAS, 2007). Ce rayonnement diffus a besoin de passer à travers des systèmes optiques de réflexion afin de produire une énergie suffisante pour la cuisson dans un temps raisonnable.

#### e) Biocarburants

Le secteur des biocarburants au Burkina Faso est à la phase initiale. Une première usine d'une capacité de production de 30000 tonnes pour 5000 litres de biocarburant est installée dans la zone industrielle de Kossodo (Ouagadougou). Elle produit du biodiesel (biocarburant fait à base d'huile raffinée de *Jatropha curcas*).

#### f) Biogaz

Depuis le temps de la Révolution, le Burkina s'était engagé dans le domaine du biogaz. On peut citer quelques expérimentations de biogaz à Gampela par l'Université de Ouagadougou, à Goundi (dans le Sanguié), à l'hôpital de Banfora et à Bazoulé.

## **1.2. Contraintes énergétiques du Burkina Faso**

Le Burkina Faso, à l'instar des autres pays sahéliens, connaît d'énormes problèmes en matière de développement du secteur énergétique et d'accès des populations rurales aux services énergétiques. Selon la vision 2020 sur l'accès des services énergétiques modernes au Burkina Faso, le taux d'accès à l'énergie du monde rural est généralement bas. Les contraintes peuvent être résumées comme suit:

- une grande dépendance du Burkina Faso aux produits pétroliers et l'inexistence de combustibles fossiles;
- un faible accès aux services énergétiques modernes;
- un secteur de l'électricité en restructuration;
- les barrières à la valorisation des ressources d'énergies locales renouvelables;
- l'absence de volonté politique visant l'efficacité énergétique;
- l'absence de structures institutionnelles plurielles pour l'apport de services énergétiques en zones rurales et périurbaines ;
- une inégalité croissante entre le monde rural et urbain;
- un manque de coordination intersectorielle;
- une utilisation modérée des foyers améliorés en zone urbaine;
- une dépendance presque totale des populations aux combustibles ligneux.

Il subsiste encore des contraintes à la diffusion des équipements d'énergies renouvelables notamment solaires parmi lesquelles on peut citer :

- le coût d'acquisition élevé en dehors de toute facilité d'acquisition (vente à crédit, location-vente, etc.) ;
- le manque d'informations des populations sur les possibilités offertes par les applications de l'énergie solaire;
- l'environnement fiscal et douanier qui n'est pas favorable avec des droits de douane de 20 % et une TVA de 18 % sur les équipements solaires alors que le développement du secteur électrique par la Société Nationale d'Electricité du Burkina avec des technologies conventionnelles se fait pratiquement hors taxes (Nations Unies, 2000).

### **1.3. Etat des lieux de la valorisation énergétique des sous-produits industriels au Burkina Faso**

#### **1.3.1. Coques d'anacardes**

Il existe plusieurs unités de transformation des noix d'anacarde au Burkina Faso réparties dans les régions des Hauts Bassins, des Cascades et du Sud-Ouest où la production est essentiellement concentrée.

Il est estimé que 5,5 kg de matière première produit 1 kg d'amande et environ 4,5 kg de déchets, dont 4kg de coques et 0,5 kg de pellicules. Parmi ces résidus, la coque d'anacarde, résidu de décorticage des noix présente un intérêt particulier en tant que combustible pour la production d'énergie au sein des unités de transformation des noix (Tall, 2013). Dans les unités semi-industrielles du Burkina Faso, elles peuvent être avantageusement utilisées pour fournir l'énergie nécessaire aux étapes de fragilisation des noix et de séchage des amandes, procédés particulièrement énergivores et qui utilisent généralement des sources d'énergies non durables telles que le bois et le gaz butane.

Les unités de transformation comme l'entreprise Gebana Afrique ou le groupement Yanta à Bobo-Dioulasso utilisent respectivement les coques d'anacardes par système de pyrolyse pour le séchage des mangues et la fragilisation des noix d'anacardes.

#### **1.3.2. Tourteau de karité**

Les sous-produits issus de l'extraction de beurre karité sont de deux sortes (tourteau liquide et le tourteau solide) pour la méthode par barattage. Si l'extraction se fait par presse, on obtient uniquement un sous-produit solide (tourteau).

La technique de barattage permet de récupérer après la cuisson le beurre qui flotte et un mélange d'eau et de tourteau.

Le tourteau de baratte est déjà utilisé sous forme de poudre ou de boulette dans certains groupements de transformation des amandes de karité au Burkina Faso. Il s'agit notamment de UGPPK-Houet, de l'UGF/CDN (Réo), NUNUNA (Léo), RAGUSSI (Tanghin-Dassouri) etc. Cette forme d'utilisation n'est cependant pas efficace car le combustible ne se consume pas vite et dégage beaucoup de fumées. L'union NUNUNA, a trouvé une forme de valorisation efficace, avec l'appui de ses partenaires, à savoir un système de gazéification par l'utilisation d'un pyrolyseur permettant ainsi l'utilisation du tourteau poudreux pour produire de la chaleur.

### **1.3.3. Bagasse**

La bagasse est le premier résidu de la canne à sucre après extraction du jus trouble sucré. On obtient environ 300 kg de bagasse (à 45% d'eau) par tonne de canne (Groupement d'Ingénieurs conseil du Sahel, 1998). Au niveau national, l'industrie établie par la Société Sucrière de la Comoé (SN-SOSUCO), possède approximativement 4 000 ha dont 3 700 sont actuellement dédiés à la culture de cannes à sucre. L'usine sucrière fournit également 8 000 tonnes de mélasse par an (en moyenne) (UEMOA, 2006). La plupart de celle-ci est utilisée pour la production d'éthanol par la Société de Production d'Alcool (SOPAL) et le surplus est vendu en tant que nourriture pour animaux ou retourné dans les champs de cannes.

### **1.3.4. Sciure de bois**

C'est un résidu provenant du sciage de bois. Il se présente presque sous forme de poudre. On le trouve principalement et en quantité assez importante au niveau des grandes scieries de Banfora et de Niangologo. Les sciures de bois et copeaux sont considérés au niveau des scieries comme déchets et sont évacués le plus souvent dans les décharges publiques. Au niveau des quartiers des villes, des petites scieries et menuiseries sont disséminées et produisent très peu ou presque pas de sciures, mais plutôt des copeaux ramassés et utilisés par les ménagères pour allumer les fourneaux de sciures de bois

### **1.3.5. Résidus forestiers**

Les déchets d'exploitations forestières sont constitués de branches et de rameaux provenant du façonnage des arbres abattus, de feuilles, de troncs abîmés ou indésirables. Ils représentent une proportion moyenne de 35% du poids de l'arbre (Bellamy et *al.*, 1984).

Le taux de résidus laissé sur place après abattage peut varier en fonction des conditions locales, mais le ratio, souvent pris comme référence dans la littérature, est de 1 m<sup>3</sup> de bois rond exporté hors forêt pour 1 m<sup>3</sup> de déchets laissé sur place.

En supposant un contenu énergétique moyen pour ces résidus de 15 840 MJ/tonne de matière sèche, le gisement énergétique potentiel s'élève pour ces déchets à environ 1 Giga tonne équivalent pétrole par an.

## **II. Différents procédés de valorisation des produits et sous-produits industriels et agricoles**

La biomasse, et *a fortiori*, le bois peuvent être transformés puis utilisés de différentes manières pour la production d'énergie. La valorisation énergétique de la biomasse se fait généralement par voie biochimique et par voie thermochimique.

### **2.1. Valorisation énergétique de la biomasse par voie thermochimique**

La conversion thermochimique est un processus de reformage chimique à haute température qui coupe les liaisons de la matière organique et transforme ses intermédiaires en charbon, gaz de synthèse et bio-huile hautement oxygénée (Belkadi, 2009). Il existe quatre principaux procédés thermochimiques de valorisation énergétique de la biomasse: la pyrolyse, la gazéification, la combustion et la liquéfaction thermochimique.

#### **2.1.1. Pyrolyse**

Procédé anaérobique de décomposition de la partie organique de la biomasse en un mélange de charbon et de gaz volatiles (Belkadi, 2009). C'est une transformation se déroulant en atmosphère aussi inerte que possible (absence d'oxygène) et à une température de réaction n'excédant pas 600°C.

#### **2.1.2. Gazéification**

La gazéification est un procédé thermique à température élevée dans laquelle un combustible solide réagit avec une quantité contrôlée d'oxygène et est transformé en un mélange de gaz dont l'hydrogène et le monoxyde de carbone sont les deux composés principaux, si l'on exclut bien sûr l'azote lorsque la réaction est effectuée en présence d'air (José et *al.*, 1994).

#### **2.1.3. Combustion**

C'est la façon la plus ancienne et la plus répandue de transformation de la biomasse en énergie. L'agent oxydant employé est toujours l'oxygène, principalement puisé dans l'air. Les réactions de combustion sont toujours exothermiques.

#### **2.1.4. Liquéfaction thermochimique**

La liquéfaction thermochimique convertit la biomasse vers des huiles plus légères (bio-huiles), elle se déroule à une très grande pression (5 à 20 MPa) et typiquement a lieu à basses températures (250 à 350°C), avec l'utilisation d'un catalyseur (Belkadi, 2009).

## **2.2. Valorisation énergétique de la biomasse par voie biochimique**

La voie biochimique a recours à une action microbienne et enzymatique pour dégrader la biomasse. Il existe plusieurs procédés dont les dominantes sont la méthanisation ou digestion anaérobie de la biomasse aboutissant à la production à grande échelle de biogaz combustible; et la fermentation alcoolique, qui utilise les végétaux contenant le sucre (canne à sucre, blé et autres céréales, betterave à sucre, etc.) pour produire de l'éthanol par voie biologique (Belkadi, 2009).

### **2.2.1. Fermentation et hydrolyse enzymatique**

La fermentation permet de produire de l'éthanol à partir de plantes sucrières (la canne à sucre et la betterave à sucre) et des plantes amylacées (le maïs et le blé) (Sanogo, 2005).

### **2.2.2. Méthanisation ou fermentation anaérobie**

La fermentation anaérobie ou méthanisation permet, à travers diverses étapes, de réaliser, par processus naturel, la dégradation des matières organiques et la production d'un gaz combustible qui est le biogaz. Cela nécessite la mise en place de conditions favorables au développement de certaines population bactériennes (absence d'oxygène, pH proche de la neutralité, température de 35 à 55°C) (José *et al.*, 1994).

## **2.3. Transformation de la biomasse en combustible**

La densification de la biomasse a essentiellement pour objectif de réduire le foisonnement des matières lignocellulosiques souvent à granulométrie fine et de reconstituer un combustible utilisable à des appareillages pour le bois ou le charbon de bois (José *et al.*, 1994). Elle représente donc une technologie de conversion de la biomasse en combustible (Grover et Mishra, 1996).

La terminologie pour désigner ce genre de produit est mal définie. En effet, la densification désigne la compression des matières et produit un échauffement suffisant pour induire des phénomènes physicochimiques qui provoquent une plastification de la lignine (José *et al.*, 1994). La densification est « un ensemble de traitements physiques, appliqués aux végétaux ou débris végétaux, qui visent l'obtention d'éléments solides caractérisés par une masse volumique élevée » (CDI et CRA, 1993). Lorsque seules les forces physiques entrent en jeu, on utilise plutôt le terme compactage. S'il y a usage de liants, on parle d'agglomération (José *et al.*, 1994). Le résultat de la densification, le produit densifié, peut se présenter sous différentes formes, depuis le ballot de paille ou le fagot de branchage jusqu'à la brique, selon le degré de densification atteint. La brique se présente généralement sous forme cylindrique (mais parfois parallélépipédique ou hexaédrique) de longueur et de diamètre (ou côté) variables (CDI et CRA, 1993).

### **2.3.1. Outils de transformation de la biomasse en briquettes combustibles**

Il faut savoir que selon le matériel utilisé et le procédé de densification adopté, il est possible de catégoriser les filières de densification en deux : mécanique (forte pression) et manuelle (moyenne à faible pression).

#### **2.3.1.1. Presses mécaniques**

Cette filière utilise des presses de grande capacité (entre 0,3 et 1 tonne/heure pour la plupart) fonctionnant à haute pression, généralement sur des sites agro-industriels disposant de résidus homogènes et abondants. Les différentes presses utilisées dans le domaine industriel sont :

##### **- Presses à piston**

Le principe de fonctionnement d'une presse à piston est simple. Un piston équipé d'une tête de poussée et animé d'un mouvement de va-et-vient compacte la matière dans un cylindre prolongé par un canal de refroidissement. Ce canal, dont la longueur peut atteindre 5 à 10 m, empêche le gonflement et la destruction des briquettes sous la pression interne de la vapeur d'eau produite lors de l'échauffement de la matière (figure 1). Il existe de nombreux constructeurs de presses à piston. Celles-ci diffèrent par la puissance installée, le système d'alimentation et l'utilisation de la transmission hydraulique. Selon les presses et selon les matières, il est parfois indiqué d'ajouter des liants aux résidus à densifier. (Douville *et al.*, 2008).

Ce type de procédé fonctionne avec un échauffement superficiel de la briquette contrairement aux presses à vis pour lesquelles l'ensemble de la matière est chauffée. Par conséquent, il tolère des taux d'humidité plus élevés (jusqu'à 20 %) sans que la vapeur produite n'entraîne de conséquences néfastes sur le matériel ou les briquettes. La granulométrie acceptée est de même plutôt élevée (jusqu'à 15 mm).

Lorsqu'il s'agit de bois compacté, cette presse semble présenter des résultats moins performants que les presses à vis ou à granuler car la matière étant moins chauffée, la résistance et la tenue de la briquette en sont impactées. Toutefois, elle accepte des marges de tolérance en termes d'humidité et de granulométrie plus importantes et sa construction est relativement simple et adaptée aux industries des pays peu développés.

### - Presses à granuler

Produisant des granulés ou pellets, elles sont historiquement utilisées dans l'industrie des aliments pour bétail mais sont de plus en plus orientées vers la transformation de résidus ligneux (figure 3). Selon Douville *et al.*, (2008), il en existe trois types qui possèdent les caractéristiques spécifiques suivantes :

- La matrice annulaire est fixe et les galets, appelés aussi « rouleaux », animés d'un mouvement rotatif, poussent la matière à travers les nombreuses filières ;
- Les rouleaux sont fixes et la matrice annulaire tourne à grande vitesse ;
- La matrice est fixe et possède la forme d'un disque horizontal (matrice à plateau), tandis que les rouleaux parcourent la face supérieure.

Les briquettes produites sont généralement de très bonne qualité. La maintenance de la presse est par contre lourde et sa conduite délicate sur le plan technique.

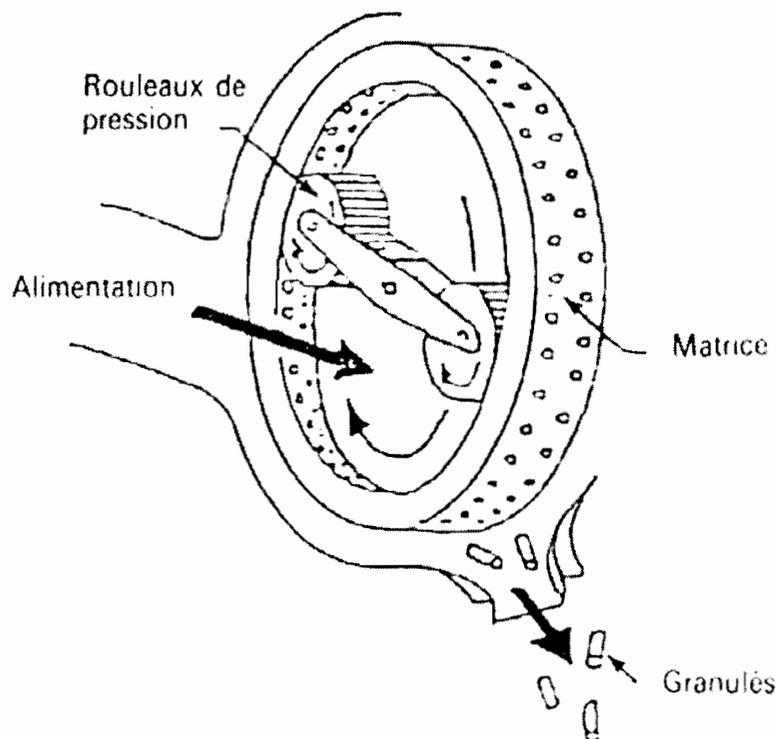


Figure 3: Schéma de la presse à granuler avec matrice annulaire

Source : (Lequeux *et al.*, 1990). *Énergie et biomasse, la densification*, Belgique, 188 p.

### **2.3.1.2. Presses manuelles**

Développant de moyenne et basse pressions, elles sont majoritairement utilisées à l'échelle artisanale pour de petites exploitations et exigent souvent de recourir à un liant pour assurer une cohésion suffisante des résidus. Ces liants constituent la principale contrainte de ce procédé. Ils doivent être disponibles et à moindre coût sur le site de densification. Cependant ce procédé rustique se révèle très bien adapté aux conditions de travail difficiles au faible niveau technologique des régions agricoles et peut être utilisé par une main d'œuvre non qualifiée (CDI&CRA, 1993).

## **2.4. Chaîne de densification**

### **2.4.1. Préparation des résidus**

Avant la transformation des résidus par la technique de briquetage proprement dite, les résidus doivent subir une série de traitements variables selon les types de déchets utilisés et les processus de fabrication (Bellamy *et al*, 1984). On peut ainsi classer les divers traitements des résidus en quatre types que sont le nettoyage, le broyage, le séchage et la fermentation.

### **2.4.2. Principe de la densification**

Il est impératif de faire une distinction entre la densification qui réalise une agglomération intime au niveau des particules et les autres formes de compactage et de pressage plus ou moins accentués qui obtiennent une certaine cohésion par simple imbrication mécanique des fibres ou à l'aide de ficelles dans le cas des presses à balles (Louvel, 1986).

La densification consiste à agglomérer des fragments de résidus en utilisant la lignine comme liant naturel.

Entre 135 et 195°C, la lignine fond et subit une transformation thermochimique de type polymérisation. En refroidissant, les polymères issus de la lignine durcissent et consolident les particules (Louvel, 1986). En effet, lorsqu'une pression très forte est appliquée assez rapidement sur une matière lignocellulosique, elle peut s'échauffer de façon notable sans apport extérieur de chaleur. Alors que la cellulose est stable jusqu'à 250°C environ, la résine et la lignine (substance de soutien des tissus végétaux) se ramollissent à partir de 100°C. Ces substances se polymérisent et forment un liant qui agglomère la cellulose. Les matières lignocellulosiques ainsi traitées deviennent dures en refroidissant (Bellamy *et al.*, 1984).

## 2.5. Caractéristiques générales des produits densifiés

Les produits densifiés se présentent sous différentes formes selon leurs aspects extérieurs, leurs compositions physico-chimiques, la nature des produits initiaux utilisés et le traitement de compactage subi (Bellamy *et al.*, 1984). Ces variations donnent lieu à des appellations différentes des produits densifiés, et à des qualités d'utilisation variable. Le tableau 1 donne des valeurs caractéristiques de quelques produits densifiés :

Tableau 1: Valeurs caractéristiques de quelques produits densifiés

Résidus utilisés	Type de presse	Pression (kg/cm <sup>2</sup> )	Taux d'humidité (%)	Taux de cendre (%)	Pouvoir calorifique supérieur (Kcal/kg)
Papier mâché + cendre de bois	Manuel	5 à 15	6.9	2,29	3825
Paille 50% + fumier 50%	Manuel	5 à 15	5.4	9,5	3599
Poussière de charbon + argile	Manuel	5 à 15	-	73	975
Fourrage + feuille sèches +poussière de charbon + écorce de bois + 10% de fumier	Manuel	5 à 15	8	19	3502
Paille 40% + Scierie 40% + fumier 20%	Terstaram	80 à 90	9.2	14	3266
Brindille hachées 30 à 45% + poussière de charbon 30 à 45% + fumier de vache 15 à 20%	Terstaram	80 à 90	2,4	32,2	4408

Source : « Guide technique de la densification » (Bellamy *et al.*, 1984)

### 2.5.1. Dimension

Les dimensions des produits densifiés varient en fonction du procédé de densification, du type de produit et de l'utilisation finale de ces derniers.

Quels que soient le type de procédé et le type de produit densifié, les produits destinés à l'usage industriel ont généralement des grandes dimensions comparativement à ceux destinés à l'utilisation domestique (tableau 2).

Tableau 2: Dimensions de quelques produits densifiés

Dénomination du produit densifié	Diamètre du côté (cm)	Longueur du côté (cm)	Section
Briquettes	30 à 90	+ de 25	Rond ou rectangulaire
Bûches	90	+ de 30	Rond ou rectangulaire
Granulés	5 à 20	-de 40	rond
Cubes	30 × 30 45 × 38	De 50 à 75	rectangulaire

Source : « Guide technique de la densification » (Bellamy *et al.*, 1984)

### 2.5.2. Densité

La densité du produit densifié varie en fonction du procédé de densification et de la nature de la matière première utilisée. Le tableau 3 illustre les densités de quelques types de produits densifiés.

Tableau 3: Densité des produits densifiés

Dénomination du produit densifié	Densité	Masse volumique en vrac (kg/m <sup>3</sup> )
Briquettes	0,8 à 1,4	480 à 850
Bûches	0,8 à 1,4	960 à 1400
Granulés	0,96 à 1,1	480 à 720
Cubes	0,8 à 1,3	490 à 850

Source : « Guide technique de la densification » (Bellamy *et al.*, 1984)

### **2.5.3. Taux d'humidité**

Le taux d'humidité d'un produit densifié varie dans des valeurs proches de 10%. Les valeurs limites recommandées sont de 5 à 15%. En effet une matière première qui entre dans une presse à vis avec une humidité de 25% y ressort sous forme densifié avec un taux d'humidité de 7 à 10 %. Ceci est dû à la réaction fortement exothermique à l'intérieur de la chambre de compression et des matrices d'extrusion, ainsi que la compression des particules de biomasse (Bellamy *et al.*, 1984).

### **2.5.4. Pouvoir calorifique**

Le pouvoir calorifique est fonction du type de résidus, de son taux d'humidité final, de sa densité et de la nature du liant. Le pouvoir calorifique des produits densifiés est en général proche de celui du bois sec qui est de 16 MJ/kg; contre 30 MJ/kg pour le charbon (UNHCR 2002).

### **2.5.5 Taux de cendre**

Le taux de cendre des produits densifiés dépend essentiellement des résidus utilisés et de la nature du liant, il n'est pas fonction du procédé de densification. C'est une valeur permettant d'apprécier la qualité de combustion du produit densifié.

**DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET  
METHODES**

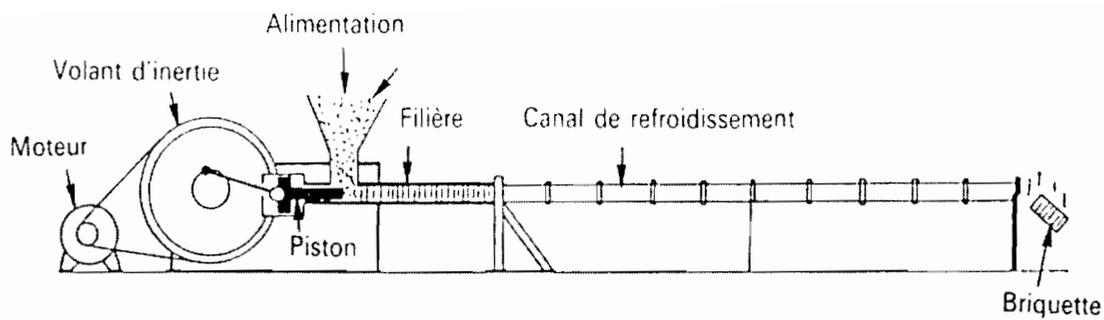


Figure 1: Presse à piston

Source : (Lequeux *et al.*, 1990). Énergie et biomasse, la densification, Belgique, 188 p.

- **Presses à vis cylindrique ou conique**

Le principe de ces presses consiste en une vis conique qui oblige la matière à se densifier au cours de sa progression. Cette matière est extrudée à travers une filière équipée d'orifices dans laquelle elle subit une pression forte par frottement (figure 2). Ce procédé entraîne une élévation importante de la température de la matière du fait des frictions dans la filière. Par conséquent, elle est exigeante concernant le taux d'humidité de la matière qui doit forcément être inférieur à 10 % sous peine d'éclatement de la briquette à la sortie de la filière (détente de la vapeur).

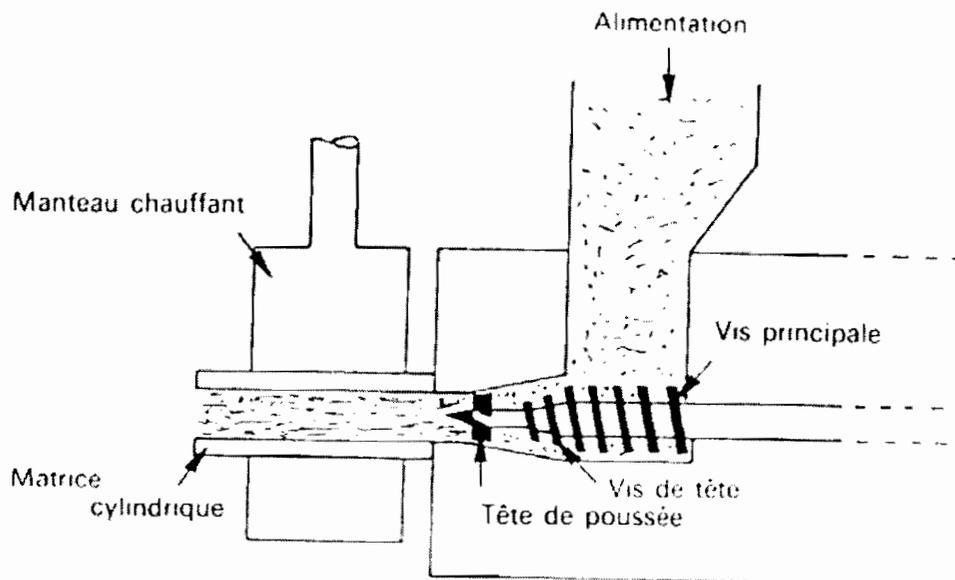


Figure 2 : Schéma de la presse à vis japonaise à manteau chauffant

Source : (Lequeux *et al.*, 1990). Énergie et biomasse, la densification, Belgique, 188 p.

## I. MATERIELS

### 1.1. Présentation de la zone d'étude

#### 1.1.1. Situation géographique

La commune rurale de Koundougou est située à 70 km au Nord de la commune de Bobo-Dioulasso, dans la province du Houet, l'une des trois provinces que compte la région des Hauts Bassins. Elle fait partie des 13 communes de ladite province. La figure 4 montre la localisation de la commune de Koundougou.

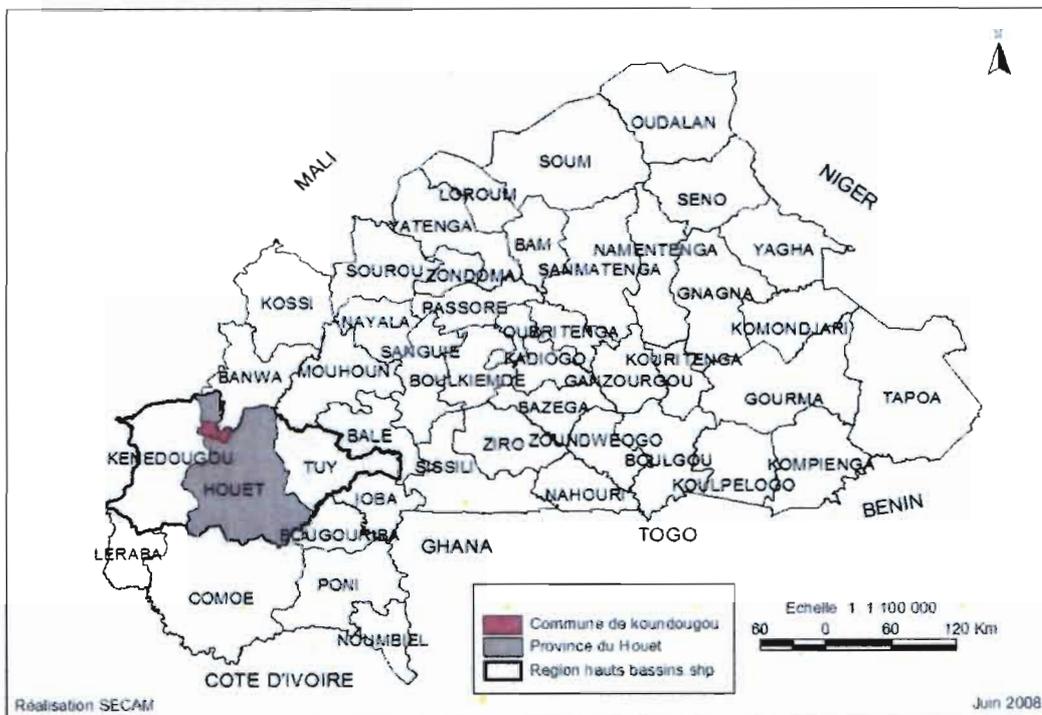


Figure 4: Localisation de la commune rurale de Koundougou.

#### 1.1.2. Relief

La commune de Koundougou est située sur le massif gréseux qui occupe la quasi-totalité de la partie ouest du pays. L'altitude moyenne y est de 400 m dans la partie Est et 450 m dans la partie ouest. Ce relief soumis à l'érosion a été aplani au cours du temps (PCD, de Koundougou, 2013).

### 1.1.3. Sols

Chaque famille de sol est caractérisée par sa morphologie et ses propriétés physico-chimiques et agronomiques. Ainsi les principales familles de sols rencontrés dans la commune de Koundougou sont des sols minéraux bruts qui sont peu évolués et les sols hydromorphes minéraux sur matériaux à texture variée (PCD de Koundougou, 2013)

### 1.1.4. Végétation

Selon le découpage phytogéographique du Burkina Faso, la commune de Koundougou appartient au domaine soudano-guinéen qui couvre la partie Sud du pays. Ce domaine qui bénéficie de précipitations abondantes est favorable au développement des espèces ligneuses. En termes de flore, les espèces les plus rencontrées sont : *Vitellaria paradoxa*, *Lannea microcarpa*, *Tamarindus indica*, *Parkia biglobosa*, *Bombax costatum*, *Azadirachta indica*. Le tapis herbacé est bien fourni et sert de fourrage naturel aux animaux. Il est composé essentiellement de *Andropogon gayanus*, de *Loudetia togoensis*, de *Cymbopogon schoenanthus*, de *Pennisetum pedicellatum* etc. (PCD, de Koundougou, 2013)

Cette végétation auparavant dense est de plus en plus sous l'emprise humaine. En effet les défriches pour l'agriculture, la coupe souvent anarchique de bois de chauffe et les feux de brousse ont réduit le couvert végétal.

Des actions de restauration et de protection de l'environnement existent avec la zone de conservation dans l'Est de la commune. Le bois est la principale source d'énergie pour les populations. Il est également utilisé pour la construction, l'artisanat, etc. La commune dispose d'une forêt classée située dans le village de Tarama.

### 1.1.5. Faune/Pêche

Jadis riche, la commune s'appauvrit de plus en plus en gibier. De nos jours, on y rencontre essentiellement du petit gibier tel que les lièvres (*Lepus timidus*), les singes (*Chlorocebus aethios*), les perdrix (*Perdix perdix*), les pintades (*Numida meleagris*), etc. La raréfaction des grands animaux sauvages comme la panthère (*Panthera pardus*), le bubale (*Alcelaphus buselaphus*) et le guépard (*Acinonyx jubatus*) est due en grande partie à la diminution du couvert végétal et à la pression anthropique (braconnage) (PCD Koundougou, 2013).

Les ressources halieutiques sont en forte régression car les cours d'eau sont en plein ensablement lié à la production agricole autour des berges. La pêche est artisanale et la production insuffisante.

### 1.1.6. Hydrographie

Selon le plan communal de développement de la commune, le réseau hydrographique est assez sommaire. Elle est traversée par deux rivières essentielles qui collectent les eaux des autres. Il s'agit des rivières « Banlo » et « Terré » qui sont toutes des affluents du fleuve Mouhoun. Il n'existe qu'une seule retenue d'eau malgré que la zone soit bien arrosée.

### 1.1.7. Climat

La commune de Koundougou est à cheval entre la zone nord soudanienne et sud-soudanienne délimitée au Nord par l'isohyète 900 mm, et la zone soudano-sahélienne comprise entre les isohyètes 900 et 600 mm. Deux saisons règnent sur cette zone : une saison sèche de Novembre à Avril et une saison des pluies de Mai à Octobre avec les maxima de précipitations enregistrés en Juillet et Août. La pluviométrie moyenne annuelle de ces neuf dernières années s'élève à 953,16 mm (PCD Koundougou, 2013). La figure 5 donne une idée de la variation de la pluviométrie de 2007 à 2015.

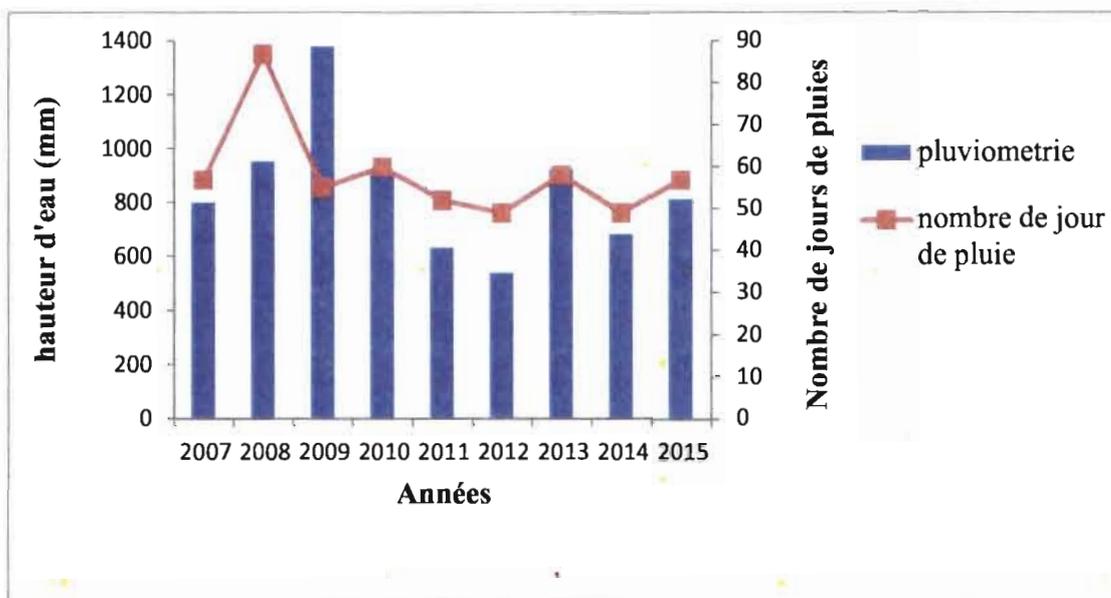


Figure 5: Evolution de la pluviométrie et du nombre de jours de pluies de 2007 à 2015 dans la commune rurale de Koundougou.

Source des données : (Plan communal de développement de la commune de Koundougou, horizon 2014-2020)

### 1.1.8. Milieu humain

La commune de Koundougou, selon les données du recensement général de la population et des habitations (RGPH-2006), est estimée à 17 175 habitants (tableau 4). Cette population est répartie sur une superficie totale d'environ 475 km<sup>2</sup> dans six villages (PCD, Koundougou, 2013)

Tableau 4: Répartition de la population de la commune de Koundougou.

Villages	RGPH 1996	Population 2004	RGPH 2006
Kogoma	1762	2206	2361
Korodéni	3270	2848	2733
Koundougou	6231	6729	7734
Mangorotou	1027	1512	1612
Soumorodougou	1482	1041	883
Tarama	1656	1668	1852
Total	15 428	16004	17 175

Source : INSD/RGPH- 1996, 2006- fichier des villages du Burkina Faso et recensement administratif 2004.

Selon le PCD de Koundougou, l'occupation de l'espace communal sur le plan ethnique présente la coloration suivante :

- les migrants mossis (50%) venus pour l'essentiel du plateau central, de Kongoussi, de Ouahigouya, de Kaya à la recherche de terres cultivables ; ils résident pratiquement dans tous les villages de la commune ;
- les Bobo-Dioula, autochtones de la commune (40%) ;
- les Peulhs et les Samos (10%) ;
- les bolons (autochtones de Mangorotou).

D'une manière générale, le mooré, le dioula et le Bobo sont les langues les plus utilisées au sein de la commune. Le fait de pouvoir utiliser plusieurs langues au sein de la commune constitue un atout non négligeable en tant que facteur de communication. Selon les résultats des enquêtes, la population de Koundougou est fortement islamisée. Elle est estimée à environ 70%. Quant aux animistes, ils sont pour la plupart des autochtones Bobo et avoisinent seulement 20% de la population contre 10% aux fidèles de la religion chrétienne (protestantisme et catholicisme).

## **1.2. Matériel de la fabrication des briquettes**

### **1.2.1. Matière première**

Dans le cadre de cette étude, deux types de matières premières ont été testés. Il s'agit du tourteau de baratte produit par UGPPK-H (Union de Groupements Producteurs de Produits du Karité du Houct) et le tourteau de presse produite par l'unité de SOTOKACC (Société Toussiana Karité Comestibles et Cosmétique).

#### **a) Tourteau de baratte**

Il est issu de l'extraction du beurre de karité par la méthode traditionnelle. En milieu rural, c'est la méthode la plus utilisée car elle est moins coûteuse mais présente l'inconvénient d'être longue et pénible. En effet, après le lavage des amandes, elles sont ensuite concassées et portées au chaud : c'est l'étape de torréfaction qui permet de ramollir les cellules oléifères. La mouture permet d'éclater les cellules oléifères et de libérer l'huile ; ensuite intervient le barattage qui consiste à une opération de battage et de malaxage de l'émulsion. L'étape de lavage de l'émulsion permet de séparer l'huile d'une part et le tourteau liquide d'autre part. Une séparation de phase ou une simple décantation permet de récupérer le tourteau de baratte. Ce tourteau humide ainsi produit est étalé sur des bâches pour le séchage avant d'être conditionné. Il faut dire que vue la méthode traditionnelle, le tourteau contient encore une bonne quantité d'huile.

#### **b) Tourteau de presse**

C'est du tourteau provenant de la production semi-industrielle du beurre de karité. Ce type d'extraction du beurre de karité est peu développé au Burkina Faso car elle demande un investissement important tant en matériel qu'en finance. A la différence de la méthode traditionnelle, il n'y a pas d'étape de mouture, les amandes concassées sont directement passées dans une presse mécanique qui exerce une pression sur celles-ci libérant ainsi l'huile d'un côté et le tourteau de l'autre côté. Cette méthode présente l'avantage d'extraire le maximum d'huile possible ; ainsi le tourteau en contient très peu.

### 1.2.2. Liants

Une partie des briquettes sera fabriquée sans utilisation de liant et une autre partie le sera avec liant, dans l'objectif d'avoir une idée sur la durée de séchage, la résistance au choc et la combustibilité de chaque composante.

Pour l'étude consacrée aux briquettes avec liant, nous avons utilisé deux types : le « gommy » blanc et le « gommy » rouge (photo 1).

- Amidon de manioc (Gommy blanc).

Ce sont des résidus issus de la fabrication de l'attiéké. C'est un sous-produit du manioc.

- Gommy rouge

C'est la sève provenant de plusieurs espèces d'*Acacia*, notamment : *Acacia senegal*, *Acacia laeta*, *Acacia seyal*. Il est beaucoup produit dans la zone sahéenne du Burkina Faso



Photo 1 : gommy blanc (gauche), gommy rouge (droite)

### 1.3. Matériel de compactage du tourteau

Au cours des différents tests, une presse à double levier a été utilisée pour la fabrication des briquettes (planche 1)

La presse à double levier fonctionne avec du matériel accessoire. Il s'agit :

- de moule cylindrique métallique. Nous avons testé deux moules au cours de nos expérimentations : un premier de dimensions (diamètre=10 cm, hauteur=24 cm, volume 1,88 dm<sup>3</sup>) et un deuxième de dimensions (diamètre= 10 cm, hauteur = 12 cm, volume 0,94 dm<sup>3</sup>) ;
- d'un piston compresseur qui glisse à l'intérieur du moule pour assurer la compression;
- d'un tube central, qui permet de faire un trou au centre de la briquette lors de sa confection. Pour les briquettes pleines, nous ne l'utilisons pas ;
- et d'un disque de fond qui joue un double rôle en servant à la fois de support du tube central et de dispositif de fermeture du fond du moule.

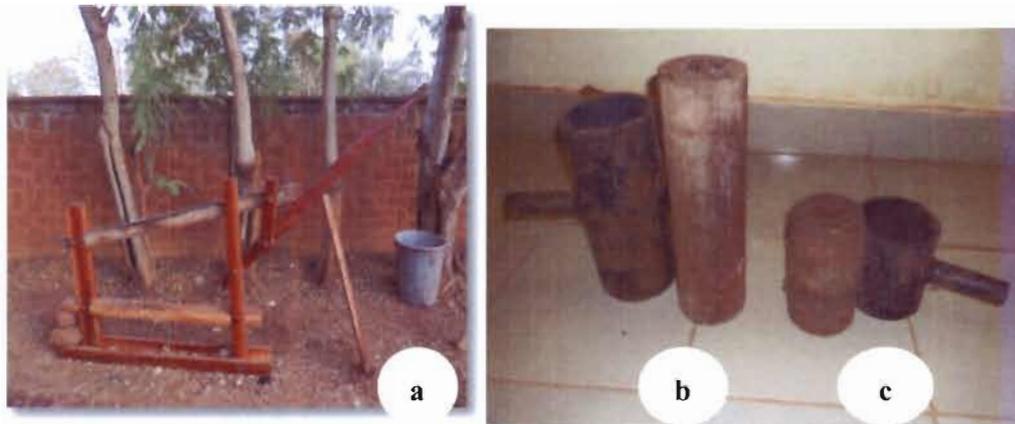


Planche 1 : (a) Presse à double levier ; (b) grand moule et piston ; (c) petit moule et piston

#### 4) Autres matériels

- 1 une casserole et une spatule pour le chauffage des liants;
- 2 un foyer en banco pour les tests préliminaires au bureau de RONGEAD-Bobo;
- 3 une balance électronique de marque Vitalia de précision 2 g;
- 4 un appareil photo pour la prise des photos;
- 5 un ruban métrique pour les mesures sur les briquettes, les moules et la presse;
- 6 un séchoir à l'ombre et un autre destiné pour le séchage au soleil (photo 2).



Photo 2: Séchoir

### 1.4. Matériel de test d'ébullition de l'eau

#### 1) Foyers améliorés

Dans le cadre de la réalisation des tests d'ébullition de l'eau, nous avons utilisé deux types de foyers améliorés : l'un à multi-marmites mis en place par SOS-Sahel et l'autre à marmite unique mais en double mis en place par l'ONG-GIZ, projet FAFASO (photo 3).

- Foyer à marmite unique (GIZ)

Ce sont des foyers qui ont été développés par l'IRSAT (Institut de recherche en sciences appliquées et technologies) et conçus par des maçons spécialisés de la GIZ. Ces foyers sont spécialisés dans la préparation du beurre de karité mais adaptés au bois de chauffe. Ainsi, ils sont constitués d'un socle sur lequel reposent des briques en ciment formant une sorte de fours séparés dont l'intérieur est bien tapissé avec du banco. Une grille mobile adaptée au bois se trouve à l'intérieur de chaque compartiment. Ces foyers reçoivent deux marmites n°30 chacune mais dans des compartiments séparés. Nous avons conçu une nouvelle grille adaptée aux briquettes de tourteau de karité pour évaluer son effet sur le rendement thermique dans le but de la comparer à l'ancienne.

- Foyer multi-marmites (SOS sahel)

A la différence des foyers GIZ, il est conçu pour recevoir quatre marmites dans un même compartiment et ces marmites sont fixes depuis la construction. Il possède une grille fixe mais adaptée à recevoir des combustibles de petite taille (briquettes). En plus, les cheminées sont plus hautes permettant l'évacuation efficace de la fumée. Il faut dire que ces foyers sont également développés par l'IRSAT.



Photo 3 : (a) foyer GIZ, (b) foyer SOS-Sahel

## 2) Autres matériels

Outre les deux foyers améliorés, divers autres matériels ont été utilisés (planche 2) pour le test d'ébullition:

- deux marmites en fonte (grise) de capacité 60 et 85 litres ;
- une nouvelle grille pour le foyer GIZ (marmite unique) ;
- une fiche de notation;

- des briquettes de tourteau de karité comme combustibles;
- un thermocouple immersible muni d'une sonde pour les mesures de températures;
- une montre, qui nous a servi comme chronomètre;
- un appareil photo numérique pour la prise des vues;
- des gants résistants pour la protection contre les brûlures;
- deux balances, l'une électronique de 5 kg pour les pesées de petit poids et l'autre de 100kg pour les pesées des grand poids;
- une boîte d'allumette et des morceaux de feuille de cahier pour l'allumage du feu;
- des morceaux de bois comme bois d'allumage.



Planche 2 : Autres matériel utilisés pour le TEE

## II. METHODOLOGIE

### 2.1 Conditionnement du tourteau

Plusieurs formes de combustibles ont été mises en évidence dans le but de trouver la forme la plus efficace et la plus adaptée. Pour la fabrication de toutes ces formes de combustibles, deux types de matières premières ont été utilisées : le tourteau de baratte produite par l'unité UGPPK-H (Union des Groupements des Productrices de Produits Karité du Houet) (Koundougou) et le tourteau de presse en provenance de l'unité de SOTOKACC (Toussiana).

### **2.1.1. Préparation du liant**

C'est une opération qui se déroule sur 10 à 45 min en fonction de la quantité d'eau et du type de liant. Il faut dans un premier temps mesurer la quantité du liant et celle de l'eau désirée puis on fait chauffer le mélange. Le gommy blanc est un peu particulier car il faut d'abord faire un mélange entre l'eau et le gommy poudreux avant de mettre l'ensemble au feu. Cela permet d'éviter la formation de boulette à la fin de l'opération. Au cours du chauffage, il faut faire tourner le mélange avec une spatule de façon à homogénéiser la solution. Par exemple pour préparer 250 g de gommy blanc avec 10 l d'eau il faut 25 min. Cette même opération dure 45 mn quand il s'agit du gommy rouge.

### **2.1.2. Densification de la matière première**

Cette opération consiste à :

- effectuer un mélange homogène entre le tourteau et l'eau ou entre le mélange (eau+ liant) ;
- remplir le moule choisi avec le mélange tout en s'assurant qu'il n'y a pas de vide à l'intérieur ;
- placer le moule ainsi rempli à une distance bien définie du point de rotation du levier ;
- exercer une pression continue sur le second levier ;
- enlever le moule de la presse et extraire le piston ;
- extraire la briquette formée en renversant le moule sur le piston à terre et en exerçant une petite force contre celui-ci.

### **2.1.3. Fabrication du combustible**

#### **2.1.3.1. Briquettes sans liant**

Plusieurs recettes ont été testées avec les deux types de tourteaux suivant divers paramètres (Tableau 5).

Tableau 5 : Paramètres étudiés pour le conditionnement du tourteau en briquettes (sans liant)

Paramètres	Possibilités
• type du tourteau	Baratte et presse
• Hauteur de la briquette	Petite taille (7,5 cm) et grande taille (15 cm)
• Pression appliquée	Faible et forte
• Type briquettes	Creuse et pleine
• Condition de séchage	Solaire et ombre

• **Explication du choix des variables.**

- **Type de tourteau :** les différents centres de production de beurre de karité utilisent les deux méthodes d'exaction du beurre de karité que sont, le barattage et le pressage. Ils produisent donc le tourteau de baratte et celui de presse. Notre objectif est de trouver une méthode de conditionnement du tourteau qui convienne à chaque type de centre de production.
- **hauteur de la briquette :** cette variable permet de mesurer l'efficacité du séchage et de la combustion en fonction de la taille des briquettes. Cela permet de maximiser la quantité de briquette à produire en un temps réduit.
- **pression appliquée :** permet d'apprécier la densité des briquettes produite selon que la pression appliquée soit forte (6 bar) ou soit faible (3 bar). C'est une variable qui caractérise la solidité des briquettes obtenue et permet de choisir d'utiliser le liant ou pas dans la densification du tourteau.
- **type de briquette :** permet de nous renseigner sur la durée du séchage et de l'efficacité de la combustion lorsque les briquettes sont pleines ou creuses. Cela permet d'optimiser le temps de séchage et d'améliorer la qualité de la combustion des briquettes de tourteau de karité.
- **Condition de séchage :** elle permet de mesurer l'efficacité et la durée de séchage des briquettes selon que celles-ci soient séchées au soleil ou à l'ombre.

- **Recettes utilisées pour la fabrication des briquettes.**

Le tableau 6 montre les différentes recettes testées en fonction des paramètres cités ci-dessus. Chaque recette a fait l'objet d'essais sur les deux types de tourteau (baratte et presse). Ainsi des valeurs d'eau et de tourteau ont été choisies pour la fabrication des briquettes (tableau 6). Aussi deux types de pressions (forte et faible..) sont testés. La pression est dite faible lorsque le moule est placé à une distance éloignée du point de rotation du levier principal soit à 60 cm. Celle-ci est dite forte lorsque le moule est placé proche du point de rotation du levier principale (10 cm). Deux types de séchage (au soleil et à l'ombre) ont été testés. Le séchage à l'ombre est assuré par un séchoir à plusieurs rangées et protégé chaque soir par une bâche.

Tableau 6: Briquettes fabriquées en fonction de divers paramètres (tourteau de baratte et de presse)

Composition Recettes	Quantité de tourteau (g)	Teneur en eau (%)	Forme de la briquette	Pression	Moule utilisé
Recette 1	350	53,5	Cylindrique et pleine	Forte/faible	Petit moule
Recette 2	300	53,5	Cylindrique et creuse	Forte/faible	Petit moule
Recette 3	700	53,5	Cylindrique et pleine	Forte/faible	Grand moule
Recette 4	600	53,5	Cylindrique et creuse	Forte/faible	Grand moule
Recette 5	350	50	Cylindrique et pleine	Forte/faible	Petit moule
Recette 6	300	50	Cylindrique et creuse	Forte/faible	Petit moule
Recette 7	700	50	Cylindrique et pleine	Forte/faible	Grand moule
Recette 8	600	50	Cylindrique et creuse	Forte/faible	Grand moule

- **Test de résistance des briquettes**

Deux types de tests ont été réalisés. Le premier appliqué aux briquettes avec liant a consisté à soulever avec la main une briquette jusqu'à une hauteur de 1,5 m du sol et on la laisse en chute libre. Lorsqu'elle tombe au sol, on note le résultat et ce test est répété pour 10 briquettes de même composition. Le second appliqué aux briquettes sans liant consiste à transporter 20 briquettes dans des conditions précaires. Ainsi les briquettes ont été entassées dans un seau et attachées par des sangles, le tout à moto, sur une route endommagée de 20 km.

Le nombre de briquettes cassées ont été noté à la fin du trajet. Ce dernier test permet de nous renseigner sur la résistance des briquettes à l'effet de déplacement d'un site à un autre comme il sera le cas en milieu réel.

### 2.1.3.2. Briquettes avec utilisation de liant

Les briquettes une fois fabriquées sur site seront stockées dans des sacs et entreposées dans des magasins pour être utilisées en période de production. Ainsi les briquettes pourraient être réduites en poudre dans ces conditions. Aussi le déplacement de ces briquettes d'un site à un autre pourrait accentuer leur vulnérabilité au choc.

Pour ce faire nous avons utilisé du liant dans la compaction du tourteau sous forme de briquette pour prendre en compte tous les paramètres d'utilisation finale du produit. Les différentes recettes testées sont consignées dans le tableau suivant.

Tableau 7: Différentes recettes utilisées dans la fabrication des briquettes.

Recettes	Type de tourteau	Type de liant	Proportion de liant dans la briquette (%)
Recette 1	Baratte	Gommy blanc	2,6
Recette 2	Baratte	Gommy blanc	1,95
Recette 3	baratte	Gommy blanc	1,15
Recette 4	Baratte	Gommy blanc	0,6
Recette 5	Baratte	Gommy rouge	2,6
Recette 6	Baratte	Gommy rouge	1,95
Recette 7	Baratte	Gommy rouge	1,15
Recette 8	Baratte	Gommy rouge	0,6
Recette 9	Presse	Gommy blanc	2,6
Recette 10	Presse	Gommy blanc	1,95
Recette 11	Presse	Gommy blanc	1,15
Recette 12	Presse	Gommy blanc	0,6
Recette 13	Presse	Gommy rouge	2,6
Recette 14	Presse	Gommy rouge	1,95
Recette 15	Presse	Gommy rouge	1,15
Recette 16	Presee	Gommy rouge	0,6

### 2.3. Test d'Ébullition de l'Eau (TEE) ou Water boiling test (WBT)

Le Test d'Ébullition de l'Eau (TEE) est une simulation simplifiée du processus de cuisson. Il vise à mesurer l'efficacité avec laquelle un foyer utilise du combustible pour chauffer de l'eau dans une marmite et mesurer la quantité des émissions produites pendant la cuisson. Nous avons utilisé la version 4.3.2 du TEE de 2014 mise en place par l'alliance mondiale pour les foyers améliorés (Global alliance for clean cookstoves).

#### 2.3.1. Déroulement du test d'ébullition de l'eau

Le TEE comporte trois phases qui se suivent immédiatement l'une après l'autre. Le TEE doit être effectué entièrement au moins trois fois pour chaque foyer pour avoir une comparaison fiable entre foyers. Le cahier de test pour TEE 4.2.3 peut contenir des résultats pour 10 tests. Ces phases sont abordées ci-dessous.

- 1) Pour la Phase **haute-puissance avec démarrage à froid**, le testeur commence avec le foyer à température ambiante et utilise un lot pré-pesé de combustible pour faire bouillir une quantité mesurée d'eau dans une marmite. Le testeur remplace alors l'eau bouillante par une marmite d'eau à température ambiante pour réaliser la deuxième phase du test.
- 2) La phase **haute-puissance avec démarrage à chaud** est menée après la première phase pendant que le foyer est encore chaud. De nouveau, le testeur utilise un lot pré-pesé de combustible pour faire bouillir une quantité mesurée d'eau dans une marmite. La répétition du test haute-puissance avec un foyer chaud permet d'identifier les différences de performance entre un foyer quand il est à froid et quand il est à chaud. Ceci est particulièrement important pour les foyers avec une masse thermique élevée, puisque ces foyers peuvent être maintenus chauds dans la pratique.
- 3) La phase de **mijotage** révèle la quantité de combustible nécessaire pour faire mijoter une quantité mesurée d'eau à une température tout juste inférieure au point d'ébullition pendant 45 minutes.

#### A. Temps nécessaire

Il faudra entre 1h 30 et 2 h pour effectuer les phases haute-puissance (démarrage à froid et à chaud) et de basse puissance pour un foyer. Il faudra entre 4h 30 et 6h pour effectuer une série de trois tests d'ébullition de l'eau pour un foyer

## B. Considérations importantes pour les tests

- 1) Le système de cuisson comprend un foyer, un combustible, une marmite et un opérateur. Ces quatre composantes affectent les performances du système.
- 2) Aucun test ne devrait nécessiter que le foyer soit utilisé pour une tâche qui ne serait pas effectuée au cours du fonctionnement normal.
- 3) Il est recommandé d'utiliser un combustible et une marmite identique pour chaque test à fin de comparer les caractéristiques des foyers ou les modèles de foyers.
- 4) La façon d'utiliser un foyer a un effet important sur les résultats des tests de performance du foyer. Tous les tests d'un même foyer et tous les tests pour évaluer les différentes améliorations de conception d'un foyer, doivent être fait avec un mode d'utilisation constant de foyer.

**NB :** La description complète de chacune des trois phases de test est présentée en annexe 4.

### 2.3.2. Mesure des variables

Au cours d'un test complet, plusieurs variables sont mesurées et calculées (formules de calcul en annexe 5). Il s'agit :

- **Quantité de briquettes de tourteau de karité consommée**

Elle correspond à la différence entre les quantités de briquettes pesées au début et à la fin du test. C'est la quantité de briquettes qui a servi à chauffer l'eau dans la marmite et la maintenir à ébullition.

- **Equivalent de brique à tourteau de karité consommée**

Permet d'ajuster la quantité de combustible sec qui a été brûlé afin de tenir compte de deux facteurs : l'énergie qui a été nécessaire pour éliminer l'humidité dans la brique et la quantité de charbon restant non brûlé.

- **Quantité d'eau évaporée**

C'est la quantité d'eau évaporée durant le test.

- **Quantité d'eau restant à la fin du test**

Elle correspond à la différence entre le poids final de la marmite d'eau ( $P_{cf}$ ) et le poids de la marmite vide ( $P$ ).

- **Durée du test**

C'est le temps qu'il faut pour réaliser le test. Elle est obtenue en faisant la différence entre l'heure de démarrage du test et l'heure de la fin du test.

- **Durée du test à température corrigée**

C'est la même que la précédente, mais le résultat a été ajusté à une élévation standard de température soit 75°C. Cet ajustement standardise le résultat et facilite la comparaison entre plusieurs tests qui peuvent avoir été démarrés par de l'eau à températures différentes.

- **Efficacité thermique (rendement thermique)**

L'efficacité thermique ou le rendement thermique est le rapport entre la quantité d'énergie absorbé par la marmite et celle produite par les briquettes à tourteau de karité. Ce rapport est exprimé en pourcentage.

**NB :** Le pouvoir calorifique inférieur des briquettes à tourteau de karité est de 22 420 KJ/kg. Cette valeur a été mesurée par le laboratoire d'énergie du CFREPADE (Centre Francophone de Recherche Partenariale sur l'Assainissement, les Déchets et l'Environnement) en France en 2014.

- **Vitesse de combustion**

Aussi appelé « taux brûlant », c'est le rapport entre l'équivalent de briquettes de tourteau de karité consommé et la durée de test.

- **Consommation spécifique des briquettes à tourteau de karité**

Elle correspond à la quantité de briquettes de tourteau de karité exigée par le foyer pour porter un litre d'eau à ébullition.

- **Consommation spécifique des briquettes de tourteau de karité à température corrigée**

Cette correction de la consommation spécifique rend compte des différences dans les températures initiales de l'eau. Cela facilite la comparaison des foyers testés à des jours différents et à des conditions environnementales différentes. C'est un simple facteur qui normalise le changement de température dans les conditions du test à un changement de température standard de 75°C (25 °C à 100°C).

- **Consommation spécifique d'énergie à température corrigée**

C'est la même explication que l'expression précédente sauf qu'ici il s'agit de l'énergie. Elle exprime la quantité d'énergie requise pour faire bouillir un litre d'eau.

- **Puissance du feu**

Elle correspond à la puissance moyenne du feu pendant les phases haute et basse puissance. Elle est exprimée en KW.

#### **2.4. Analyses des données**

Les données sur les différentes variables caractéristiques de l'efficacité des deux types de foyers améliorés ont été saisies à l'aide du logiciel Excel 2010. Le calcul des moyennes a été également réalisé par ce même logiciel. Pour déterminer l'efficacité de chaque foyer, nous avons effectué une analyse de variance (ANOVA) sur chaque variable caractéristique en vue de déterminer l'effet de la grille et la différence probable entre les foyers à l'aide du logiciel R, version 3.2. Le test de Tukey de 5% de seuil de confiance a été utilisé pour tester les différences significatives entre les moyennes. Les différences sont significatives lorsque  $P < 0,05$ .

**TROISIEME PARTIE: RESULTATS-  
DISCUSSION.**

## I. RESULTATS

### 1.1. CONDITIONNEMENT DU TOURTEAU DE KARITE SOUS FORME DE BRIQUETTES COMBUSTIBLS

#### 1.1.1. Briquettes sans liants

- **Observation lors de la fabrication**

Au cours de la fabrication des briquettes, de teneur en eau initiale de 53,5 % dans la briquette, on peut noter que certaines briquettes n'ont pas pu être fabriquées correctement. Ainsi sur les 48 briquettes, quatre ont dû être reprises car elles se sont brisées pendant le démoulage. Ces quatre briquettes sont respectivement : deux briquettes pleines de petite taille, une grande briquette pleine, une grande briquette creuse.

On peut aussi remarquer qu'une grande quantité d'eau s'évacue du moule au cours de l'application de la pression.

En ce qui concerne la teneur en eau initiale de 50 % dans la briquette, les grandes briquettes de tourteau de presse se tiennent très peu à la sortie de la presse et ne peuvent être manipulées qu'à deux mains en prenant beaucoup de précaution. Ceci n'est pas le cas pour les briquettes de tourteau de baratte. On observe de plus que les briquettes pleines de presse, toujours de grandes tailles, sortent obliques du moule, contrairement aux briquettes de tourteau de baratte qui sont bien droites.

- **Présentation des briquettes**

Les briquettes obtenues sont présentées par les photo 4, 5 et 6.



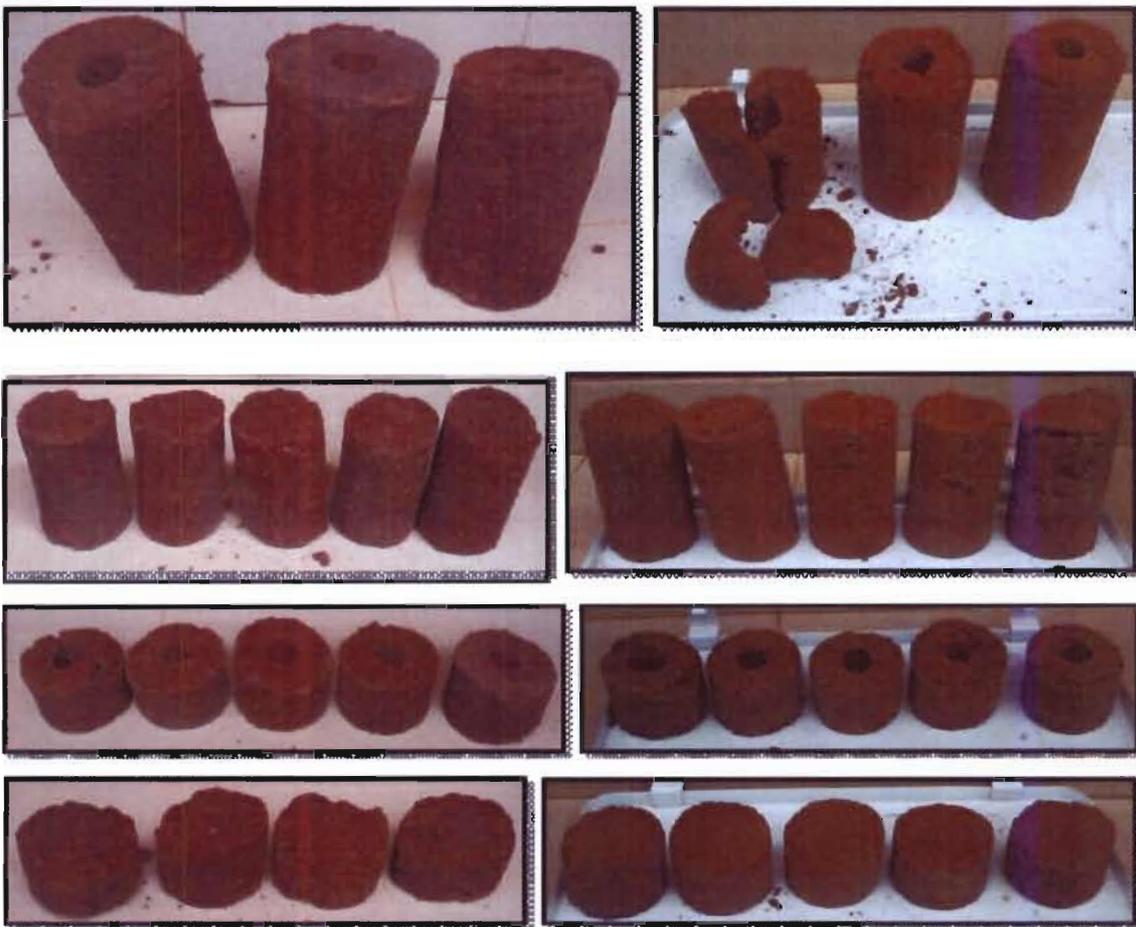
a

b

Photo 4: Briquettes petites et creuses (a) ; briquettes petites et pleine (b) (tourteau de baratte teneur en eau initiale de 53,5%)



Photo 5: Briquettes petite et grande pleine (1) ; briquettes petites pleine et creuse (2) tourteau de presse (teneur en eau initiale de 53,5%)



Tourteau de presse

Tourteau de baratte

Photo 6 : Briquettes (teneur en eau initiale de 50%)

- **Tenue des briquettes**

Au cours du séchage, certaines des briquettes se sont cassées. Le tableau 8 montre le nombre de briquettes cassées. Il ressort que les briquettes à base de tourteau de baratte sont plus fragiles en l'occurrence, celles de grandes tailles et creuses. On dénombre six briquettes de tourteau de baratte cassées contre une seule de tourteau de presse. Les durées de vie moyenne atteintes par ces briquettes cassées varient de 4 à 9 jours. Toutes ces briquettes se sont cassées au cours du processus de séchage car aucune n'a atteint la masse sèche (Minimum 14 jours).

Tableau 8: Nombre de briquettes cassées et leur durée de vie (teneur en eau initiale de 53,5%)

Type de briquette	Nombre cassées sur 10 au départ	Durée de vie moyenne (jour)
Petite briquette creuse de tourteau de baratte	0	0
Petite briquette pleine de tourteau de baratte	1	9
Petite briquette creuse de tourteau de presse	0	0
Petite briquette pleine de tourteau de presse	0	0
Grande briquette creuse de tourteau de baratte	4	7
Grande briquette pleine de tourteau de baratte	1	9
Grande briquette creuse de tourteau de presse	1	4
Grande briquette pleine de tourteau de presse	0	0

Avec la teneur en eau de 50% dans la briquette, nous avons dénombré 4 briquettes de grandes tailles et creuses qui se sont cassées dont trois (3) de tourteau de baratte et une (1) de tourteau de presse. Cela confirme la fragilité des briquettes de grandes tailles, creuses à base de tourteau de baratte.

- **Séchage**

Le séchage des briquettes a été réalisé en fonction des divers paramètres :

- ✓ **Tourteau**

Quel que soit le tourteau utilisé (presse ou baratte), les briquettes présentent les mêmes comportements en termes de séchage (Figure 6).

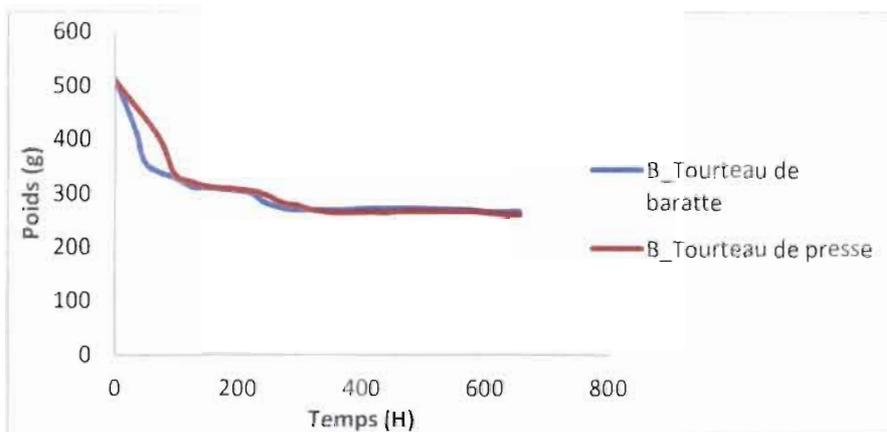


Figure 6: Perte d'humidité en fonction du type de tourteau

- ✓ **Pression appliquée**

La constatation faite est que la presse utilisée n'est pas assez précise pour identifier une différence de pression significative. De plus, on observe que certaines briquettes supposées avoir subi une « pression faible » sont en réalité plus denses, et donc ont subi une pression plus forte, que celle supposées avoir subi une « pression forte », pour les mêmes paramètres. Ainsi, la perte d'humidité des briquettes, pour des paramètres constants, est la même indépendamment de la pression appliquée (tableau 9). L'emplacement du moule sur la presse à double levier (et donc la pression) n'a pas d'effet sur la densité de la briquette formée.

Tableau 9: Influence de la pression appliquée sur le temps et l'efficacité du séchage (tourteau baratte/ tourteau de presse)

	Faible pression		Forte pression	
	Temps moyen pour atteindre la masse sèche (jour)	Perte de masse (%)	Temps moyen pour atteindre la masse sèche (jour)	Perte de masse (%)
Petite briquette creuse	12	52	13	49
Petite briquette pleine	16	46	15	41
Grande briquette creuse	16	52	19	51
Grande briquette pleine	27	45	25	49

✓ **Dimensions du moule/ briquettes pleines-briquettes creuses**

Le tableau 10 met en évidence la durée de séchage des briquettes avec les deux types de moules et la présence ou non d'un cylindre creux au centre de la briquette.

Les briquettes de grandes tailles sont plus lentes en termes de séchage que les petites briquettes. Toujours dans la même logique, les briquettes creuses atteignent la masse sèche bien plus rapidement que les briquettes pleines.

En termes de comparaison, on observe :

- Les petites briquettes creuses atteignent leur masse sèche en 13 jours.
- Les grandes briquettes creuses atteignent leur masse sèche en 27 jours.
- Les petites et les grandes briquettes pleines mettent 32 à 35 jours pour atteindre leur masse sèche.

Toutefois, il n'est pas forcément nécessaire d'atteindre la masse finale pour pouvoir brûler les briquettes. Ainsi le tableau 10 montre qu'en fonction des attentes concernant le taux d'humidité et donc la qualité du combustible, les temps de séchage peuvent être radicalement différents. Il ressort que pour une masse de 10% de plus sur la masse sèche, la durée de séchage des briquettes creuses de petite taille est réduite de 4 jours. Lorsqu'il s'agit des grandes briquettes creuses, la réduction est de 13 jours. L'écart est plus important avec les briquettes pleines. Avec 10% de plus sur la masse sèche, la durée de séchage est réduite de 12 jours pour les petites briquettes et 13 jours pour les grandes briquettes.

Nous remarquons que plus la masse s'approche de sa valeur finale et plus l'écart entre les temps de séchage des différentes briquettes augmentent. Une fois la masse sèche atteinte, une différence du ratio des masses initiales sur les masses finales est observée entre les briquettes creuses et les briquettes pleines quelle que soit leur taille.

Tableau 10: Variation du temps de séchage en fonction de la qualité de la briquette souhaitée.

	Petite briquette creuse	Petite briquette pleine	Grande briquette creuse	Grande briquette pleine
Masse sèche (g)	272 en 14 jours	335 en 32 jours	542 en 26 jours	659 en 35 jours
+ 5% de la masse sèche	285 en 12 jours	352 en 26 jours	569 en 15 jours	691 en 28 jours
+ 10% de la masse sèche	299 en 10 jours	370 en 20 jours	598 en 13 jours	726 en 22 jours
Ratio masse sèche/ masse initiale	42%	45%	42%	44%

Le tableau 11 met en évidence l'intérêt d'avoir un cylindre creux au centre de la briquette sur la durée du séchage. Cela est particulièrement visible au niveau des briquettes de grandes tailles. Ainsi on observe une différence de 10 jours entre les briquettes creuses et pleines de grandes tailles. Aussi avec ces mêmes briquettes, la perte de masse est plus importante avec les creuses (52%) contre 47% pour les pleines. C'est l'inverse quand il s'agit des petites briquettes. Ainsi on obtient une perte de masse de 41% de perte de masse pour les briquettes creuses contre 46% pour les briquettes pleines.

Tableau 11: Influence de la présence ou non d'un cylindre creux au centre de la brique sur le temps et l'efficacité du séchage (baratte/ presse)

	Petit moule		Grand moule	
	Brique pleine	Brique creuse	Brique pleine	Brique creuse
Temps moyen pour atteindre la masse sèche (jour)	16	15	26	16
Perte de masse en pourcentage	46	41	47	52

### ✓ Type de séchage

Le type de séchage a quant à lui une influence sur la variation de masse comme le montre la figure 7. Ainsi pour une même valeur pondérale souhaitée, le séchage solaire atteindra ce résultat avec une avance d'environ 4 jours. De plus, le séchage solaire implique une réduction de la masse finale des briquettes en moyenne de 8 % mettant en évidence que ce combustible serait légèrement de meilleure qualité que les briquettes séchées à l'ombre. Ainsi le séchage solaire permet de diminuer le temps de séchage ainsi que la masse finale.

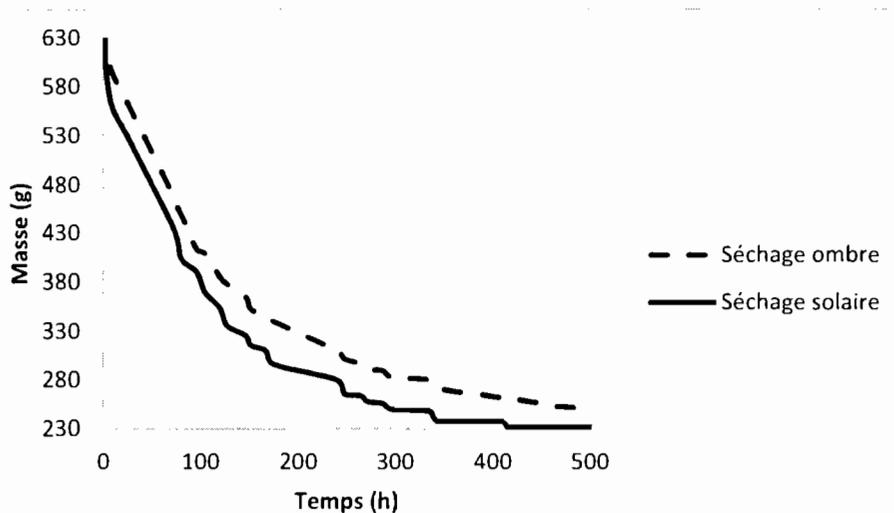


Figure 7: Comparaison des deux types de séchages.

- **Aptitude à la combustion**

Les briquettes faites à base de tourteau de baratte se consomment bien par rapport à celles à base de tourteau de presse. (Photo 7 et 8). Ces briquettes de tourteau de baratte brûlent en dégageant une grosse flamme et avec une production très faible de fumées. La combustion des briquettes à tourteau de presse demande beaucoup d'entretien et produit énormément de fumées.



Photo 7 : Aperçue de la combustion des briquettes de tourteau de baratte sans utilisation de liant



Photo 8 : Aperçu de la combustion des briquettes de tourteau de presse sans liant

- **Solidité des briquettes sans liant**

Concernant les ruptures, il faut remarquer que si la briquette se brise lorsqu'elle est encore humide et donc particulièrement en sortie de moule, elle se transforme en poudre et il faut recommencer l'opération de briquetage. Par contre, une fois que les briquettes sont bien sèches, les ruptures impliquent peu d'effritement. Les briquettes se brisent en gros morceaux encore compacts. On observe bien que les briquettes se brisent à plus de 60% soit 13 briquettes, mais restent en morceaux compacts plus ou moins gros. (Photo 9)



Photo 9 : Impact du transport sur une route endommagée sur les briquettes (baratte)

**Remarque :**

Une forte présence de moisissure a été observée sur les briquettes fabriquées à base du tourteau de presse sur toute la surface. Par contre celles à base de tourteau de baratte présentent un développement de moisissure extrêmement réduit (photo 10, briquette n°2). Ceci est une observation faite, et des investigations doivent être menées pour comprendre l'origine et la conséquence probable sur la santé des utilisatrices. Toutefois, la présence de moisissure n'affecte aucunement la combustibilité des briquettes.

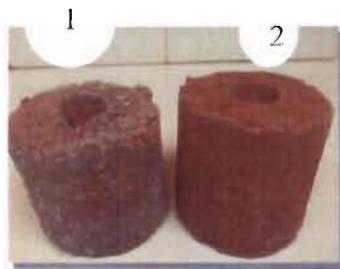


Photo10 : Forte présence de moisissure sur la briquette de tourteau de presse (1)

### 1.1.2 Briquettes avec liant

Cette partie de l'étude concerne uniquement la solidité et l'aptitude des briquettes à la combustion, la partie précédente ayant donné déjà des résultats sur le séchage en fonction des différents paramètres.

- **Observation pendant la fabrication**

Au cours de la fabrication des différentes séries des briquettes avec l'utilisation de liant, il a été observé une facilité de démoulage des briquettes après compaction. En effet le liant constitue une sorte de lubrifiant permettant ainsi à la briquette formée de glisser facilement sur les côtés du moule. Notons qu'il n'y a pas eu de briquettes cassées contrairement aux briquettes sans liant où nous en avons constaté.

- **Présentation des briquettes.**

Les photos 11 et 12 montrent les briquettes obtenues avec l'utilisation de diverses proportions de liant.

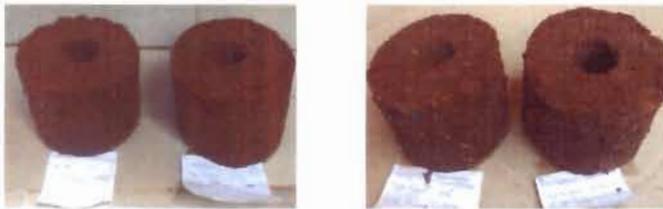


Photo 11: Briquettes avec tourteau de baratte (gauche) ; tourteau de presse (droite), taux liant dans la briquette 2,6%.



Photo 12 : Briquettes tourteau de baratte (taux liant 1,95%)

- **Solidité**

Il ressort du tableau 12 que le gommy blanc est plus efficace en terme de liant que le gommy rouge. Les recettes 1 et 2 (gommy blanc + tourteau de baratte) permettent d'obtenir des briquettes résistantes au choc. Toutefois, les briquettes à base du tourteau de presse sont solides avec les deux types de liants car même avec 0,6% de liant, elles sont solides.

Tableau 12: Résultat du test de résistance au choc des briquettes

Recettes	Type de tourteau	Type de liant	Taux de liant dans la briquette (%)	Observations
Recette 1	Baratte	Gommy blanc	2,6	Briquettes intactes
Recette 2	Baratte	Gommy blanc	1,95	Briquettes intactes
Recette 3	Baratte	Gommy blanc	1,15	Légère brisure des côtés mais conservent la forme
Recette 4	Baratte	Gommy blanc	0,6	Briquettes se brisent en de gros morceaux
Recette 5	Baratte	Gommy rouge	2,6	Briquettes intactes
Recette 6	Baratte	Gommy rouge	1,95	Légère brisure des côtés mais conservent leur forme
Recette 7	Baratte	Gommy rouge	1,15	Briquettes se brisent en gros morceaux
Recette 8	Baratte	Gommy rouge	0,6	Briquettes se brisent en petits morceaux
Recette 9	Presse	Gommy blanc	2,6	Briquettes intactes (pas de brisure)
Recette 10	Presse	Gommy blanc	1,95	Briquettes intactes
Recette 11	Presse	Gommy blanc	1,15	Briquette intactes
Recette 12	Presse	Gommy blanc	0,6	Briquettes intactes
Recette 13	Presse	Gommy rouge	2,6	Briquettes intactes
Recette 14	Presse	Gommy rouge	1,95	Briquettes intactes
Recette 15	Presse	Gommy rouge	1,15	Légère brisure des côtés mais conservent leur forme
Recette 16	Presse	Gommy rouge	0,6	Légère brisure des côtés mais conservent leur forme

- **Aperçu de la combustion des briquettes**

Les expériences précédentes ont montré que les briquettes sans liant se consomment très bien mais qu'elles étaient plus sensibles au choc. Ces présentes briquettes avec liant sont bien solides. Il était donc question de savoir si elles se consumaient comme celles sans liant. Ainsi des échantillons ont été soumis à de simples tests d'observation de la combustion. Les résultats obtenus sont plus tôt satisfaisants car on observe une bonne flamme quel que soit le type de liant utilisé (photos 13,14 et 15). Toutefois, la proportion de liant influence la qualité de cette flamme : moins il y a de liant et plus la combustion est meilleure.

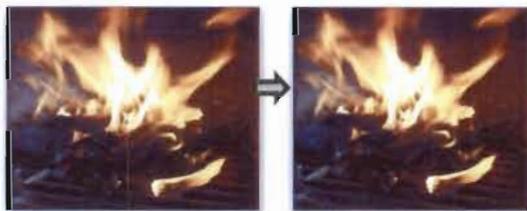


Photo 13: Illustration de la combustion des briquettes avec liant (gommy blanc à 1,95%)

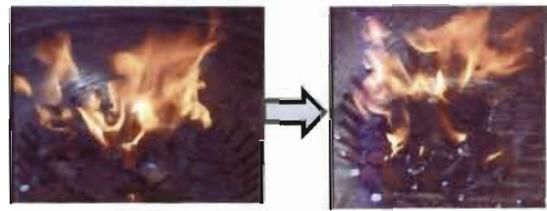


Photo 14 : Illustration de la combustion des briquettes avec liant (gommy rouge à 1,95%)



Photo 15 : Illustration de la combustion des briquettes de tourteau de baratte (0,6% de gommy blanc)

D'une manière générale, on observe une très bonne combustion avec une grosse flamme (0,6% gommy blanc). Cette proportion de liant est très faible, les briquettes se consomment parfaitement comme celles sans utilisation de liant. Cependant, on n'obtient pas une quantité importante de résidu (charbon) comme dans le cas des briquettes à fortes proportions de liant

En conclusion, les briquettes faites en utilisant du gommy blanc à faible proportion sont très intéressantes pour la combustion. Cependant, en cas de choc très important (lors des transport), elles peuvent se briser surtout quand il s'agit du tourteau de baratte. Il faudra donc choisir une proportion de liant supérieur à 0,6% pour tenir compte de l'aspect de transport et de stockage des briquettes en condition réelle. Quant aux briquettes à base du gommy rouge à faible taux (0,6%), elles sont friables avec l'utilisation du tourteau de baratte mais solides avec le tourteau presse.

### **1.1.3. Caractéristiques du combustible**

#### **1.1.3.1. Dimensions**

Nous avons utilisé deux moules dont les dimensions ont été données dans la section matériel et méthode. Avec le grand moule, nous avons obtenu des briquettes de hauteurs comprises entre 15 et 16 cm et de diamètre 10 cm. Quant au petit moule, la hauteur moyenne des briquettes est de 7,5 cm avec un diamètre de 10 cm.

#### **1.1.3.2. Densité**

En ce qui concerne les briquettes sans utilisation de liant, nous avons obtenu une densité de 0,49. Les valeurs 0,58 et 0,52 ont été obtenues respectivement pour les briquettes à base de gommy blanc et de gommy rouge.

## 1. 2. RESULTAT DU TEST D'EBULLITION DE L'EAU

### 1.2.1. Phase haute puissance avec démarrage à froid (phase 1)

Le tableau 13 présente les résultats de la première phase (haute puissance avec démarrage à froid) du test d'ébullition de l'eau réalisé sur les deux foyers utilisés dans la présente étude. On remarque qu'à température corrigée, le foyer multi marmites (construit pas SOS Sahel) présente la plus faible valeur de temps d'ébullition (50 min) par rapport aux deux autres foyers. Le foyer avec marmite unique présente un temps d'ébullition faible (52min) lorsque nous utilisons la nouvelle grille. Le test de Tukey réalisé n'a révélé aucune différence significative au seuil de 5% entre les deux types de foyers et entre les deux grilles. Pour ce qui est de la vitesse de consommation des briquettes de tourteau de karité, le foyer multi-marmites présente la plus grande valeur (176 g/min) par rapport au foyer à marmite unique. Ce dernier présente une faible consommation avec la nouvelle grille. Toutefois, on n'observe aucune différence significative au niveau des grilles ( $P > 0,05$ ). Cependant, entre les foyers il existe une différence significative au cours de cette phase.

Au niveau du rendement thermique ( $h_c$ ), c'est le foyer à marmite unique muni de la nouvelle grille qui affiche la valeur la plus élevée, soit 37,52 %. Cependant, le test de Tukey ne révèle aucune différence significative entre les foyers et entre les grilles.

En ce qui concerne la consommation spécifique à température corrigée, elle est faible au niveau du foyer à marmite unique. Lorsque nous utilisons la nouvelle grille, on note une valeur de 51 g/l et avec l'ancienne grille cette valeur est de 58g/l. Le foyer multi-marmites présente une valeur plus élevée pour cette variable, soit 69 g/l. Cependant l'analyse ANOVA réalisée n'a montré aucune différence significative entre les foyers ( $P = 0,141$ ) et entre les grilles ( $P = 0,463$ ).

Avec le foyer multi-marmites, nous observons une puissance de feu trois plus élevée que le foyer à marmite unique, soit 63,93 KW. Le foyer à marmite unique donne avec l'ancienne et la nouvelle grille respectivement 21,89 et 21,24KW en moyenne. Pour cette variable, on note une différence significative entre les foyers de façon globale. Cependant, aucune différence significative n'a été observée entre les grilles au cours de cette phase ( $P > 0,05$ ).

A l'exception du temps d'ébullition de l'eau, c'est le foyer à marmite unique muni de la nouvelle grille qui présente de meilleures performances durant cette phase du test.

Tableau 13: Moyennes des variables de caractérisation et de mesure d'efficacité des foyers (phase 1)

Variables (unités)	Foyer multi marmites	Foyer marmite unique (ancienne grille)	Foyer marmite unique (nouvelle grille)	<i>P-value</i> foyer	<i>P-value</i> grille
$\Delta t_c$ (min)	46,67	56,33	48		
$\Delta t_c^T$ (min)	50	62	52	0,999	0,083
$r_{cb}$ (g/min)	176	59	57	<0,001	1
$h_c$ (%)	33,35	31,86	37,52	0,883	0,662
$SC_h$ (g/l)	63	58	47		
$SC_h^T$ (g/l)	69	64	51	0,141	0,463
$SE_h^T$ (g/kj)	1544	1434	1145		
$FP_h$ (Kw)	66	21,9	21,2	<0,001	1

Avec :

$\Delta t_c$  : Temps d'ébullition

$\Delta t_c^T$ : Temps d'ébullition corrigé

$r_{cb}$ : vitesse de combustion

$h_c$  : Efficacité thermique

$SC_h$ : Consommation spécifique des briquettes de tourteau de karité

$SC_h^T$ : Consommation spécifique des briquettes de tourteau de karité à température corrigée

$SE_h^T$ : Consommation spécifique d'énergie à température corrigée.

$FP_h$  : Puissance du feu

### 1.2.2. Phase haute puissance avec démarrage à chaud (phase 2)

Au cours de cette phase de test, le foyer à marmite unique muni de la nouvelle grille donne un temps d'ébullition faible à température corrigé par rapport aux autres, soit 46 min en moyenne. Cette valeur est très élevée pour le foyer à marmite unique muni de l'ancienne grille (61 min), quant au foyer multi-marmites, nous avons observé un temps d'ébullition de 47 min. Le test de Tukey au seuil de confiance 5% n'a révélé aucune différence significative entre les foyers ( $P = 1$ ). Toutefois, il existe une différence significative entre les grilles ( $P = 0,004$ ).

Pour ce qui concerne la variable vitesse de combustion ou « taux de brûlant », le foyer à marmite unique montre des valeurs plus faibles par rapport au foyer multi-marmites, soient 62 g/min avec l'ancienne grille et 63g/l avec la nouvelle grille. Le foyer multi-marmites donne une valeur nettement supérieure (175 g/min). Avec le test de Tukey à 5% de seuil de confiance on observe une différence significative entre les foyers. Toutefois, il n'a révélé aucune différence significative entre les grilles. (Tableau 14)

Tout comme dans la phase précédente, c'est le foyer à marmite unique en utilisant la nouvelle grille qui donne le rendement thermique le plus élevé (39,58%). Avec l'utilisation de l'ancienne grille dans ce foyer, on observe une régression du  $h_c$  (33,99%). Le foyer multi-marmites, affiche un rendement thermique de 37,21 %. Cependant aucune différence significative n'a été observée entre les grilles et entre les foyers par le test de Tukey ( $P > 0,05$ ). Au niveau de la consommation spécifique des briquettes à température corrigée, le foyer à marmite unique muni de la nouvelle grille donne une valeur moyenne nettement faible comparativement aux autres soit 51g/l contre 66 et 60g/l respectivement pour le foyer à marmite unique muni de l'ancienne grille et le foyer multi-marmites. L'analyse ANOVA réalisée n'a révélé aucune différence significative entre les foyers ( $P = 0,841$ ) et entre les grilles. ( $P = 0,317$ ).

Comme au cours de la phase précédente, le tableau 14 montre une forte valeur de puissance thermique avec le foyer multi-marmites (65,23KW) par rapport au foyer à marmite unique. On note les valeurs de 23,03 et 23,67KW respectivement avec l'utilisation de l'ancienne grille et de la nouvelle grille dans le foyer à marmite unique. Le test de Tukey au seuil de 5% de confiance a révélé une différence significative entre les foyers. Cependant, il ne révèle aucune différence significative entre les grilles.

Pour toutes les variables étudiées, c'est le foyer à marmite unique (GIZ) muni de la nouvelle grille qui présente de meilleures performances au cours de cette phase de haute puissance avec démarrage à chaud.

Tableau 14: Moyennes des variables de caractérisation et de mesure d'efficacité des foyers (phase 2)

Variables (unités)	Foyer multi marmites	Foyer marmite unique (ancienne grille)	Foyer marmite unique (nouvelle grille)	<i>P-value</i> foyer	<i>P-value</i> grille
$\Delta t_c$ (min)	40,33	52,67	40,33		
$\Delta t_c^T$ (min)	47	61	46	1	0,004
$r_{cb}$ (g/min)	175	62	63	<0,001	1
$h_c$ (%)	37,21	33,99	39,58	0,996	0,662
$SC_h$ (g/l)	51	57	44		
$SC_h^T$ (g/l)	60	66	51	0,841	0,317
$SE_h^T$ (g/kj)	1348	1476	1141		
$FP_h$ (Kw)	65,23	23,03	23,67	<0,001	1

### 1.2.3. Phase basse puissance ou mijotage (Phase 3)

Le tableau 15 présente les résultats relatifs aux performances des foyers au cours de la troisième phase de test d'ébullition de l'eau, dite phase de mijotage. Il ressort qu'en termes de vitesse de consommation des briquettes, le foyer multi-marmites est plus rapide avec une consommation de 146g de briquettes par minute. Ensuite vient le foyer à marmite unique muni de l'ancienne grille (55g/min en moyenne). Le foyer à marmite unique muni de la nouvelle grille donne la plus faible vitesse soit 46 g/min. L'analyse ANOVA a révélé une différence significative entre les foyers. Toutefois, aucune différence n'a été observée entre les grilles ( $P > 0,05$ ).

Le rendement thermique le plus élevé est observé au niveau du foyer à marmite unique muni de la nouvelle grille (38,34%) au cours de cette phase 3. En utilisant l'ancienne grille dans ce foyer, le rendement chute à 17,96%. Le foyer multi-marmites présente le plus faible rendement avec 10,42%. Le test de Tukey, au seuil de 5% de confiance a révélé une différence significative entre les foyers et entre les grilles au cours de cette phase 3.

Le foyer multi-marmites affiche une forte consommation spécifique (159 g/l). La plus faible valeur est observée au niveau de foyer à marmite unique muni de la nouvelle grille (39 g/l). Le test de Tukey a révélé une différence significative entre les grilles, mais cette différence n'est pas significative entre les foyers au cours de cette phase.

La puissance du feu du foyer multi-marmites est toujours supérieure à celle du foyer à marmite unique comme précédemment constaté au cours des deux phases de test. On note une différence significative entre les foyers ( $P < 0,001$ ), cependant aucune différence significative n'a été observée entre les grilles au cours de cette phase ( $P = 0,999$ ).

Le foyer à marmite unique muni de la nouvelle grille donne une valeur plus élevée de flexibilité (1,28), suivi du foyer multi-marmite (1,22). Le foyer à marmite unique muni de l'ancienne grille donne la plus faible valeur avec 1,09.

Au cours de cette phase de mijotage, le foyer à marmite unique présente encore les meilleures performances sur l'ensemble des variables.

Tableau 15: Moyennes des variables de caractérisation et de mesure d'efficacité des foyers (phase 3)

<b>Variabiles (unités)</b>	<b>Foyer multi marmites</b>	<b>Foyer marmite unique (ancienne grille)</b>	<b>Foyer marmite unique (nouvelle grille)</b>	<b><i>P-value</i> foyer</b>	<b><i>P-value</i> grille</b>
$r_{cb}(\text{g/min})$	146	55	46	<0,001	0,999
$h_c(\%)$	10,42	17,96	38,34	< 0,001	< 0,001
$SC_h(\text{g/l})$	159	45	39	< 0,001	0,981
$SE_h^T(\text{g/kj})$	3554	1013	877		
$FP_h(\text{kw})$	54,38	20,61	17,01	<0,001	0,999
<b><i>TDR</i></b>	1,22	1,09	1,28		

***TDR*** : Flexibilité du foyer

## II. DISCUSSION

### 2.1. Conditionnement du tourteau de beurre de karité sous forme de briquettes

Les résultats de l'étude sur les briquettes sans utilisation de liant, nous ont permis de constater des brisures qui sont dues en général à la pluie et aux manutentions. Cela met en évidence une fragilité de ces briquettes surtout celles présentant un creux au centre. Au contraire, les briquettes fabriquées avec l'utilisation de liant, que ce soit le gommy blanc ou rouge, sont parfaitement solides sans aucune rupture. En effet, selon CDI et CRA, le liant permet d'éviter un fractionnement poussé des briquettes et elles peuvent être séchées au soleil. De plus le gommy blanc, à un taux compris entre 1 et 2% offre une bonne solidité aux briquettes faites avec les deux types de tourteaux. Quant au gommy rouge, il est efficace avec le tourteau de presse même à une proportion inférieure à 1%. Des résultats similaires ont été constatés par Rongead, 2013 sur les briquettes de charbon de coque d'anacarde. Sans noter les proportions de liant, il révèle une efficacité du gommy blanc par rapport au gommy rouge. Le liant est nécessaire pour maintenir les briquettes bien compactes car en général les presses manuelles ont une faible pression (CDI et CRA, 1993). Il faut signaler que la qualité du tourteau joue énormément sur la capacité de compaction notamment la durée et la façon de stockage. En effet, lorsque le tourteau est entassé pendant longtemps, nous constatons que les couches inférieures noircissent à cause de l'absence d'oxygène. Il perd donc sa capacité de se compacter et même si la proportion de liant est élevée, les briquettes s'effritent après deux ou trois jours de séchage. Pour une meilleure compaction du tourteau, après la production, celui-ci doit être étalé au soleil et passer à la presse immédiatement.

Il est ressorti de notre étude que le type de tourteau n'a aucune influence sur la durée de séchage des briquettes. En effet, qu'il s'agisse du tourteau de presse ou de baratte la masse sèche des briquettes est obtenue sur une même durée de séchage avec des quantités similaires de tourteau au départ. Mais la masse sèche est atteinte différemment en fonction de la taille et de la présence ou non d'un creux au centre de la briquette. En effet, les briquettes creuses de petites tailles sèchent en deux semaines alors que celles de grandes tailles mettent en moyenne 25 jours pour sécher. Les briquettes pleines (petite et grande taille) mettent plus d'un mois, soit 34 jours en moyenne avant d'atteindre leur masse sèche. Cet état de fait s'explique par non seulement la différence de taille, mais aussi par l'importance de la surface de contact des briquettes creuses. Le cylindre creux au centre augmente la surface de contact avec l'air et la chaleur accélérant ainsi le processus de séchage.

Le séchage solaire quant à lui réduit la durée du séchage selon nos résultats. Ainsi pour deux briquettes creuses de mêmes dimensions, celle ayant subi un séchage solaire atteint la masse sèche 2 jours avant celle ayant subi un séchage à l'ombre lorsque les briquettes sont creuses. Cet écart est de 6 jours en moyenne lorsqu'il s'agit de briquettes pleines. Le soleil à effet direct sur la perte d'humidité, il favorise une déshydratation rapide des briquettes et les rend plus aptes à la combustion.

La combustion des briquettes à tourteau de baratte sans utilisation de liant dégage une grosse flamme après une à deux minutes de l'allumage. Il faut cependant associer des morceaux de bois aux briquettes pour permettre une bonne amorce du feu (CDI-CRA, 1993). En comparaison avec la combustion des briquettes à tourteau de presse sans liant, la différence est nette, car tout au long de la combustion, nous constatons un dégagement de fumée dense de couleur blanche avec une flamme moins importante. Le tourteau de baratte est plus apte à la combustion que celui de presse. Les raisons peuvent être liées au taux d'huile plus élevé dans le tourteau de baratte. Toutefois, il peut arriver que l'extraction de l'huile par la méthode de barattage conduit à du tourteau ayant les mêmes proportions que celui de presse.

L'utilisation de liant avait comme but de donner une bonne résistance aux briquettes sans influencer la qualité de la combustion. Il ressort que le taux de liant dans la briquette joue énormément sur la qualité de la flamme. Ainsi pour l'amidon (gommy blanc) à plus de 2%, nous constatons une production moyenne de flamme et très faible quand il s'agit de la sève d'Acacia (gommy rouge). Par contre lorsque la proportion de liant est comprise entre 1 et 2%, la production de la flamme est nettement meilleure et voire semblable au cas des briquettes sans utilisation de liant. Cependant, il faut noter que de très faibles taux de liant (< à 1 %) rendent les briquettes de tourteau de baratte sensibles au choc même si elles brûlent très bien. Toutefois, il faut noter que, tout comme la qualité du tourteau joue sur sa capacité de se compacter, elle joue aussi sur sa capacité à se consumer. En effet, le vieux tourteau (plus de 6 mois de stockage) se consumera difficilement par rapport à un tourteau d'un mois car ayant perdu une bonne partie de l'huile qu'il contient.

## 2.2. Test d'ébullition de l'eau

Il convient de relever qu'il y'a trois variables qui caractérisent les foyers. Il s'agit de la vitesse de combustion, de la puissance et de la flexibilité du foyer et trois autres paramètres qui mesurent l'efficacité, c'est la consommation spécifique, le temps d'ébullition et l'efficacité thermique.

La vitesse de combustion mesure la quantité moyenne en gramme de briquelette brûlée par minute pendant le test. Les résultats du test pour la phase haute puissance avec démarrage à froid (phase1) a donné une vitesse de 176g/min pour le foyer multi-marmites et respectivement 59g/min et 57 g/min pour le foyer à marmite unique muni de l'ancienne grille et de la nouvelle grille. La même tendance a été observée pour les deux autres phases avec des valeurs plus fortes à la phase 2 et faibles à la phase de mijotage. Cela traduit que le foyer multi-marmites est plus rapide que le foyer à marmite unique en termes de consommation des briquelettes. Toutefois, l'utilisation de la nouvelle grille dans le foyer à marmite unique diminue considérablement la vitesse de consommation, elle permet d'économiser environ 3% de briquelettes sur le foyer avec l'ancienne grille durant cette phase.

La puissance du feu est une variable qui mesure la rapidité avec laquelle les briquelettes sont brûlées, rapporté en KW. Pour le foyer multi-marmites, la valeur de 65,93 KW a été observée contre 21,89 KW pour le foyer à marmite unique muni de l'ancienne grille et 21,24 KW avec l'utilisation de la nouvelle grille durant la phase de haute puissance avec démarrage à froid. Dans le foyer multi-marmites, les briquelettes brûlent rapidement et par conséquent dégagent une quantité importante de chaleur. La nouvelle grille n'a pas d'impact notable sur la puissance durant cette phase car l'ancienne grille donne une valeur plus importante.

Cependant, la phase haute puissance avec un démarrage à chaud (phase 2) révèle une puissance légèrement forte avec l'utilisation de la nouvelle grille, (23,66 KW en moyenne) contre 23,03KW avec l'utilisation de l'ancienne grille. Cela traduit une disparité de la puissance du feu en fonction de la phase. En moyenne, 65,23 KW est observé pour le foyer multi-marmites durant cette phase2. En effet, ce foyer a une taille plus importante que le foyer à marmite unique (1,5 mètre de diamètre contre 1 m) avec une chambre de combustion plus volumineuse, cela contribue à augmenter la puissance de ce foyer. La puissance est une variable qui indique la taille du foyer (global alliance for clean cookstoves, 2014).

La phase de mijotage donne des valeurs moyennes plus faibles avec toujours une puissance élevée pour le foyer multi-marmites (54,38 KW), confirmant la rapidité de consommation des briquettes dans ce foyer par rapport au type GIZ.

La flexibilité indique en quelle proportion l'utilisateur a ajusté la chaleur entre la phase de haute puissance et de basse puissance. Le foyer à marmite unique muni de la nouvelle grille donne une valeur plus élevée avec 1,28, ensuite vient le foyer multi-marmites avec une valeur de 1,22 et en fin le foyer à marmite unique muni de l'ancienne grille avec une valeur de 1,09. Cette valeur forte constatée avec l'utilisation de la nouvelle grille dans le foyer à marmite unique, indique un plus grand écart entre la haute puissance et la basse puissance traduisant ainsi une plus grande possibilité de contrôler la puissance du feu à ce niveau.

Le temps d'ébullition à température corrigée indique le temps qu'il a fallu pour que la marmite atteigne la température d'ébullition corrigée pour considérer une élévation de température de 75°C (25°C à 100°C) entre le départ et l'ébullition. C'est un facteur important pour la cuisson des aliments.

Pendant la phase 1 du test, avec l'utilisation de la nouvelle grille dans le foyer à marmite unique, nous obtenons une durée faible (52min) comparativement à l'utilisation de l'ancienne grille (62 min), mais cette valeur est plus élevée que celle observée au niveau du foyer multi-marmites, soit 50 min. En effet, la nouvelle grille de forme circulaire avec des barreaux plus réduits (espacement = 1,5 cm) et le pourtour fermé permet de conserver les briquettes et donc les flammes, ce qui accélère le chauffage de la marmite. Il a été constaté avec l'ancienne grille, une perte des briquettes entre les barreaux (plus larges, 4 cm d'espacement) et par les côtés. Cela explique le temps d'ébullition plus élevé constaté au niveau du foyer à marmite unique muni de l'ancienne grille. Durant la phase 2 du test, c'est le même constat avec cependant des valeurs plus faibles de durée. Le foyer à marmite unique, avec nouvelle grille, arrive à ébullition avec 8 min de moins que dans la précédente phase soit 46 min. Le foyer multi-marmites baisse de 3 min (47min) et avec l'ancienne grille dans le foyer à marmite unique, on observe une réduction d'une minute pour cette phase. Pendant cette phase, le foyer est déjà chaud et donc, le temps mis pour que l'eau atteigne l'ébullition est faible par rapport à la première phase où le foyer est encore à température ambiante.

L'efficacité thermique ou rendement thermique ( $h_c$ ) est une mesure de la proportion de chaleur produite par les briquettes de tourteau de karité et qui est transmise directement à l'eau dans la marmite. Quant à la consommation spécifique à température corrigée ( $SC_h^T$ ), c'est la quantité de briquettes de tourteau de karité qu'il faut pour faire bouillir 1 litre d'eau (ou en maintenir l'ébullition).

A la phase 1 du test, le foyer multi-marmites à réaliser une consommation spécifique moyenne de 63g/l pour un rendement de 33,35%. Pour le foyer à marmite unique muni de l'ancienne grille, on note une  $SC_h^T$  de 64g/l pour un  $h_c$  de 31,86%. Avec l'utilisation de la nouvelle grille la consommation spécifique baisse, soit 51 g/l avec un rendement plus haut (37,52%). Une fois de plus, la nouvelle grille offre une bonne performance au foyer à marmite unique confirmant que l'ancienne grille ne convient pas aux briquettes à tourteau de karité. Quant au foyer multi-marmites, il est plus efficace que le foyer à marmite unique muni de l'ancienne grille selon cette phase.

Pendant la phase 2, c'est la même situation avec cependant des rendements meilleurs. Ainsi à même consommation spécifique que la phase 1 (51g/l) le rendement du foyer à marmite unique avec la nouvelle grille passe de 37,52 % à 39,58 %, soit une hausse de 2,06 %. La  $SC_h^T$  avec l'utilisation de l'ancienne grille a lui augmenté de 2g/l, soit 66g/l pour un rendement de 33,99 %. Pour le foyer multi-marmites, la consommation diminue de 3g/l (60g/l) avec un rendement à la hausse (37,21%). Les meilleurs rendements et les faibles consommations de briquelette durant cette phase s'expliquent par le fait que le foyer étant déjà chaud, la grande partie de la chaleur produite par les briquettes n'est pas absorbée par le foyer mais directement transmise à la marmite. Celle-ci reçoit donc une quantité importante de chaleur qu'elle transmet à l'eau. En effet, selon Koala (2012), la diminution de consommation spécifique durant la phase 2 s'explique par le fait que le transfert de chaleur entre le combustible et le foyer déjà chauffé est faible. Donc le foyer dissipe plus la chaleur qu'il en accumule et le résultat se traduit par un réchauffement rapide de l'eau contenu dans la marmite. Au regard des résultats de cette phase, nos foyers expérimentés sont meilleurs lorsqu'ils sont à chaud.

Nos résultats montrent une corrélation entre ces deux variables pour les deux premières phases de test. Ainsi lorsque la valeur de  $SC_h^T$  est faible, celle du rendement est élevée. Une valeur faible de  $SC_h^T$  signifie qu'il faut peu de combustible pour chauffer 1 litre d'eau ce qui indique un bon rendement du foyer en question et donc une efficacité plus élevée.

Cette corrélation est confirmée durant la phase de mijotage. Toutefois les valeurs observées sont nettement faibles en termes de rendement durant cette phase sauf avec l'utilisation de la nouvelle grille dans le foyer à marmite unique. Ainsi la  $SC_h^T$  du foyer multi-marmites qui était de 60g/l passe à 159g/l avec un rendement bas (10,42%). Au cours de la phase de mijotage, la consommation spécifique du foyer à marmite unique baisse considérablement. Avec l'ancienne grille, elle est de 45 g/l pour un rendement bas soit 17,96% en moyenne. Si nous utilisons la nouvelle grille le rendement s'améliore (38,34 %) avec une  $SC_h^T$  faible (40g/l). Etant donné que la durée du test est bien défini durant cette phase (45min) et qui est faible par rapport à celle des deux autres phases, la consommation du combustible dépendant de la durée du test sera faible. Le même constat a été fait par Sana (2011) sur les foyers dolo.

Les rendements des deux types de foyer en utilisant les briquettes de tourteau de karité comme combustible sont en moyenne 27% et 38,7% respectivement pour le foyer multi-marmites et le foyer à marmite unique avec utilisation de la nouvelle grille. Ces rendements, comparativement à d'autres types de foyers, sont meilleurs.

Ainsi, le foyer à trois marmites produit au Viet Nam et utilisant la paille comme combustible présente un rendement thermique de 15 à 18% (Béatrix et *al.* 1995). Selon cette même source, le foyer CETA (Centre d'Expérimentation en Technologie Appropriée), modifié utilisant des briquettes de déchets végétaux et le foyer Burkindo multi-marmites (à dolo) ont respectivement un rendement thermique de 22 à 26% et de 35%. Ce dernier rendement thermique du foyer Burkindo est inférieur à la valeur obtenu avec le foyer à marmite unique muni de la grille réadaptée mais supérieur à la valeur obtenue pour le foyer multi-marmites que nous avons utilisé. Aussi, le foyer Ouaga métallique à un rendement thermique de 24,5 % avec l'utilisation de bois comme combustible (IRSAT, 2008).

Cependant, nos rendements sont faibles comparativement à ceux obtenu par Sana (2011) sur le foyer dolo avec l'utilisation de l'huile de jatropha comme combustible, donnant un rendement moyen de 44%. Il faut toutefois noter la nature différente du combustible.

## CONCLUSION GENERALE

A l'issue de cette étude, il ressort que :

Il est possible de valoriser le tourteau de karité sous forme de briquettes pour être utilisé comme combustible dans les foyers à beurre de karité. Toutefois les briquettes obtenues doivent être bien sèches pour avoir une bonne combustion. Nous pouvons classer par ordre décroissant, le degré de l'efficacité (séchage et consommation) des briquettes selon la forme et la taille comme suit :

- Briquettes de petite taille avec un creux cylindrique au centre ;
- Briquettes de grandes tailles avec un creux cylindrique au centre ;
- Briquette de petite taille pleine ;
- Briquettes de grande taille pleines.

Sans utilisation de liant, les briquettes sont fragiles mais se consomment très bien. Pour une utilisation sur le site de production n'occasionnant pas un déplacement des briquettes vers un autre site, elles peuvent être fabriquées sans utilisation de liant mais avec une presse de pression plus élevée. La presse que nous avons utilisée pour cette étude expérimentale ne convient pas pour une production à grande échelle. Elle développe seulement une pression de 1,96 à 6,37 Bar en moyenne et son rendement se situe autour de 50 kg/h à deux opérateurs.

Dans le cas d'une production centralisée suivie d'une distribution sur les différents sites de production, il faut envisager l'utilisation de liant qui permet d'augmenter la solidité de la briquette. Notre étude a permis de montrer que l'amidon (gommy blanc) à une proportion comprise entre 1 et 2% offre une bonne solidité sans influencer considérablement la qualité de la combustion. Le kilogramme de gommy blanc coût 600 FCFA. Ainsi, en considérant la proportion de 2% de mélange (eau + liant) dans la briquette petite taille creuse, cela revient à 3FCFA/briquette. En considérant ce coût, il faut environ 16,66 kg de gommy blanc pour produire 1 tonne de tourteau de karité soit environ 10 000 FCFA. Ce qui n'est pas négligeable pour de très grandes quantités de briquettes à produire. Le liant est donc un facteur limitant, le mieux c'est de disposer d'une presse sur chaque grand centre de production.

Ce nouveau combustible permettra aux unités de production de beurre de karité de réduire voire de supprimer l'utilisation de bois dans le processus de transformation ce qui va contribuer à diminuer la déforestation grandissante dans les zones considérées.

En plus de la réduction de la déforestation, le recyclage du tourteau solide de beurre de karité contribue à assainir le cadre de travail des femmes et en même temps d'éviter la pollution occasionnée par le stockage de ce résidu.

La réalisation du test d'ébullition de l'eau a permis de déterminer entre le foyer multi-marmites de type SOS-Sahel et le foyer à marmite unique de type GIZ celui qui est le plus efficace avec l'utilisation des briquettes de tourteau de karité comme combustible. En effet avec l'utilisation de la nouvelle grille dans le foyer GIZ, on obtient des rendements meilleurs et le temps d'ébullition et la consommation spécifique de briquettes faibles par rapport au foyer de type SOS-Sahel. En rappel, le rendement thermique moyen du foyer SOS-Sahel est de 27% contre 38,7 % pour le foyer GIZ réadapté. En termes de durée de combustion, nos résultats ont révélé en moyenne 61,5 min et 49 min respectivement pour le foyer multi-marmites et le foyer à marmite unique réadapté. Le foyer à marmite unique réadapté permet une cuisson rapide avec une consommation faible de briquettes (47g/l en moyenne) soit une économie de 51% sur le foyer SOS-sahel qui consomme 96g de briquettes par litre d'eau. Le foyer de type GIZ coûte 150 000FCFA alors que celui de type SOS-Sahel est de 1 300 000 FCFA. Les groupements de femmes productrices de beurre de karité peuvent s'acquérir facilement du foyer GIZ qui est de moindre coût en plus d'être efficace.

Nos recommandations après cette étude s'articulent autour des points suivants :

- Approfondir l'étude en vue de caractériser au mieux la combustion du tourteau de karité (flammas, fumées)
- Adopter un autre type de presse avec une pression plus importante pour avoir des briquettes solides sans utilisation de liant. Vu la taille et l'importance des revenus des unions des femmes productrices de beurre, elles peuvent se doter d'une presse motorisée de type BRADES (Bureau de Recherche/Action pour le Développement Solidaire). C'est une presse à vis mise en place par une entreprise familiale du Sénégal pour compacter les débris végétaux et le charbon. Les plaques solaires ou les groupes électrogènes déjà disponibles dans les centres de production pourraient fournir l'énergie pour le fonctionnement de cette presse.
- Mener une étude de disponibilité du tourteau de karité à l'échelle nationale en vue de mieux valoriser ce combustible.
- Mener une étude sur la valorisation de la partie liquide (tourteau liquide), qui constitue un déchet important non négligeable dans la production du beurre.

La méthanisation peut être envisagée par l'utilisation d'un biodigesteur pour produire du gaz combustible.

- Promouvoir l'utilisation des foyers GIZ par les femmes productrices de beurre de karité en vue d'optimiser l'utilisation de l'énergie pour la cuisson et le chauffage. Toutefois il faudrait réadapter la grille par le resserrement des barreaux et par la fermeture du pourtour comme celle que nous avons conçue.
- Résoudre le problème de dégagement de fumées autour de la marmite lors de la combustion des briquettes de tourteau de karité en élargissant le diamètre des cheminées.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

**Béatrix W., Dorsi G. 1995.** Foyers en images: une documentation sur les foyers améliorés et traditionnels en Afrique, Asie et Amérique latine. CCE 1995. Commission des Communautés européennes. Edition française, Franckfurt am 1995, ISBN 3-86099-135-3. 65p.

**Bellamy J.J., Ducos C., Joly M. et Joly P. B., 1984.** Guide technique de la densification. Association BOIS DE FEU. 107p.

**Belkadi M. A. 2009.** Etude technique pour la valorisation énergétique des micro-algues. Thèse de Doctorat en Energie et Développement Durable. Facultés des sciences de l'Ingénieur. Université M'Hamed Bougara de Boumerdes. Agérie. 79p.

**Bere S. F. 2008.** Analyse spatio-temporelle de la disponibilité en biomasse (déchets végétaux, résidus agricoles, etc.) au Burkina Faso. Mémoire de fin de cycle d'ingénieur du développement rural. Institut du Développement Rural (IDR à. Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso (UPB). 84p.

**Cdi et Cra. 1993.** Briquettes à base de déchets végétaux. Centre pour le Développement Industriel. ACP-CCE. CRA Gembloux. Les guides du CD! Série technologies N°L 61p.

**Conagese. 2001.** Etat de l'environnement au Burkina Faso. Rapport final du secrétariat permanent- CONAGESE, septembre 2001. 132p.

**Douville G., Filion S., Boudsreault A., Bouchard M., Brulotte F., Fortin F., Rouleau F. 2008.** Profil des produits forestiers première transformation : granules et bûche de bois densifiés. Ministère des ressources naturelles et de la faune (MRNF) (gouvernement du Québec) – centre de recherche industriel du Québec (CRIQ). 71p. Disponible sur [www.mrnf.gouv.qc.ca/publications/forets/entreprises/granules-buches.pdf](http://www.mrnf.gouv.qc.ca/publications/forets/entreprises/granules-buches.pdf). Consulté le 07/08/2015.

**EIA, E.I.A. (2008),** « International Energy outlook 2008 » in secondary« International Energy outlook 2008 ». Official Energy statistics from U.S. Government: Washington DC (USA) .260 p.

**FAO. 2014.** Résidus agricoles et sous-produits agro-industriels en Afrique de l'Ouest : état des lieux et perspectives pour l'élevage. 49p

**Global alliance for clean cookstoves. 2014.** Le test d'ébullition de l'eau, version 4.2.3. Émission et efficacité des foyers dans les conditions contrôlées de laboratoire. 26 p. Disponible sur: <http://www.cleancookstoves.org/our-work/standards-and-testing/learn-about-testing-protocols/> : consulté le 12/06/2015.

**Groupement d'Ingénieurs Conseil du Sahel.1998.** Etude de faisabilité d'une valorisation des résidus agricoles et agro-industriels comme combustibles domestiques au Sénégal. Rapport de synthèse du Projet Sénégal-Allemand « Combustibles Domestiques ». 28p.

**Grover P. D. et Mishra. S. K. 1996.** Biomass Briquetting: Technology and Practices. Regional Wood Energy Development Programme in Asia GCP/RAS/154/NET. Field Document No.46. FAO, Bangkok April 1996. 48p

**IRSAT/ GTZ. 2008.** Tests de performances des foyers « Roumdes ». Rapport provisoire. 21 p.

**INSD 1996.** Recensement générale des populations et de l'habitation. Fichier des villages du Burkina Faso.

**ISND. 2005.** Enquête annuelle sur les conditions de vie des ménages au Burkina Faso.

**INSD 2006.** Recensement générale des populations et de l'habitation. Fichier des villages du Burkina Faso.

**Jorez J.P. 1991.** Guide technique de l'économie de bois de feu : l'expérience du sahel. Lund Centre for Habitat Studies (LCHS). 176 p

**Koala L. 2012 :** fabrication manuelle de briquettes à balles de riz et évaluation des performances du foyer amélioré à balles de riz. Mémoire de fin cycle d'ingénieur du développement rural. Institut du Développement Rural (IDR). Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso (UPB). 130p

**Koutaba J. 2009.** Communication du Burkina Faso: la coopération pour une meilleure irrigation de nouvelles plantations à travers l'énergie solaire. 19p. disponible sur le site [www.sesec.org/pd/8/SESEC8\\_koutaba.pdf](http://www.sesec.org/pd/8/SESEC8_koutaba.pdf). Consulté le 27/08/2015.

**Lambaré P. 2015.** Potentiel des sous-produits agro-industriels en Afrique de l'Ouest : cas du Sénégal, du mali et du Niger. Rapport de stage de première partie de CEI (certificat d'expérience internationale). 62p.

**Lequeux P., Carré J., Hébert J., Lacrosse L., Schenkel Y. 1990.** Energie et biomasse : La densification. Gembloux : Les presses agronomiques de Gembloux, ASBL. 188p Disponible dans: <http://www.gembloux.ulg.ac.be/gestion-des-ressources-forestieres-et-des-milieus-naturels/energie-et-biomasse-la-densification/#sthash.1NkXMGDO.dpuf>

**Louvel R. 1986.** Evaluation de l'acceptabilité des briquettes au Niger. Projet pilote pour l'usage des briquettes au Niger de l'Association Bois de Feu au compte du Conseil de l'Entente. In Boiling Point N° 12 - Avril 1987 (ITDG, 1987). 36p.

**MCM-PF. 2010.** Etude prospective du secteur de l'énergie au Burkina Faso. Rapport général, 77p.

**Nations Unies. 2000.** Information soumise par le Gouvernement de Burkina Faso auprès de la Huitième Session de la Commission du développement durable des Nations Unies. Disponible sur <http://www.un.org/csa/agenda21/natinfo:countr/burkfaso/index.htm>. Consulté le 27/09/2015.

**Ouabo K. J., Lapouche J. 2008.** Consommation d'énergie des pays de la CEDEAO et du CEMAC. Rapport d'étude. Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME). 88p.

**PCD, Koundougou, 2013.** Plan communal de développement de la commune rurale de Koundougou horizon 2014-2018. Rapport final, 59p.

**PREDAS. 2007.** Rapport final provisoire: Actualisation des données nationales sur les énergies domestiques au Burkina Faso. Fiche modélisation. 48p

**PREDAS. 2004.** Etudes de consommation de combustibles domestiques au Burkina Faso. Rapport final. 55p

**Rongead. 2013.** Développement de technologies simples de densification du charbon de coques d'anacardes sous forme de briquettes combustibles.

**Sana L. 2011.** Caractérisation et optimisation d'un foyer à cuisson de « Dolo » équipé d'un brûleur à huile végétal. Mémoire de Master spécialisé en électrique, énergétique et énergie renouvelable. Institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement. 68p

**Sanogo O. 2005.** Procédés et technologies matures pour la production d'énergie à partir de la biomasse. Atelier de formation BEPITA- Koamboinsé - 1er Décembre 2005. 30p.

**UEMOA. 2006.** Etude sur le développement «Éthanol / Guel» comme énergie de cuisson dans l'espace UEMOA. Rapport provisoire du projet n0004 / 2005 / CR / COM / UEMOA. 158p.

## ANNEXES

Annexe 1 : Photos de quelques briquettes

1) Sans liant



Briquettes pleines tourteau de baratte



Briquettes creuses tourteau de baratte



Briquettes pleine tourteau de baratte



Briquettes pleine tourteau de presse

2) Avec liant



Briquettes tourteau baratte gommy blanc (1,95%)



Briquettes tourteau baratte gommy rouge (1,95%)



Briquettes tourteau de presse gommy blanc (1,95%)



Briquettes tourteau presse gommy blanc (1,95%)

Annexe 2 : Aperçu des deux types de grilles du foyer à marmite unique (GIZ)

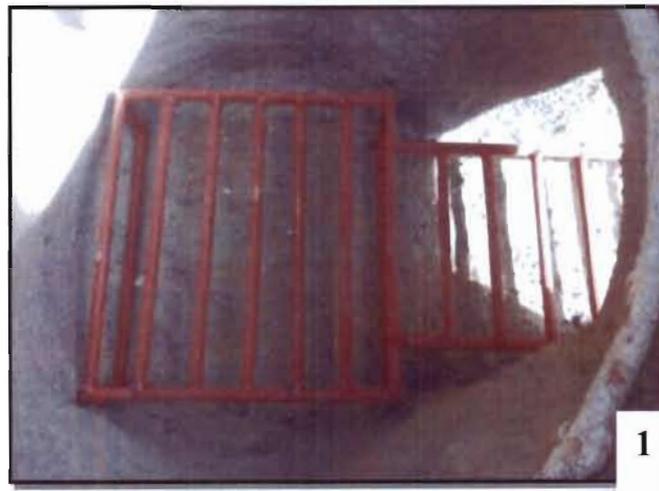


Photo 1 : (1) ancienne grille adaptée au bois ; (2-3) Différentes vues de la nouvelle grille adaptée aux briquettes

Annexe 3 : Schéma technique de la nouvelle grille adaptée aux briquettes de tourteau de karité (foyer GIZ)

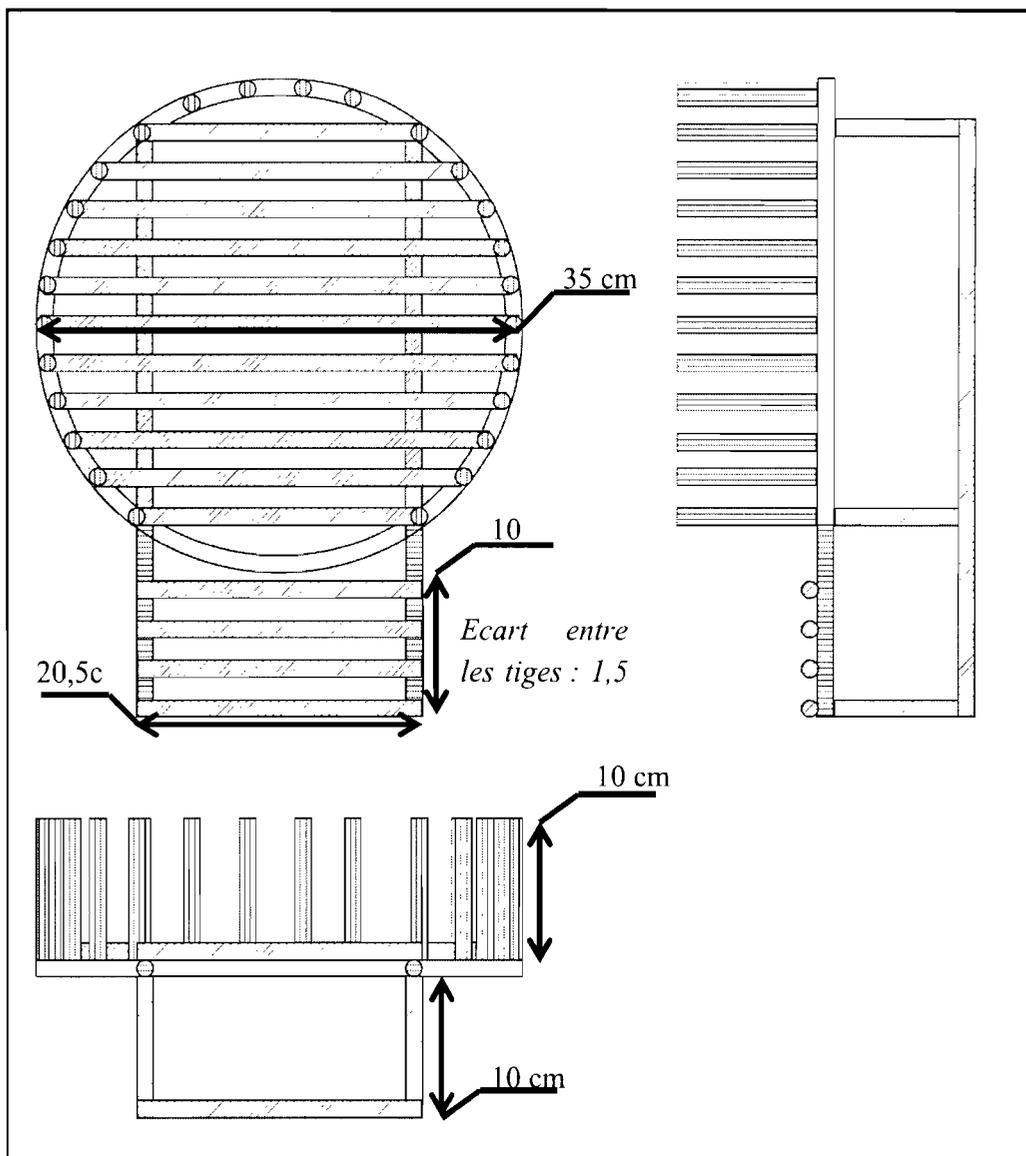


Figure 1 : Dessin technique de la grille

#### Annexe 4: Description des trois phases du test d'ébullition de l'eau (TEE)

##### Phase 1 : Haute puissance (Démarrage à froid)

1. Préparer le chronomètre (ne pas démarrez pour l'instant)
2. Peser le lot de briquelette plus le matériau d'allumage
3. Placer la marmite sur le foyer. A l'aide des supports en bois, placez un thermomètre dans chaque marmite de sorte que la température de l'eau soit mesurée en son centre, à 5 cm du fond. S'il y'a des marmite supplémentaires, si possible utilisez des thermomètres supplémentaires.

NB : il ne devrait pas y avoir de couvercle sur la marmite pendant la réalisation du TEE.

4. Allumez le feu d'une manière reproductible et selon les pratiques locales
5. Une fois que le feu est allumé, démarrez le chronomètre et noter l'heur de départ. Amenez la première marmite rapidement à ébullition sans trop gaspiller de combustible en utilisant le lot de briquelette pré-pesé. Maîtriser le feu avec les moyens couramment utilisés localement.
6. Lorsque l'affichage du thermomètre digital que l'eau de la première marmite a atteint la température locale du point d'ébullition, réaliser rapidement les étapes 6.a à 6.f
  - a. Enregistrez l'heure à laquelle l'eau dans la marmite principale (Marmite n°1) atteint la température d'ébullition locale pour la première fois. Notez aussi cette température
  - b. Enlevez toute les briquelettes du foyer et éteignez les flammes. Les flammes peuvent être éteintes en soufflant sur les extrémités des briquelettes ou en les enfonçant dans un seau de cendres ou de sable. N'utilisez pas de l'eau, car cela aurait une incidence le poids des briquelettes. Récupérez l'ensemble du charbon dans le récipient de mesure du poids de charbon en tapant les extrémités carbonisées dans le récipient.

Pesez les briquelettes non brûlées retirée du foyer avec le reste du bois du lot pré-pesé

Extrayez tout le charbon restant du foyer. Pesez ce charbon restant avec le charbon qui a été détaché en tapant les extrémités carbonisées des briquelettes
  - c. Pour les foyers multi-marmite, mesurez la température de l'eau de chaque marmite (marmite principale doit être au point d'ébullition).
  - d. Pesez chaque marmite avec l'eau.
  - e. Jetez l'eau chaude.

## Phase 2 : Haute puissance (Démarrage à chaud)

1. Réinitialisez le chronomètre (ne pas encore démarrer).
2. Si la marmite pour le démarrage à chaud n'a pas été préparée à l'avance, remplissez la marmite avec de l'eau propre à température ambiante au 2/3 du volume totale.  
Pesez la marmite (avec l'eau) et mesurez la température initiale de l'eau. Pour les foyers multi-marmite, remplissez les marmites supplémentaires, pesez-les et notez leur poids.
3. Notez le poids du deuxième lot de combustible (briquettes) avec l'allume feu.
4. Placez la marmite sur le foyer et replacez le thermomètre dans la marmite. Mesurez la température initiale dans chaque marmite. Confirmez qu'elle n'est pas sensiblement différente de la température ambiante.
5. Démarrez le feu avec le combustible du second lot pré-pesé prévu pour cette phase du test. Suivez la procédure d'allumage utilisée dans la phase 1.
6. Une fois que le feu est allumé, démarrez le chronomètre. Notez l'heure de début.  
Amenez la première marmite rapidement à ébullition sans trop gaspiller de combustible en utilisant le second lot de bois pré-pesé. Maîtriser le feu en utilisant la procédure utilisée dans la phase 1.
7. Lorsque l'affichage du thermomètre digital indique que l'eau de la première marmite a atteint la température local du point d'ébullition, réaliser rapidement les étapes 7.a à 7.d.
  - a. Enregistrez l'heure à laquelle l'eau de la marmite principale (marmite n°1) atteint la température d'ébullition locale pour la première fois. Notez aussi cette température.
  - b. Enlevez tout le bois du foyer et éteignez les flammes. Faites tomber l'ensemble du charbon dans la chambre à combustion en tapant les extrémités carbonisées (vous ne pèserez pas le charbon à ce stade).  
Pesez les briquettes non brûlé retiré du foyer avec le reste des briquettes à tourteau de karité du deuxième lot pré-pesé.
  - c. Pour les foyers multi-marmite, mesurez la température de l'eau de chaque marmite (la marmite principale doit être à la température du point d'ébullition).
  - d. Pesez chaque marmite avec l'eau.
8. Remettez les briquettes non brûlées dans le foyer. Procédez immédiatement à la phase du test à faible puissance.

### Phase 3 : Basse puissance (Mijotage)

Cette partie du test est conçu pour évaluer la capacité du foyer de passer à une phase de basse puissance après une phase de haute puissance pour faire mijoter de l'eau pendant 45 minutes tout en utilisant une quantité minimale de combustible (briquette à tourteau de karité). Pour les foyers multi-marmites, seule la première marmite sera prise en compte pour la mesure des performances de mijotage.

1. Réinitialiser le chronomètre (ne pas le démarrer pour l'instant)
2. Noter le poids de la marmite avec l'eau.
3. Notez le poids des briquettes rentrante de la phase de haute puissance avec le démarrage à chaud ajouter au troisième lot de combustible avec l'allume feu.
4. Rallumez le bois chaud qui a été remis en place. Suivez la procédure d'allumage utilisée dans la phase 1.
5. Une fois que le feu est allumé, démarrer le chronomètre. Notez l'heure de départ.
6. Placez la marmite sur le foyer et replacez le thermomètre dans la marmite.
7. Pendant 45 minutes, gardez le feu à une intensité qui maintient la température de l'eau la plus proche possible à 3°C sous le point d'ébullition. Le test est invalidé si la température de l'eau dans la marmite descend de plus de 60°C sous le point d'ébullition local.
8. Après 45 minutes, réalisez rapidement les étapes 8.a à 8.c.
  - a. Notez le temps. Notez la température finale de l'eau, elle devrait être d'environ 3°C inférieure au point d'ébullition établi.
  - b. Enlevez toute les briquettes les briquettes du foyer et éteignez les flammes.  
Pesez les briquettes non brûlées retirées du foyer avec le reste du deuxième lot pré-pesé. Extrayez tout le charbon restant du foyer.  
Peser ce charbon restant avec le charbon qui a été détaché des briquettes carbonisées.
  - c. Pesez la marmite avec l'eau restante.

#### Annexe 5: Formules de calcule des variables mesurées.

- ✓ **Quantité de briquette de tourteau de karité consommée**

$$f_{cm} = f_{ci} - f_{cf}$$

Avec :

$f_{cm}$  : Poids des briquettes de tourteau de karité consommé

$f_{ci}$  : Poids initial des briquettes à tourteau de karité

$f_{cf}$  : Poids final des briquettes à tourteau de karité

✓ **Equivalent de briquette à tourteau de karité consommée**

$$f_c = \frac{f_{cm}(PC(1 - MC) - MC(4,186(T_b - T_\alpha) + 2,257)) - \Delta c_c \times PC_c}{PC}$$

Avec :

$MC$  : Teneur en eau des briquettes

$T_b$  : Température ébullition local

$T_\alpha$  : Température ambiante

$PC_c$  : Pouvoir calorifique du charbon

✓ **Quantité d'eau évaporée**

$$W_{cv} = P_{ci} - P_{cf}$$

$W_{cv}$  : Quantité d'eau vaporisée

$P_{ci}$  : Poids initial de la marmite d'eau

$P_{cf}$  : Poids final de la marmite d'eau

✓ **Quantité d'eau restant à la fin du test**

$$W_{cr} = P_{cf} - P$$

Avec :

$W_{cr}$  : Poids de l'eau restant

$P_{cf}$  : Poids final de la marmite d'eau

$P$  : Poids de la marmite vide

✓ **Durée du test**

$$\Delta t_c = t_{cf} - t_{ci}$$

✓ **Durée du test à température corrigée**

$$\Delta t_c^T = \frac{75}{T_{cf} - T_{ci}}$$

✓ **Efficacité thermique (rendement thermique)**

$$h_c = \frac{4,186(t_{cf} - t_{ci})(P_{ci} - P) + 2260 \times W_{cv}}{F_{cd} - PC}$$

Avec :

$t_{cf}$ : Température finale de l'eau

$t_{ci}$ : Température initiale de l'eau

$F_{cd}$ : Equivalent de brique de tourteau de karité consommé

$PC$  : Pouvoir calorifique inférieur des briques de tourteau de karité

**NB** : le pouvoir calorifique inférieur des briques à tourteau de karité est de 22 420 KJ/kg. Cette valeur a été mesurée par le laboratoire d'énergie du CFREPATE (Centre Francophone de Recherche Partenariale sur l'Assainissement, les Déchets et l'Environnement) en France en 2014.

✓ **Vitesse de combustion**

$$r_{cb} = \frac{f_{cd}}{\Delta t}$$

✓ **La consommation spécifique des briques de tourteau de karité**

$$SC_c = \frac{f_{cm}}{W_{cr}}$$

✓ **La consommation spécifique des briques de tourteau de karité à température corrigée**

$$SC_c^T = SC_c \times \frac{75}{T_f - T_i}$$

✓ **La consommation spécifique d'énergie à température corrigée**

$$SCE_c^T = SC_c^T \times \frac{PC}{1000}$$

✓ **La puissance du feu**

$$FP_c = \frac{F_{cd} \times PC}{60 \times \Delta t}$$

## Annexe 6: Fiche de collecte de données du test d'ébullition de l'eau.

**Water Boiling Test - Test Entry Form** Version 4.2.4  
*These values are not linked to the Test sheets. This sheet is provided so you can print an easy data entry form. You will have to enter these values in each Test sheet to obtain the calculations*

Air Temperature	<input type="text"/>	Name of Testers  Date Stove Type/Model Test Number  Location  Fuel Type  Notes				
Wind Conditions	<input type="text"/>					
Fuel Dimensions	<input type="text"/>					
Moisture Content (wet basis)	<input type="text"/>					
Dry Weight Pot 1	<input type="text"/>					
Dry Weight Pot 2	<input type="text"/>					
Dry Weight Pot 3	<input type="text"/>					
Dry Weight Pot 4	<input type="text"/>					
Weight Container for Char	<input type="text"/>					
Local Boiling Point * * enter on General Information	<input type="text"/>					
Background CO2 (ppm)**	<input type="text"/>					
Background CO (ppm)**	<input type="text"/>					
Background PM (ug/m3)**	<input type="text"/>					
** For emission testing only						
	<b>Cold Start</b>		<b>Hot Start</b>		<b>Simmer</b>	
	Start	End	Start	End	Start	End
Time	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Weight of Fuel	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Water Temperature, Pot 1	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Water Temperature, Pot 2	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Water Temperature, Pot 3	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Water Temperature, Pot 4	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Weight of Pot 1 with water	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Weight of Pot 2 with water	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Weight of Pot 3 with water	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Weight of Pot 4 with water	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Fire Starting Materials	<input type="text"/>		<input type="text"/>		<input type="text"/>	
Average CO2 (ppm)		<input type="text"/>		<input type="text"/>		<input type="text"/>
Average CO (ppm)		<input type="text"/>		<input type="text"/>		<input type="text"/>
Average PM (ug/m3)		<input type="text"/>		<input type="text"/>		<input type="text"/>
Average Duct Temperature		<input type="text"/>		<input type="text"/>		<input type="text"/>

### Annexe 7 : Quelques résultats intermédiaires du test d'ébullition de l'eau (water boiling test)

Test 1 : foyer multi-marmites (SOS-sahel)

Calculations/Results	Units	COLD START		HOT START		SIMMER TEST (CALCULATIONS DIFFER FROM HIGH POWER TEST)			
		data	label	data	label	Calculations/Results	Units	data	label
Fuel consumed (moist)	g	11 600	f <sub>cm</sub>	9 900	f <sub>hm</sub>	Fuel consumed during the simmer phase (n	g	7 582	f <sub>sm</sub>
Net change in char during test	g	360	Δc <sub>c</sub>	360	Δc <sub>h</sub>	Net change in char during test phase	g	140	Δc <sub>s</sub>
Equivalent dry fuel consumed	g	9189	f <sub>cd</sub>	7772,53	f <sub>hd</sub>	Equivalent dry fuel consumed	g	6131	f <sub>sd</sub>
Water vaporized from all pots	g	10 650	w <sub>cv</sub>	7 350	w <sub>hv</sub>	Water vaporized	g	6 300	w <sub>sv</sub>
Effective mass of water boiled	g	129 147	w <sub>cr</sub>	133 528	w <sub>hr</sub>	Water remaining at end - All Pots	g	41 969	w <sub>sr</sub>
Time to boil Pot # 1	min	47	Δt <sub>c</sub>	35	Δt <sub>h</sub>	Time of simmer (should be ~45 minutes)	min	45	Δt <sub>s</sub>
Temp-corr time to boil Pot # 1	min	50	Δt <sub>c</sub> <sup>T</sup>	42	Δt <sub>h</sub> <sup>T</sup>	Thermal efficiency	%	11%	h <sub>s</sub>
Thermal efficiency	%	32%	h <sub>c</sub>	31%	h <sub>h</sub>	Burning rate	g/min	136,2	r <sub>sb</sub>
Burning rate	g/min	195,5	r <sub>cb</sub>	222,1	r <sub>hb</sub>	Specific fuel consumption	g/liter remainin	146,1	SC <sub>s</sub>
Specific fuel consumption	g/liter boiled	71	SC <sub>c</sub>	58,2093	SC <sub>h</sub>	Firepower	watts	50912	FP <sub>s</sub>
Temp-corr sp consumption	g/liter	74,94569089	SC <sub>c</sub> <sup>T</sup>	69,9631	SC <sub>h</sub> <sup>T</sup>	Turn down ratio	--	1,43	TDR
Temp-corr sp energy consumpt.	kJ/liter	1 680	SE <sub>c</sub> <sup>T</sup>	1 569	SE <sub>h</sub> <sup>T</sup>	Specific Energy Consumption	kJ/liter	3 275	SE <sub>s</sub>
Firepower	watts	73052	FP <sub>c</sub>	82981	FP <sub>h</sub>	Fuel Benchmark to Complete 5L WBT	g	1 093	BF
						Energy Benchmark to Complete 5L WBT	kJ	24 499	BE

Test1 : foyer à marmite unique ancienne grille

Calculations/Results	Units	COLD START		HOT START		SIMMER TEST (CALCULATIONS DIFFER FROM HIGH POWER TEST)			
		data	label	data	label	Calculations/Results	Units	data	label
Fuel consumed (moist)	g	4 026	f <sub>cm</sub>	4 474	f <sub>hm</sub>	Fuel consumed during the simmer phase (moist)	g	2 400	f <sub>sm</sub>
Net change in char during test	g	114	Δc <sub>c</sub>	114	Δc <sub>h</sub>	Net change in char during test phase	g	32	Δc <sub>s</sub>
Equivalent dry fuel consumed	g	3203	f <sub>cd</sub>	3576,257	f <sub>hd</sub>	Equivalent dry fuel consumed	g	1957	f <sub>sd</sub>
Water vaporized from all pots	g	3 140	w <sub>cv</sub>	4 980	w <sub>hv</sub>	Water vaporized	g	3 470	w <sub>sv</sub>
Effective mass of water boiled	g	56 860	w <sub>cr</sub>	55 020	w <sub>hr</sub>	Water remaining at end - All Pots	g	51 550	w <sub>sr</sub>
Time to boil Pot # 1	min	55	Δt <sub>c</sub>	47	Δt <sub>h</sub>	Time of simmer (should be ~45 minutes)	min	45	Δt <sub>s</sub>
Temp-corr time to boil Pot # 1	min	60	Δt <sub>c</sub> <sup>T</sup>	55	Δt <sub>h</sub> <sup>T</sup>	Thermal efficiency	%	20%	h <sub>s</sub>
Thermal efficiency	%	34%	h <sub>c</sub>	34%	h <sub>h</sub>	Burning rate	g/min	43,5	r <sub>sb</sub>
Burning rate	g/min	58,2	r <sub>cb</sub>	76,1	r <sub>hb</sub>	Specific fuel consumption	g/liter remainingç	38,0	SC <sub>s</sub>
Specific fuel consumption	g/liter boiled	56	SC <sub>c</sub>	64,99921	SC <sub>h</sub>	Firepower	watts	16249	FP <sub>s</sub>
Temp-corr sp consumption	g/liter	61,95049529	SC <sub>c</sub> <sup>T</sup>	76,17095	SC <sub>h</sub> <sup>T</sup>	Turn down ratio	--	1,34	TDR
Temp-corr sp energy consumpt.	kJ/liter	1 389	SE <sub>c</sub> <sup>T</sup>	1 708	SE <sub>h</sub> <sup>T</sup>	Specific Energy Consumption	kJ/liter	851	SE <sub>s</sub>
Firepower	watts	21762	FP <sub>c</sub>	28433	FP <sub>h</sub>	Fuel Benchmark to Complete 5L WBT	g	535	BF
						Energy Benchmark to Complete 5L WBT	kJ	11 997	BE

**Test1 foyer marmite unique nouvelle grille**

Calculations/Results	Units	COLD START		HOT START		SIMMER TEST (CALCULATIONS DIFFER FROM HIGH POWER TEST)			
		data	label	data	label	Calculations/Results	Units	data	label
Fuel consumed (moist)	g	3 500	f <sub>cm</sub>	2 900	f <sub>hm</sub>	Fuel consumed during the simmer phase (moist)	g	2 000	f <sub>sm</sub>
Net change in char during test	g	446	Δc <sub>c</sub>	446	Δc <sub>h</sub>	Net change in char during test phase	g	54	Δc <sub>s</sub>
Equivalent dry fuel consumed	g	2915	f <sub>cd</sub>	2415,483	f <sub>hd</sub>	Equivalent dry fuel consumed	g	1666	f <sub>sd</sub>
Water vaporized from all pots	g	2 430	w <sub>cv</sub>	3 240	w <sub>hv</sub>	Water vaporized	g	5 750	w <sub>sv</sub>
Effective mass of water boiled	g	57 570	w <sub>cr</sub>	56 760	w <sub>hr</sub>	Water remaining at end - All Pots	g	51 010	w <sub>sr</sub>
Time to boil Pot # 1	min	50	Δt <sub>c</sub>	44	Δt <sub>h</sub>	Time of simmer (should be ~45 minutes)	min	45	Δt <sub>s</sub>
Temp-corr time to boil Pot # 1	min	54	Δt <sub>c</sub> <sup>T</sup>	49	Δt <sub>h</sub> <sup>T</sup>	Thermal efficiency	%	37%	h <sub>s</sub>
Thermal efficiency	%	35%	h <sub>c</sub>	45%	h <sub>h</sub>	Burning rate	g/min	37,0	r <sub>sb</sub>
Burning rate	g/min	58,3	r <sub>cb</sub>	54,9	r <sub>hb</sub>	Specific fuel consumption	g/liter remaining	32,7	SC <sub>s</sub>
Specific fuel consumption	g/liter boiled	51	SC <sub>c</sub>	42,55608	SC <sub>h</sub>	Firepower	watts	13833	FP <sub>s</sub>
Temp-corr sp consumption	g/liter	54,25515913	SC <sub>c</sub> <sup>T</sup>	47,49562	SC <sub>h</sub> <sup>T</sup>	Turn down ratio	--	1,58	TDR
Temp-corr sp energy consumpt.	kJ/liter	1 216	SE <sub>c</sub> <sup>T</sup>	1 065	SE <sub>h</sub> <sup>T</sup>	Specific Energy Consumption	kJ/liter	732	SE <sub>s</sub>
Firepower	watts	21787	FP <sub>c</sub>	20513	FP <sub>h</sub>	Fuel Benchmark to Complete 5L WBT	g	418	BF
						Energy Benchmark to Complete 5L WBT	kJ	9 364	BE

**Annexe 8: Presse à vis motorisée de type BRADES.**



Presse à vis motorisée de type BRADES capable de compacter le tourteau de karité