

**BURKINA FASO**  
**UNITE-PROGRES-JUSTICE**  
**MINISTERE DES ENSEIGNEMENTS SECONDAIRE ET SUPERIEUR**

**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**

**FABRICATION MANUELLE DE BRIQUETTES DE BALLE DE RIZ  
ET EVALUATION DES PERFORMANCES DU FOYER AMELIORE A  
BALLE DE RIZ**

Présenté par : **KOALA Lamoussa**

Soutenu le 24 Juillet 2012

Devant le jury :

Président : Pr André. T. KABRE

Membres : Dr Mipro HIEN  
Dr Amadou SANON

Maître de stage : Dr. Amadou SANON

Directeur de mémoire : Pr. Aboubacar TOGUYENI

N° : .....-2012/ EAUX ET FORETS

JUILLET 2012

## **DEDICACE**

Je dédie ce document à mes très chers parents, qui m'ont appris à cultiver l'esprit de persévérance et d'excellence ; qu'ils trouvent ici ma profonde gratitude.

A mes frères et sœurs, qu'ils continuent de cultiver l'esprit de combativité dans la vie.

A tous ceux qui œuvrent inlassablement à la réussite de mes études, QU'ALLAH les comble de bonheur et de joie de vivre !!!!!

## REMERCIEMENTS

La réalisation du présent document a été possible grâce aux appuis et à la contribution de plusieurs personnes. Il nous est très agréable de leur témoigner notre reconnaissance et de leur adresser nos vifs remerciements pour leurs efforts combien inestimables à la réussite de notre étude. Nos remerciements s'adressent à tout le corps enseignant de l'IDR pour l'encadrement technique et scientifique reçu au cours de notre formation et particulièrement à :

- Pr Aboubacar TOGUYENI, Enseignant / chercheur à l'Institut du Développement Rural (IDR), notre directeur de mémoire, pour ses sacrifices et l'intérêt particulier qu'il a porté sur ma formation. Nous avons bénéficié de son soutien moral, intellectuel et financier inestimable ;
- Dr Amadou SANON, Directeur régional de l'Institut de Recherches en Sciences Appliquées et Technologies (IRSAT), notre maître de stage, pour son encadrement technique, sa disponibilité, ses conseils très utiles qui ont abouti à l'amélioration qualitative de ce document. Nous avons aussi bénéficié de sa bibliothèque personnelle ;
- M. Moussa WEREME, Ingénieur de recherche du département énergie de l'IRSAT/ BOBO pour la fraternité dont il a su faire preuve durant notre séjour à l'IRSAT ;
- Mme KERE, Responsable du département de technologies alimentaires (DTA) de l'IRSAT/BOBO ;
- M. Levy KABORE, comptable de l'IRSAT ; pour ses conseils et soutien moral qui nous ont galvanisé durant les dures moments de notre stage ;
- M. Romaric G. BAYILLI et tout le personnel de la DTA pour leur franche collaboration ;
- Mlle Kadidiatou OUATTARA, caissière à Coris Banque Internationale, pour son soutien moral et matériel inestimable ;
- M. Frédéric .S. BERE, Ingénieur du développement rural, pour sa courtoisie et ses conseils, qui nous ont été profitables pour la réalisation de ce mémoire ;

- Mlle Yvette DABIRE, secrétaire de l'IRSAT, qui nous a toujours accordé son poste pour nos recherches et encouragé durant notre stage ;
- Mlle Marie Eve BOILEAU, membre du Groupe de Collaboration Internationale en Ingénierie de l'Université de Sherbrooke (GCIUS / Canada), pour sa franche collaboration durant notre stage, nous l'en sommes reconnaissant ;
- M. Michel OUEDRAOGO et toute sa famille pour l'hospitalité qu'ils m'ont accordée durant mon séjour à Banzon ;
- Mme la présidente des Etuveuses de riz du Burkina et toute sa famille, pour l'hospitalité qu'elle m'a accordé durant mon séjour à Bama ;
- Aux responsables et membres de l'Union des Groupements des Etuveuse de Riz de Bama, pour leur franche collaboration et l'hospitalité qu'ils m'ont accordée ;
- M. Saïbou OUEDRAOGO, technicien supérieur d'agriculture en service à Banzon, pour sa fraternité, il nous a accordé sa bibliothèque personnelle ;
- M. Achille ATHIOU, responsable forestier de Banzon, pour son apport documentaire et ses conseils ;
- Mes oncles, amis et frères Jérôme ZONGO, Souleymane ZONGO, Glwadys W.R. SANDUIDI, Amidou KOALA et Alidou KOALA, pour l'intérêt qu'ils ont porté à mes études, nous leurs sommes très reconnaissant ;
- Tout le personnel de la Direction Régionale de IRSAT/Bobo ; pour leur hospitalité remarquable ;
- Tous mes camarades, amis et frères de l'Institut du Développement Rural, pour leur soutien combien inestimable ;
- Tous ceux dont leurs noms ne figurent pas, cela n'affecte aucunement l'estime que nous avons pour eux.

## TABLES DES MATIERES

<b>DEDICACE.....</b>	<b>ii</b>
<b>REMERCIEMENTS.....</b>	<b>iii</b>
<b>TABLES DES MATIERES.....</b>	<b>v</b>
<b>SIGLES ET ABREVIATIONS .....</b>	<b>viii</b>
<b>LISTES DES FIGURES .....</b>	<b>x</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	<b>xii</b>
<b>LISTE DES ANNEXES .....</b>	<b>xiii</b>
<b>GLOSSAIRE DE QUELQUES TERMES TECHNIQUES.....</b>	<b>xiv</b>
<b>RESUME .....</b>	<b>xvi</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xvii</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>1</b>
<b>PREMIERE PARTIE : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE .....</b>	<b>5</b>
<b>CHAPITRE I : GENERALITES.....</b>	<b>6</b>
<b>I. GENERALITES SUR LA BIOMASSE .....</b>	<b>6</b>
1.1. Les différents procédés de valorisation énergétique de la biomasse.....	7
<b>II. Situation actuelle de la filière des résidus agricoles et agro-industriels au Burkina Faso.....</b>	<b>8</b>
<b>III. Etat de la valorisation énergétique des résidus agricoles et agro-industriels au Burkina Faso .....</b>	<b>10</b>
<b>IV. Les différentes sources d'énergies domestiques utilisées au Burkina Faso</b>	<b>11</b>
<b>V. Les technologies utilisées au niveau des énergies domestiques au Burkina Faso.....</b>	<b>13</b>
<b>VI. Les contraintes au développement du secteur énergétique au Burkina Faso</b>	<b>14</b>
<b>VII. Les actions de promotion et de développement du secteur énergétique au Burkina Faso.....</b>	<b>15</b>
<b>CHAPITRE II : LA DENSIFICATION DE LA BIOMASSE.....</b>	<b>16</b>

<b>I. La matière première</b> .....	<b>16</b>
1.1. Les résidus agricoles et agro-industriels.....	17
1.2. Les résidus forestiers.....	18
<b>I. La chaîne de densification</b> .....	<b>19</b>
2.1. Préparation des résidus.....	19
2.2. Principe de la densification.....	19
2.3. Les différentes filières de la densification.....	20
2.4. Caractéristiques générales des produits densifiés.....	22
DEUXIEME PARTIE : ETUDE EXPERIMENTALE.....	25
<b>CHAPITRE I : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE</b> .....	<b>26</b>
<b>I. Site de Banzon</b> .....	<b>27</b>
1.1. Situation géographique.....	27
1.1. Données climatiques.....	27
1.2. Ressources naturelles.....	28
1.3. Milieu humain.....	29
1.4. Activités socio-économiques.....	30
<b>I. Site de la Vallée du Kou</b> .....	<b>32</b>
2.1. Site de la vallée du kou.....	32
2.2. Données climatiques.....	32
2.3. Ressources naturelles.....	33
2.4. Milieu humain.....	35
2.5. Activités socio-économiques.....	35
<b>CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES</b> .....	<b>37</b>
<b>I. Matériels</b> .....	<b>37</b>
1.1. Matériels utilisés pour l'évaluation des performances du fourneau et de son acceptabilité.....	37
1.2. Matériels utilisés pour la fabrique des briquettes.....	39
<b>II. Méthodes</b> .....	<b>40</b>
2.1. Le test d'ébullition de l'eau.....	40
2.2. Conditions préalables avant le début du test.....	41
2.3. Procédure du test d'ébullition de l'eau.....	42
2.4. Conduite du test d'ébullition de l'eau.....	42
2.5. Méthode de détermination des différentes variables.....	44

2.6.	Procédure de collecte des données.....	48
2.7.	Processus de fabrication des briquettes à base des balles de riz.....	48
2.8.	Test tenue des briquettes à l'humidité.....	51
2.9.	Tests de résistance des briquettes.....	51
2.10.	Test d'aptitude des briquettes à la combustion.....	52
2.11.	Analyses statistiques.....	52
<b>CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION.....</b>		<b>53</b>
I.	Performances du fourneau du foyer à balles de riz <b>Erreur ! Signet non défini.</b>	
1.1.	Enquête sur les performances du foyer et son acceptabilité.. <b>Erreur ! Signet non défini.</b>	
1.2.	Résultats des tests d'ébullition de l'eau.....	55
1.3.	Analyses statistiques.....	66
II.	<b>Fabrication des briquettes de balles de riz.....</b>	<b>74</b>
2.1.	Tests de liants et de mélanges.....	74
2.2.	Confection de presse manuelle.....	77
2.3.	Caractéristiques des briquettes.....	78
2.4.	Tests d'aptitudes des briquettes.....	80
2.5.	Aspects socio-économique de fabrication des briquettes de balles de riz..	85
III.	<b>Discussion.....</b>	<b>88</b>
3.1.	Adoption et utilisation de foyers améliorés à balles de riz.....	88
3.2.	Teste d'ébullition de l'eau.....	90
3.3.	Fabrication de briquette de balle de riz.....	92
<b>CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS.....</b>		<b>96</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>		<b>99</b>
<b>ANNEXES.....</b>		<b>i</b>

## SIGLES ET ABREVIATIONS

**APEES** : Association pour la Promotion et l'Exploitation de l'Energie Solaire  
**AVG** : Acides Gras Volatiles  
**CETE- APAVE** : Centre d'Etude Thermiques et Electrique de l'APAVE du Sud- Ouest  
**CDI-CRA** : Centre pour le Développement Industriel – Centre de Recherches Agronomique de Gembloux.  
**CILSS** : Comité Inter - Etats de Lutte contre la Sécheresse au Sahel  
**CIR-B** : Comité Interprofessionnel du Riz du Burkina  
**CNRST** : Centre National des Recherches Scientifique et Technologique  
**CONAGESE** : Conseil National pour la Gestion de l'Environnement  
**DDO**: Diesel Distillate Oil  
**DGE**: Direction Générale de l'Energie  
**DRAHRH / HB**: Direction Régionale de l'Agriculture, de l'hydraulique et des Ressources Halieutiques / Haut-Bassins.  
**DTA** : Département de Technologies Alimentaires.  
**EDENE** : Etudes pour le Développement de l'Environnement et de l'Energie  
**FAO**: Food and Agricultural Organisation (Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture)  
**FCFA** : Franc communal des pays Francophones d'Afrique  
**GCIUS** : Groupe de Collaboration Internationale en Ingénierie de l'Université de Sherbrooke  
**GTZ**: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (Coopération Technique Allemande)  
**IEPF** : Institut de l'Energie des Pays ayant en commun l'usage du Français  
**INERA** : Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles  
**IRSAT** : Institut de Recherches en Sciences Appliquées et Technologies  
**ISND** : Institut National des Statistiques et de la Démographie  
**ISNV** : Institut des Sciences de la Nature et de la Vie  
**LBTP**: Laboratoire de Bâtiments et des Travaux Publics  
**MDE**: Maitrise De l'Energie  
**ONG** : Organisation Non Gouvernementale  
**OTA** : Office of Technology Assessment  
**PCD / AEPACB** : Plan Communal de Développement en Approvisionnement en Eau Potable et Assainissement de la Commune de Banzon  
**PERACOD** : Promotion de l'Electrification Rurale et de l'Approvisionnement Durable en Combustibles Domestiques  
**PIB** : Produit Intérieur Brute  
**PNAF** : Programme National d'Aménagement Forestier  
**PNGT** : Programme National de Gestion des Terroirs  
**PNUD** : Programme des Nations Unies pour le Développement  
**PREDAS** : Programme Régional de Promotion des Energies Domestiques et Alternatives au Sahel  
**PVC** : Polyvinyle de Chlorure  
**RMT** : Réseau Mixte et Technologique  
**RPTES**: Regional Program on traditional Energy Supply  
**SN- CITEC**: Société Nationale Comptoir des Industries textiles et Cotonnières  
**SN-SOSUCO**: Nouvel Société Sucrière de la Comoé



**SOFITEX:** Société Burkinabé des Fibres Textiles

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

**SONABHY :** Société Nationale Burkinabé des Hydrocarbures

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

**TVA :** Taxe sur la Valeur Ajoutée

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

**UGER-B :** Union des Groupements d'Éleveuses de Riz de Bama

**UNHCR:** **United** Nation High Commissioner for Refugees (haut Commissariat des Nations Unies pour les Réfugiés)

**WTB:** Water Test Boiling

**ZATE:** Zone d'Appui Technique de l'Élevage.

## LISTES DES FIGURES

Figure 1 : Presse à piston et Presse à vis cylindrique (Source: Dr. Ing. Heino Vest, 2003: Small Scale Briquetting and Carbonization of Organic Residues for Fuel). .....	21
Figure 2: Situation géographique de la zone d'étude. ....	26
Figure 3 : Variation de la pluviométrie de Banzon de 2007 à 2011 .....	28
Figure 4: Variation de la pluviométrie de Bama de 2002 à 2011. ....	33
Figure 5: Courbes d'évolution de la température de l'eau en fonction du temps, pour le prototype1 sans isolant (phase1). ....	57
Figure 6: Courbes d'évolution de la température en fonction du temps pour le prototype1 munie d'isolant thermique (phase 1). ....	58
Figure 7 : Courbes d'évolution de la température en fonction du temps pour le prototype2 sans isolant thermique (phase1). ....	59
Figure 8: Courbes d'évolution de la température en fonction du temps pour le prototype2 munie d'isolant thermique (plaquette d'argile) (phase1). ....	60
Tableau16 : Grandeurs caractérisant le prototype1 sans isolant thermique (phase2). ....	60
Figure 9 : Courbes traduisant l'évolution de la température en fonction du temps de l'eau pour le prototype1 sans isolant thermique (phase 2). ....	61
Figure 10: Courbes d'évolution de la température de l'eau en fonction du temps pour le prototype1 avec l'isolant thermique (phase2). ....	62
Figure 11 : Courbes traduisant l'évolution de la température de l'eau en fonction du temps pour le prototype2 sans isolant thermique (phase 2). ....	63
Figure 12: Courbes d'évolution de la température en fonction du temps pour le prototype2 avec l'isolant thermique. ....	64
Figure 13 a et b: Comparaison du temps nécessaire pour porter l'eau à ébullition des deux prototypes de foyer à balles de riz. ....	67
Figure 14 a et b: Comparaison du taux brulant des deux prototypes de foyer à balles de riz .....	68
Figure 15 a et b : Comparaison de la consommation spécifique des deux prototypes de foyers à balles de riz. ....	69
Figure 16 a et b : Comparaison de la consommation spécifique corrigée par la température des deux prototypes de foyer à balle de riz. ....	70

Figure 17 a et b: Comparaison de la puissance du feu des deux prototypes de foyer à balle de riz.....	71
Figure 18 a et b: Comparaison du rendement thermique des deux prototypes de foyer à balle de riz..	72
Figure 19 a et b: Comparaison du temps d'ébullition spécifique des deux prototypes du foyer à balles de riz. ....	73
Figure 20: Évolution du prix de 1kg de briquettes en fonction des recettes .....	87

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Résidus agricoles et agro-industriels produits au Burkina Faso entre 2001 et 2006. ....	9
Tableau 2: Exemples de valorisation énergétique des résidus au Burkina .....	11
Tableau 3: Estimation de la quantité de résidus agricoles secs à partir des quantités de récoltes. ....	12
Tableau 4 : Répartition de la biomasse produite par type de production.....	18
Tableau 5 : Production potentielle mondiale de bois, de fibres de récupération ou non ligneuses et autres sources de combustibles provenant des forêts, prévues en 2010.....	19
Tableau 6: Valeurs caractéristiques de quelques produits densifiés.....	22
Tableau 7 : Dimensions de quelques produits densifiés .....	23
Tableau 8 : Densité des produits densifiés.....	23
Tableau 7 : Perspectives d'évolution de la population de la commune de Banzon en 2015 .....	30
Tableau 9 : Effectifs du cheptel des communes de Banzon et Bama.....	31
Tableau 10 : Composition des différentes recettes testées.....	49
Tableau 11. Résumé des essais de combustion réalisés sur les briquettes .....	52
Tableau 13: Paramètres caractérisant le foyer petit format en l'absence d'isolant thermique.....	56
Tableau 14: Paramètres caractérisant le foyer petit format avec isolant thermique (plaquette d'argile) pour la première phase. ....	57
Tableau 15: Paramètres caractérisant le prototype2 sans isolant thermique (phase1).....	58
Tableau 16: Paramètres caractérisant le prototype2 avec isolant thermique.....	59
Tableau 18: Grandeurs caractérisant le prototype1 avec l'isolant thermique (phase2).....	61
Tableau 19 : Grandeurs caractérisant le prototype2 en l'absence d'isolant thermique (phase2) .....	62
Tableau 20 : grandeurs caractérisant le prototype2 avec isolant thermique (phase2) .....	63
Tableau 21 : paramètres caractérisant le prototype1 sans isolant thermique (phase3) .....	64
Tableau 22 : Paramètres caractérisant le prototype1 menué d'isolant thermique (phase 3).....	65
Tableau 23: Paramètres caractérisant le prototype2 sans isolant thermique (phase3).....	65
Tableau 24 : Paramètres caractérisant le prototype2 avec isolant thermique (phase3).....	66
Tableau 25: Observations directes faites sur les recettes .....	74
Tableau 26: Condensé des résultats des tests d'immersion des briquettes.....	80
Tableau 27 : Résultats du test de résistance aux chocs avec la deuxième méthode.....	82
Tableau 28 : Résultats des tests de combustion des briquettes.....	83
Tableau 29 : Coût d'installation de l'unité de briquetage .....	86

## LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Photos du matériel utilisé pour le testes d'ébullition de l'eau .....	i
Annexe 2 : Produits issus du décorticage du riz paddy et atelier de confection du foyer a balles de riz. ...	ii
Annexe 3 : Résultats des mesures directes des tests d'ébullition de l'eau.....	ii
Annexe 4 : Modifications apportées sur le foyer et faiblesses de fonctionnement.....	vii
Annexe 5 : Résumé du déroulement de confection des briquettes à balles de riz .....	ix

## GLOSSAIRE DE QUELQUES TERMES TECHNIQUES

Comme toute science ou technique, l'énergie a sa terminologie propre à elle. Les mots et expressions communs à cette discipline scientifique ont des sens bien définis. Il apparaît utile de rappeler les termes se rapportant aux notions principales.

**Biomasse** : c'est la fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture, y compris les substances végétales et animales issues de la terre et de la mer, de la sylviculture et des industries connexes, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et ménagers (RMT/ BIOMASSE, 2008).

Au sens large, la biomasse désigne toute forme de matière organique directement produite à partir du processus biologique ; les combustibles fossiles, et leurs dérivés tels que les plastiques étant d'origine très éloignée dans le temps, ne sont pas pris en compte (BERE, 2008).

En ce qui concerne le domaine de l'énergie, le terme biomasse désigne une source d'énergie renouvelable accumulée dans les molécules des organismes vivants et pouvant servir à des fins énergétiques.

**Biocombustible** : matière organique combustible et / ou fermentable, par exemple, bois, charbon de bois, tiges de céréales, balles de riz et déchets d'animaux.

**Brique** : selon l'encyclopédie libre *wikipédia*, c'est un conditionnement d'un matériau de combustion comme élément manipulable, commercialisé avec d'autres de même poids et forme, obtenue par moulage sous pression d'une ressource naturelle préalablement broyée. Si sa forme est très petite (2 cm de diamètre), on parle en français de pellet.

**Calorie** : Unité de mesure métrique d'énergie, à savoir : chaleur requise pour élever la température d'un gramme d'eau de 1 °C sous une pression constante d'une atmosphère.

**Combustible/énergie commerciale (e)** : terme souvent utilisé dans le contexte des pays en voie de développement pour désigner l'ensemble des combustibles non traditionnels ou ne provenant pas de la biomasse (pétrole, gaz naturel et électricité). La notion d'énergie commerciale «marchande» désigne toutes les sources d'énergie faisant l'objet de paiements monétaires.

**Combustible/énergie conventionnel (le) :** autres termes désignant l'énergie commerciale.

**Combustible/énergie traditionnel (le) :** dans le contexte des pays en développement, il s'agit du bois de feu, du charbon de bois, des déchets d'animaux ou d'autres biocombustibles.

**Consommation spécifique :** désigne une quantité d'énergie rapportée à une valeur non énergétique. Elle est souvent appelée intensité énergétique.

**Energie domestique :** autre terminologie utilisée pour désigner l'énergie traditionnelle.

**Energie utile :** parfois appelée énergie fournie au stade de l'utilisation finale, est l'énergie effectivement utilisée pour une tâche précise, telle la cuisson des aliments ou l'éclairage. Du fait des pertes énergétiques liées au dispositif de conversion, l'énergie utile est inférieure à l'énergie disponible.

**Pouvoir calorifique inférieur (PCI) :** est une mesure concrète de la chaleur obtenue par combustion complète d'un combustible dans les conditions habituelles de pression constante. La différence par rapport au pouvoir calorifique supérieur provient essentiellement de l'énergie chimique et de la chaleur latente liée à la vaporisation des gaz libérés et de la vapeur d'eau, etc.

**Pouvoir calorifique supérieur (PCS) :** désigne la valeur énergétique totale d'un combustible. Il est égal à la chaleur libérée par combustion complète à volume constant. Il est égal à « l'enthalpie » thermodynamique du combustible et dépend uniquement de la composition chimique et du poids du combustible, y compris l'eau qu'il contient.

**Rendement de combustion :** chaleur utile produite par un système de combustion divisé par la valeur calorifique du combustible utilisé.

**Taux d'humidité matière humide (THMH) :** rapport du poids d'eau contenue dans un combustible au poids total (eau + combustible solide), exprimé en pourcentage.

**Taux d'humidité matière sèche (THMS) :** rapport du poids d'eau d'un combustible à son poids anhydre (combustible solide), exprimé en pourcentage.

## RESUME

Dans le contexte de lutte contre la déforestation, la réduction de la dépendance énergétique et des émissions de gaz à effet de serre la présente étude se veut de stimuler le développement des énergies domestiques par la valorisation énergétique des balles de riz dans les plaines rizicoles du Burkina Faso. Elle se veut aussi de disposer des informations sur les performances du foyer amélioré à balles de riz et sur la densification des balles de riz à basse pression. L'objectif global de notre étude était de mettre à la disposition des populations rurales, une technologie de valorisation énergétique des balles de riz (résidus du riz paddy après décorticage). Spécifiquement, il s'agit de fabriquer à basse pression des briquettes de balles de riz (briquettes de biomasse ou biocombustible solide) en utilisant divers liants et une presse manuelle à levier ; et d'évaluer les performances du foyer amélioré métallique à balles de riz à travers le Water Boiling Test ou le test d'ébullition de l'eau. L'étude est menée à travers des expériences sur deux sites à l'Ouest du Burkina Faso, à savoir Banzon et à la Vallée du Kou. L'étude a montré qu'il était possible de confectionner des briquettes de balles de riz à basse pression dans le contexte villageois, en se servant d'une presse manuelle à levier et de la farine de manioc comme liant. Cela nécessite un faible niveau de technicité et d'investissement. Elle révèle aussi que les briquettes ont une bonne tenue et donnent une bonne combustion, mais la disponibilité du liant et le prix de vente élevé des briquettes demeurent les inconvénients majeurs de l'activité. En ce qui concerne le foyer amélioré, l'étude a révélé qu'il est entièrement accepté et utilisé par la population rurale de Bama. Les tests d'ébullition de l'eau ont montré que son rendement thermique était inférieur à 20 % ; avec des consommations spécifiques corrigées par la température variant de 197 g / L et 183,5 g / L respectivement pour le prototype 2 et le prototype1. Les temps d'ébullition spécifique varient entre 2,39 mn / L (prototype2) et 4 mn / L (prototype1). Les taux brûlant sont de l'ordre de 2,39 mn / L pour le prototype2 et de 4 mn / L pour le prototype1. L'étude atteste qu'il y a une déperdition importante de chaleur et de combustible lors de l'utilisation du foyer ; donc une perte énorme d'énergie. Des défaillances techniques résident donc dans sa conception et sont des défis majeurs à relever.

**Mots clés** : Briquettes, balles de riz, énergie, biomasse, foyer amélioré, Water Boiling Test.



## ABSTRACT

In the context of struggle against the deforestation, the reduction of the energizing dependence and the emissions of gas to greenhouse effect the present survey wants to be to stimulate the development of the domestic energies by the energizing valorization of rice husk in the paddy fields of Burkina. It also wants to be to have some information on the performances of the home improved stove and on the densification of rice husk to low pressure. The global objective of our survey was to put at the disposal of the farming populations, a technology of energizing valorization of rice husk (residues of the rice paddy after shelling). Specifically, it is about manufacturing to low pressure of the briquettes of rice husk (briquettes of biomass or strong bio-fuel) while using various binders and a manual press to lever; and to value the performances of the rice husk metallic improved stove through the Water Boiling Test. The survey is led through experiences on two sites to the west of Burkina, to know Banzon and Bama. The survey showed that it was possible to make briquettes of rice husk to low pressure in the context villager, while using a manual press to lever and the flour of cassava as binder. It requires a weak level of technicality and investment. It also reveals that the briquettes have a good holding and give a good combustion, but the availability of the binder and the selling price raised of the briquettes stay the major inconveniences of the activity. With regard to the improved stove, the survey revealed that it is accepted entirely and used by the farming population of Bama. The tests of water boiling point showed that its thermal output was lower to 20%; with specific consumptions corrected by the temperature varying 197 g / L and 183, 5 g / L respectively for the prototype 2 and the prototype1. The times of specific boiling point vary between 2, 39 min. / L (prototype2) and 4 min. / L (prototype1). The rates burning are the order of 2,39 min. / L for the prototype2 and 4 min. / L for the prototype1. The survey attests that there is a dwindle important of heat and fuel at the time of the use of the home; therefore an enormous loss of energy. Some technical failings reside therefore in its conception and are major challenges to rise.

**Key words:** Briquettes, rice husk, energy, biomass, improved stove, Water Boiling Test.

## INTRODUCTION GENERALE

Les chocs pétroliers des années 1970 avaient stimulé l'engouement du monde pour les Energies Renouvelables (Solaire et éolienne, notamment) ; c'est ainsi qu'au lendemain de ces crises énergétiques des efforts considérables ont été réalisés dans les pays du Nord pour la valorisation des biomasses végétales. Celles-ci devaient, à défaut de les remplacer, venir en appoint aux sources d'énergie conventionnelles (charbon, pétrole, houille blanche, gaz, fuel). Des technologies nouvelles (biocarburants, biocombustibles, cultures énergétiques, etc.) ont alors été développées dans ce sens.

Malheureusement, les pays du Sud, fortement tributaires de la biomasse végétale (90 % des sources d'énergie) pour leurs besoins primaires (cuisson des aliments, chauffage des maisons, séchage, etc.) n'ont pas bénéficié de ces technologies. En effet, force est de constater qu'après plus de deux décennies, l'Afrique ne parvient toujours pas à faire de ces énergies un levier pour sa sécurité énergétique, sa lutte contre la pauvreté et son développement durable (José et *al*, 1994). Cet état de fait est aggravé avec l'avènement des changements climatiques qui amenuisent dangereusement les disponibilités énergétiques des pays africains. S'il demeure vrai que de nombreux pays africains risquent de connaître, à long terme, une pénurie aigüe de bois de chauffe, il est généralement admis que pour les pays situés dans les zones arides comme la zone soudano-sahélienne, ce risque est beaucoup plus grand (IEPF, 2000).

Ainsi, dans un contexte de faible développement économique et d'une quasi-absence de ressources naturelles, l'Afrique Sahélienne apparaît aujourd'hui mal armée pour faire face aux défis énergétiques. En effet, la totalité de la consommation énergétique des 08 pays sahéliens continentaux, membres du CILSS, ne représentent que 1 % de celle de la seule agglomération New-yorkaise (MINVIELLE, 2000) ; témoin du faible taux d'accès aux sources énergétiques par la plus grande partie des populations sahéliennes. Cependant, s'il existe un impératif fondamental pour le développement d'un pays, c'est bien sûr, son approvisionnement durable en énergie dans la mesure où les perspectives de croissance économique sont étroitement liées à la fourniture d'une énergie fiable et à un coût abordable (IEPF, 2000).

Dans les pays de l'Afrique au sud du Sahara, caractérisés par une forte carence en ressources énergétiques, le bois énergie constitue la principale source d'énergie domestique tant en milieu rural que urbain (Leach et Gowen, 1989).

Selon BLIN (2005), trois milliards et demi de personnes en sont tributaires pour leurs besoins élémentaires (cuisson des aliments, chauffage, éclairage, etc.), et bon nombre d'entre elles sont confrontées à une pénurie de plus en plus sévère, alors que les ressources locales sont épuisées et que les forêts, de plus en plus éloignées, sont massivement exploitées.

Le Burkina Faso à l'instar de tous les pays sahéliens, est caractérisé sur le plan énergétique par la prédominance des énergies traditionnelles (PREDAS, 2004) ; lesquelles sont constituées essentiellement de combustibles ligneux et dans une moindre mesure de résidus de cultures et de déchets d'animaux. Le bilan énergétique du Burkina Faso indique que la consommation des énergies traditionnelles est de 90 % contre 10 % pour l'hydroélectricité (CONAGESE, 2001). Le bois reste et restera pendant longtemps encore, la principale source d'énergie dominante pour les ménages. Et l'essentiel des besoins de bois de chauffe des populations provient des formations forestières naturelles (OUEDRAOGO et *al*, 2006), tandis que l'équipement de consommation de l'énergie dans les ménages, le plus utilisé est le foyer trois pierres ouvert dont le rendement énergétique se situe entre 12 et 14% (José et *al*, 1994).

Dans les grands centres urbains comme Ouagadougou et Bobo-Dioulasso, la demande en bois de chauffe devient de plus en plus importante du fait des facteurs comme la croissance démographique, la faiblesse des revenus et des coûts élevés de substituts comme le gaz. Tout cela contraint la population Burkinabè, dont environ 84 % vit en milieu rural (BERE, 2008), à se rabattre sur les combustibles domestiques (bois de feu, charbon de bois, résidus agricoles et les déchets d'animaux) pour la satisfaction de leurs besoins énergétiques.

En effet, seulement 30% des besoins des grands centres urbains sont couverts grâce à l'exploitation des zones forestières aménagées sous contrôle des administrations ou des communautés locales (CONAGESE, 2001). Cette pression associée au faible revenu des populations et à l'explosion démographique entraînent une réduction des superficies des forêts et savanes boisées : elles passeront de 140 000 à 110 000 km<sup>2</sup> à l'horizon 2020 (GUINEBAULT, 1997). Cette situation entraîne un appauvrissement des terres qui constituent le principal moyen d'existence des populations rurales; et les rend de plus en plus vulnérables à l'érosion et à la dégradation.

En plus de la pression humaine sur l'environnement, les industries par l'utilisation des combustibles fossiles (pétrole, fuel, gaz, DDO, etc.) rejettent des quantités importantes d'huiles usagers et d'émission de fumées qui contribuent à la pollution de l'atmosphère, au réchauffement climatique ; mettant ainsi en péril la santé humaine.

Face à ces enjeux de développement durable, il s'est avéré nécessaire de mettre en place au profit des populations rurales et urbaines, de nouvelles technologies qui économiseraient mieux l'énergie du combustible bois de feu. C'est alors que depuis 1978, le Burkina Faso, comme beaucoup de pays membres du CILSS a entamé des réflexions sur l'amélioration du rendement énergétique des foyers « plein air » dont la perte de chaleur est énorme. C'est ainsi que dans les années 1980 plusieurs foyers améliorés ont été expérimentés (des foyers domestiques aux foyers à grande dimension), avec des économies d'énergie allant de 29 à 60% (SANOGO, 2008). Malgré la simplicité technologique, la modicité des coûts, l'homogénéité des comportements ; on constate que des aspects techniques et psychosociologiques continuent d'être évoqués.

Au regard de ces insuffisances des équipements de consommation énergétique et de la raréfaction du combustible, des études continuent d'être menées afin de valoriser plus encore cette biomasse qui constitue plus de 89% de la consommation énergétique du pays (OUEDRAOGO, 2004). C'est ainsi qu'ils ont mis en place en 2008 un fourneau amélioré utilisant les balles de riz comme source d'énergie (BERE et GCIUS, 2008) compte tenu des potentialités que possède le Burkina Faso en terme de riziculture irriguée (Bagré, Banzon, Douna, Karféguéla, Vallée du Kou, Vallée du Sourou). En effet, la riziculture de bas fond représentant 67% de toutes les superficies rizicoles du Burkina Faso, produit 42 % de la production nationale ; et la riziculture irriguée occupe 23% des superficies rizicoles pour 53% de la production nationale (DEMBELE, 2009).

Au regard des enjeux du développement durable, il est plus que jamais nécessaire de trouver une solution économique et sociale viable au problème de bois-énergie par la valorisation des résidus agricoles. C'est dans cette préoccupation majeure que s'inscrit notre étude dont l'objectif globale est de mettre en place une technologie de valorisation énergétiquement des balles de riz (résidus du riz paddy après décorticage) au profit des populations rurales des zones rizicoles. Celle-ci devrait pouvoir contribuer à résoudre les problèmes environnementaux (déforestation, pollution atmosphérique, érosion des sols, etc.),

à conférer aux populations rurale et urbaine une autonomie énergétique, ceci dans l'optique d'un développement durable. Plus précisément, il s'agit :

- ✓ de transformer des balles de riz en briquettes (biocombustibles) qui serviront comme combustibles alternatives au bois de feu pour la cuisine des populations rurales et urbaines ;
- ✓ d'évaluation les performances du foyer amélioré métallique utilisant les balles de riz comme source de combustible ;
- ✓ de vérifier l'adaptation du foyer au contexte social actuel et son acceptabilité par les populations rurales ;
- ✓ de créer une source de revenu supplémentaire pour les transformatrices.

Le présent mémoire s'articule autour de deux grandes parties :

- ✓ la première présente la revue bibliographique ;
- ✓ et la seconde traite de l'étude expérimentale.

## **PREMIERE PARTIE : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE**

## **CHAPITRE I : GENERALITES**

### **I. GENERALITES SUR LA BIOMASSE**

La biomasse, végétale ou animale, constitue aujourd'hui 15% de la consommation énergétique mondiale (BLIN, 2005). Cette biomasse provient de multiples sources : les résidus (résidus de cultures, d'exploitations forestières, et d'industries agro-alimentaires), les déjections d'animaux, les forêts existantes et les plantations. En plus de ces sources potentielles, on peut considérer la biomasse maritime et celle constituée par les boues résultantes des stations d'épuration.

L'énergie de la biomasse est utilisée dans les pays en voie de développement pour la satisfaction des besoins primaires (cuisson des aliments, chauffage, éclairage, etc.). Dans ces pays comme dans les pays industrialisés, elle est exploitée bien en dessous de ce que la technologie pourrait permettre, principalement pour des questions économiques. En effet, la photosynthèse produit tous les ans 220 milliards de tonnes de matières sèches, c'est-à-dire 10 fois l'énergie globale actuellement utilisée et seulement 1,5% sont destinée à la production d'énergie. La fraction d'énergie que la biomasse nous fournit aujourd'hui est donc sous exploitée vu la place qu'elle occupe dans les potentiels énergétiques de la planète.

L'utilisation énergétique de la biomasse est aujourd'hui encouragée par des questions d'ordre social, économique, et surtout environnemental. L'accentuation des problèmes causés par les émissions de gaz à effet de serre concerne de plus en plus la population (raz de marées en Asie et USA, tremblement de terre en Haïti, catastrophe nucléaire de Fukushima au Japon). L'utilisation de la biomasse comme source d'énergie n'engendre pas une augmentation de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère parce que celui-ci avait été absorbé par le processus de photosynthèse au cours de la croissance de la plante ; le bilan est donc nul (José et *al.*, 1994). Mais les avantages ne se limitent pas au seul aspect environnemental. Par exemple la diffusion de l'exploitation de biomasse pourrait réduire les problèmes d'interdépendance géographiques entre zones à haute concentration de ressource d'énergie (pétrole, gaz, etc.) et zones à plus faible concentration, parce que différentes espèces végétales peuvent être cultivées presque partout dans le monde.

En outre l'implantation de petites usines rurales pour la production d'énergie à partir de la biomasse pourrait relancer l'économie de certaines régions et, également l'établissement de cultures de biomasse sur des terrains abandonnés ou dégradés pourrait les requalifier. En

revanche dans les pays industrialisés où est pratiquée la culture intensive, la mise en place de systèmes pour exploiter la biomasse des produits secondaires pourrait permettre aux exploitants de générer des fonds supplémentaires et servir comme une méthode alternative pour éliminer une partie des déchets de l'activité principale.

## **1.1. Les différents procédés de valorisation énergétique de la biomasse**

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.

### **1.1.1. La 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.

#### **1.1.1.1. La pyrolyse**

Procédé anaérobie 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.

#### **1.1.1.2. La 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).



### **1.1.1.3. La 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.

### **1.1.1.4. La 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).

## **1.1.2. La 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).

### **1.1.2.1. La fermentation et l'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).

### **1.1.2.2. Méthanisation ou fermentation anaérobie**

La fermentation anaérobie ou méthanisation permet ; à travers divers étapes, de réaliser, par processus naturel, la dégradation des matières organiques et la production d'un gaz combustible : 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).

## **II. Situation actuelle de la filière des résidus agricoles et agro-industriels au Burkina Faso**

Le secteur de l'agriculture Burkinabè est à dominante rurale. L'économie agricole occupe 80% de la population active et contribue pour près de 38,2% à la formation du Produit Intérieur Brut (PIB) (KOUTABA, 2009).

Selon les Nations Unies (2000), le secteur de l'agriculture demeure le principal domaine pourvoyeur d'emplois au Burkina Faso, et procure plus de 50% des recettes d'exportation.

L'agriculture est dominée par les cultures de subsistances et l'élevage extensif, malgré l'existence d'un secteur de cultures de rentes, consacré principalement au coton, dont les revenus restent vulnérables au regard des conditions du marché international (KOUTABA, 2009). Cependant un tiers seulement des terres reconnues comme cultivables au Burkina Faso le sont effectivement (Nations Unies, 2000), et seulement 10% des 164.400 ha des terres irrigables sont effectivement utilisés pour l'irrigation. Ainsi le secteur agricole, de même que les industries agro-alimentaires, génèrent d'importants résidus agricoles et agro-industriels.

### 2.1. Résidus agricoles et agro – industriels

Au niveau du Burkina Faso ces résidus sont diversifiés et importantes (tableau1).

**Tableau 1: Résidus agricoles et agro-industriels produits au Burkina Faso entre 2001 et 2006.**

Type de résidus	Quantités produites entre 2001 et 2006 (en tonnes)	Proportion par rapport au total de résidus produit (en %)
Tiges de sorgho	26 000 004	36
Tiges de mil	19 381 995	27
Tiges du cotonnier	75 000	15
Tiges et rafles de maïs	1 333 301,2 à 1 907 290	12
Résidus de niébé	430 587 à 698 631	5
Résidus d'arachide (fanes et coques)	1428,34 (par province)	4
Résidus de riz (paille et balles de riz)	155 688	1
Résidus de voandzou	40 000	1
Résidus de soja	1500	Inferieur à 1

Source : « Analyse spatio-temporelle de la disponibilité en biomasse au Burkina Faso » BERE ; KABORE, 2008.

### 2.2. 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, 2008). 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.

### **2.3. Sciures 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.

A ces résidus s'ajoutent les déchets ménagers qui sont aussi une source potentielle d'énergie non valorisée. Selon la CONAGESES (2001), sur la base d'études menées sur les villes de Ouagadougou, Bobo-Dioulasso et Koudougou où des structures de collecte d'ordures sont organisées ; des taux de production des déchets ménagers d'environ 0,60 kg / personne / jour dans les grandes villes et de 0,30 kg / personne / jour dans les petites localités ont été enregistrés.

## **III. Etat de la valorisation énergétique des résidus agricoles et agro-industriels au Burkina Faso**

Au Burkina, la valorisation énergétique des résidus agricoles et agroindustriels reste toujours à l'état embryonnaire. La plupart des résidus de récoltes sont utilisés de manière traditionnelle pour alimenter les feux de cuisine par les ménagères en zones rurales et périurbaines. A cela s'ajoute l'utilisation comme fourrages pour les animaux domestiques pendant la période sèche de l'année.

Pour ce qui est des résidus agro-industriels, ils sont souvent transformés en aliments pour le bétail ou la volaille : cas des graines de coton transformées en tourteaux, sources d'aliments pour le bétail ; ou soient utilisés comme engrais dans les exploitations agricoles (cendres de balles de riz des unités de décorticage, les coques d'arachide, etc.).

Néanmoins, on peut citer quelques expériences de valorisation énergétiques des résidus de cultures et autres résidus entreprises au niveau national (tableau 2).

**Tableau 2: Exemples de valorisation énergétique des résidus au Burkina**

Résidus	Type de valorisation
Copeaux de bois	Utilisés comme source de combustibles par les ménagères dans les fourneaux malgaches
Balles de riz	Combustible alimentant le foyer amélioré à balles de riz pour servir à l'étuvage du riz à Bama, Banzon et à Bagré.
Résidus d'amende de karité	Compactés et utilisés comme source de combustible en feu de cuisine
Coques d'anacarde	Utilisées comme combustible dans industries de transformation des noix d'anacarde à Bobo et Banfora
Tiges de coton et paille séchée	Confection de briquettes combustibles à Boromo financée par le PNUD
Coques d'arachides, tiges de mil, de coton et de sorgho	Production d'électricité de 22kW par gazéification pour alimenter l'hôpital de Pô : appui de l'ONG Allemande Atmos'air
Résidus d'égrainage du coton	Combustibles alimentant les chaudières de la SN - CITEC à Bobo - Dioulasso
Bagasse	Production d'électricité par cogénération par la SN - SOSUCO à Banfora

Source : Nos résultats d'enquêtes et de recherches.

#### **IV. Les différentes sources d'énergies domestiques utilisées au Burkina Faso**

Sur le plan domestique, l'énergie utilisée pour la satisfaction des besoins des populations proviennent de deux sources essentielles : les énergies traditionnelles (bois de feu, charbon de bois, résidus de cultures, etc.) et les énergies dites modernes (gaz butane, pétrole, énergie solaire, énergie éolienne, etc.).

##### **4.1. Les énergies traditionnelles**

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

##### **4.1.1. Le bois et le 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).

#### 4.1.2. Les résidus agricoles

Le secteur agricole étant dominé par les cultures vivrières (notamment les céréales), il génère d'importants résidus (tableau3). 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.

**Tableau 3: Estimation de la quantité de résidus agricoles secs à partir des quantités de récoltes.**

Récolte	Produit primaire	Produit secondaire
Coton	1 kg (graines+fibres)	1 kg de tiges de coton
Maïs	1 kg de graines	2-3 kg de paille
Arachides	1 kg d'arachides	0.4 kg de gousses
	1 kg d'arachides+gousses	2.3 –3 kg de tiges
Sorgo/mil	1 kg de gruaux	3-4 kg de paille

Source, Rapport final provisoire : actualisation des données nationales sur les énergies domestiques au Burkina Faso (PREDAS, 2007).

#### 4.2. Les énergies modernes

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

##### 4.2.1. Le 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).

#### 4.2.2. Le 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.

#### 4.2.3. L'énergie électrique

Au Burkina Faso, l'électricité est produite par la société nationale d'électricité (SONABEL). Elle est essentiellement d'origine thermique (produite à partir du DDO, Fuel Oil et Diesel).

#### 4.2.4. L'énergie 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.

#### 4.2.5. Les biocarburants

Le secteur de biocarburant 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*).

#### 4.2.6. Le 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.

### V. Les technologies utilisées au niveau des énergies domestiques au Burkina Faso

Elles varient des plus anciennes aux nouvelles technologies mises au point avec des résultats acceptables de part et d'autre. Ainsi, il existe des foyers améliorés, des réchauds ou cuisinières à gaz, des réchauds à pétrole, des cuiseurs solaires et des fours solaires.

#### 5.1. Les foyers améliorés

Pour ce qui est des foyers améliorés, seuls 12,2% des ménages les utilisent sur le plan national (INSD, 2005). Les tests menés en laboratoire sur l'efficacité des foyers améliorés donnent une économie de bois comprise entre 30 et 40% par rapport aux foyers traditionnels (SANOGO, 2008).

## **5.2. Les réchauds ou cuisinières à gaz**

Leur vulgarisation s'est développée avec le rythme de consommation du gaz butane. L'organisation du marché est composée de grossistes, semi-grossistes et détaillants repartis sur tout le territoire.

## **5.3. Les réchauds à pétroles**

Le réchaud à pétrole est une option de substitution au bois de chauffe. Ils sont peu vulgarisés. Le premier test d'acceptabilité des réchauds à pétrole dans les ménages de Ouagadougou et de Ouahigouya fut réalisé en juillet 2001 par EDENE pour le compte du RPTES (Programme Régional du sous-Secteur des Energies Traditionnelles).

## **5.4. Les cuiseurs, séchoirs et chauffes eaux solaires**

### **5.4.1. Cuiseurs solaires**

Ce sont des concentrateurs d'énergie solaire sous forme de paraboles qui captent l'énergie solaire et la concentrent sur un corps noir. L'énergie thermique ainsi concentrée est utilisée pour faire la cuisine.

### **5.4.2. Séchoirs solaires**

En suivant le même procédé, des séchoirs solaires ont été mis en place par le Centre National des Recherches Scientifique et technologique (CNRST) au profit des femmes pour le séchage de fruits et légumes, le traitement du niébé et certaines céréales (Nation Unies, 2000).

### **5.4.3. Chauffes eaux solaires**

Les chauffes eaux solaires sont d'autres équipements utilisant l'énergie solaire. Le nombre de chauffe eau solaire installé sur l'ensemble du territoire était estimé en 1998 à 291 unités et leur capacité de stockage varie de 150 à 200 litres (Nations Unies, 2000).

## **VI. Les contraintes au développement du secteur énergétique au 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'énergie 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 ;
- ✓ la résistance psychologique du consommateur sahélien, qui, le plus souvent, se décide à partir de l'expérience positive du voisin ;
- ✓ 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).

## **VII. Les actions de promotion et de développement du secteur énergétique au Burkina Faso**

Dans le but de promouvoir et de développer le secteur énergétique au Burkina, plusieurs actions ont été entreprises par l'Etat. On peut citer entre autres :

- ✓ le programme RPTES (programme régional pour le sous-secteur des énergies traditionnelles) dont l'objectif est de renforcer la capacité des populations rurales à gérer durablement les ressources forestières, tout en procédant à une amélioration et à une valorisation de la production du bois et de la filière de commercialisation, permettant ainsi un meilleur approvisionnement en combustibles ligneux et l'augmentation progressive du revenu monétaire en milieux rural et urbain ;
- ✓ le projet d'électrification de 50 localités par système photovoltaïque ;
- ✓ le programme National de Gestion des Terroirs (PNGT) en son volet aménagement et gestion des forêts pour la production de l'énergie traditionnelle ;
- ✓ le projet PNUD sur financement danois pour la valorisation des déchets agricoles a permis l'installation d'une usine de fabrication de briquettes à partir des tiges de coton ;



- ✓ au niveau de la tarification de l'électricité, la mise en place d'une tranche sociale de faible puissance (0,6 kVA) qui bénéficie des coûts de raccordement et de prix du kWh réduit ;
- ✓ la mise en œuvre de mesures standards de limitation des pollutions des centrales de la SONABEL, et le Programme de Maîtrise de l'Énergie ;
- ✓ la vulgarisation de matériels qui économisent le bois ou utilisant d'autres sources d'énergie.

## CHAPITRE II : LA DENSIFICATION DE LA BIOMASSE

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 à 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).

### I. La matière première

Les plantes cultivées à des fins alimentaires ou industrielles sont rarement utilisées à 100% : elles laissent généralement un résidu sur le terrain. Celui-ci est le plus souvent valorisé par l'agriculteur, soit par enfouissement pour améliorer ou maintenir la productivité du sol, soit à d'autres usages comme la construction ou l'alimentation du bétail (José et *al*, 1994). Il est avéré que beaucoup de pays dans le monde disposent de déchets végétaux en grande quantité, qui sont soit non utilisés, soit récupérés et utilisés sans transformation.

Cette biomasse résiduelle représente un potentiel énergétique très important (BELLAMY et *al*, 1984). Ces résidus non utilisés car n'apportant pas grand chose au sol, deviennent abondants et gênants. Dans ce cas, leur valorisation énergétique peut être envisagée afin de pallier les problèmes de pénurie continue du bois et de déforestation. Ces résidus proviennent de trois sources principales : l'exploitation agricole, les industries agro-industrielles et l'exploitation forestière.

### **1.1. Les résidus agricoles et agro-industriels**

Les résidus agricoles encore appelés résidus de cultures, sont les déchets générés par l'activité agricole. En effet les résidus agricoles secs sont définis comme étant la partie des plantes non comestible pour l'homme, laissée sur place après récolte. Il s'agit principalement de pailles de céréales, de pailles, tiges et fanes des oléagineux (Colza, Lin oléagineux, Tournesol, arachide, etc.). La quantité de ces résidus est très variable en fonction des cultures (tableau 4).

Par ordre d'importance, les résidus de canne à sucre représentent 26% de la plante, suivis de ceux du blé (18,7%), du riz (18,3%), et du maïs (14%). Selon BELLAMY et *al* (1984), 22 millions de tonnes de résidus de canne à sucre est produite chaque année à Cuba ; 10 millions de tonnes de résidus de palmier à huile par an sont produits en Malaisie et 12 millions de tonnes de résidus de riz par an en Birmanie.

Quant-aux résidus agro-industriels, ils proviennent des industries de transformation agro-alimentaires après transformation de la matière première agricole. Ils sont en comparaison avec les résidus de culture, moins fibreux et plus concentrés (Devendra, 1988). Sur le plan mondial, ces deux types de résidus représentent un potentiel énergétique très important (BELLAMY et *al*, 1984).

**Tableau 4 : Répartition de la biomasse produite par type de production.**

Type de productions	Production de déchets	Produit comestible correspondant
Maïs	2 kg de paille	1 kg de grain de maïs
Millet	2 kg de paille	1 kg de millet grain
Sorgho	2 kg de paille	1 kg de sorgho grain
Blé	1 kg de paille	1 kg de grain
Orge	1 kg de paille	1 kg de grain
Avoine	1 kg de paille	1 kg de grain
Seigle	1 kg de paille	1 kg de grain
Riz (graine entière)	0,91 kg de paille	1 kg de riz
Balle de riz	0,22 kg de balles de riz	1 kg de riz paddy
Soja (graine entière)	0,91 kg de paille	1 kg de soja graine
Soja	1,1 kg de coques	1 kg de soja décortiqué
Canne à sucre	0,43 kg de bagasse	1 kg de jus
Coton	3 kg de tiges + feuilles	1 kg de coton
Graine de coton	0,26kg de coque	1 kg de graine de coton décortiqué
Café	1 kg de parche	1 kg de café décortiqué
Cacao	1,85 kg de déchets de cabosse	1 kg de fève de cacao
Arachide	0,43 kg de coque	1 kg d'arachide décortiqué

Source : FAO agricultural résidus quantitative survey, Rome 1979.

## 1.2. Les résidus forestiers

Les déchets d'exploitation forestière 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 1m<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. Le tableau 5 nous donne un aperçu sur la production mondiale de bois et de fibres issus du bois.

**Tableau 5 : Production potentielle mondiale de bois, de fibres de récupération ou non ligneuses et autres sources de combustibles provenant des forêts, prévues en 2010**

Région	Production prévue en 2010			Production potentielle de diverses sources prévue en 2010
	Bois rond industriel	Fibres de récupération ou non ligneuses	total	
Afrique	84	2	86	81
Asie	421	222	643	948
Océanie	54	0	54	80
Europe	502	133	632	807
Amérique du Nord	658	147	805	798
Amérique du Sud	153	2	155	225
<b>Total mondial</b>	<b>1 872</b>	<b>506</b>	<b>2 375</b>	<b>2939</b>

*Note: tous les chiffres concernant les volumes sont exprimés en équivalent millions de m<sup>3</sup> par an (les chiffres relatifs aux fibres de récupération et aux fibres non ligneuses ont été convertis en équivalent produits ligneux). (FAO, 1999).*

## I. La chaîne de densification

### 2.1. 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.

### 2.2. 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).

### **2.3. Les différentes filières de la densification**

Entre les résidus en vrac et les briquettes très dures à haute densité, on observe donc tout un éventail de produits intermédiaires plus ou moins compactés ou densifiés suivant le procédé mis en œuvre (Louvel, 1986). Selon BELLAMY *et al* (1984), on distingue deux procédés de base pour compacter la biomasse :

- ✓ Un procédé d'extrusion continu ou semi-continu qui fait appel à des technologies relativement complexes ;
- ✓ Le compactage dans un cylindre fermé : dans ce cas, on ne fabrique qu'une seule briquette à la fois. C'est le procédé généralement utilisé pour les presses manuelles ou à traction animale.

Selon le matériel utilisé et le procédé de densification adopté, Louvel (1984), Grover et Mishra (1996), et HeinoVest (2003) catégorisent trois filières de densification de la biomasse : la filière industrielle, la filière intermédiaire et la filière manuelle.

#### **2.3.1. Filière industrielle ou systèmes à hautes pressions**

Cette filière utilise des presses de grande capacité (entre 0,3 et 1 tonne/ heure pour la plupart) fonctionnant à haute pression (figure 1), généralement sur des sites agro-industriels disposant des résidus homogènes et abondants.

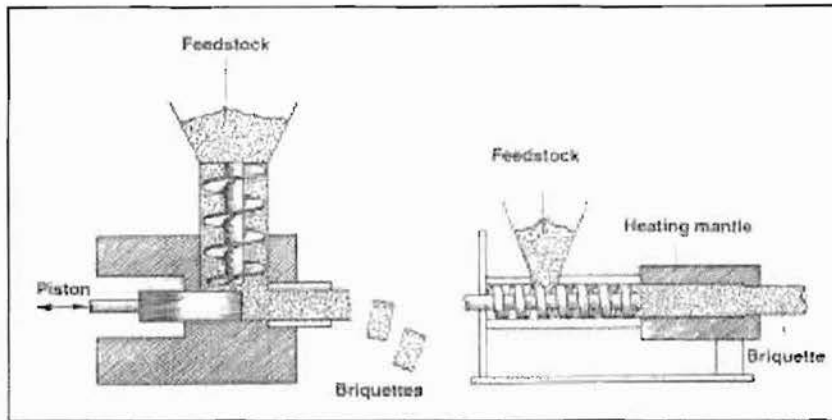


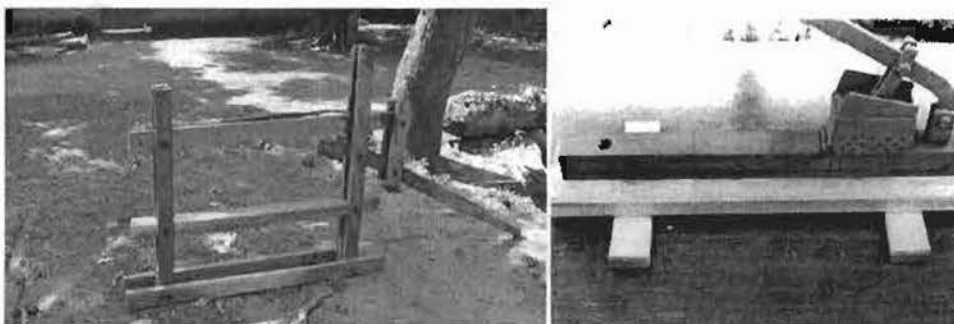
Figure 1 : Presse à piston et Presse à vis cylindrique (Source: Dr. Ing. Heino Vest, 2003: Small Scale Briquetting and Carbonization of Organic Residues for Fuel).

### 2.3.2. Filière intermédiaire ou systèmes à moyennes pressions

Les presses de cette catégorie ont une capacité de production plus faible (entre 30 et 300 kg / heure) mais sont plus simples, fonctionnant à moyenne pression et sont moins onéreuses à l'achat comme à l'entretien. Elles sont destinées à de petites entreprises artisanales ou à des centres de transformation de produits agricoles de dimensions moyennes.

### 2.3.3. Filière manuelle ou systèmes à basses pressions

Les presses les plus simples sont des leviers plus ou moins démultipliés qui permettent de compacter des résidus à l'échelle d'une exploitation familiale. Développant de basses pressions elles exigent souvent de recourir à un liant pour assurer l'agglomération des résidus (Louvel, 1986). La plus simple de ce type de presse peut être fabriquée au niveau du village (photos a et b). Le bras inférieur de la presse est fixé sur un socle en bois. La pression est de 50.à 100kg par briquette, soit 5 à 15 kg/ cm<sup>2</sup> (BELLAMY et al, 1984)



Photos a : Deux types de presses manuelles à levier

## 2.4. 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 6 donne des valeurs caractéristiques de quelques produits densifiés :

**Tableau 6: Valeurs caractéristiques de quelques produits densifiés**

Résidus utilisés	Type de presse	Pression (kg/cm <sup>2</sup> )	Taux d'humidité (%)	Taux 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 + feuilles sèches + poussière de charbon + Écorce de bois + 10% de fumier	Manuel	5 à 15	8	19	3502
Paille 40% + Scieries 40% + Fumier 20%	Terstaram	80 à 90	9,2	14	3266
Brindilles 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

### 2.4.1. 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 7).

**Tableau 7 : Dimensions de quelques produits densifiés**

Dénomination du produit densifié	Diamètre du côté (cm)	Longueur (cm)	Section
Briquettes	30 à 90	+ de 25	Rond ou rectangulaire
Bûches	90	+ de 300	Rond ou rectangulaire
Granulés	5 à 20	-de 40	Rond
Cubes	30 x 30 45 x 38	de 50 à 75	Rectangulaire

Source : « Guide technique de la densification » BELLAMY et *al*, 1984.

#### 2.4.2. Densité

La densité du produit densifié varie en fonction du procédé de densification et de la nature de la matière première utilisée. Le tableau 8 illustre les densités de quelques types de produits densifiés.

**Tableau 8 : 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.

#### 2.4.3. Le 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).

#### 2.4.4. Le 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 générale proche de celui du bois sec qui est de 16 MJ / kg ; contre 30 MJ / kg pour le charbon (UNHCR , 2002).



#### **2.4.5. Le 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 : ETUDE EXPERIMENTALE**

## CHAPITRE I : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Notre zone d'étude est constituée de deux sites à savoir Banzon et Bama, tous situés à l'ouest du Burkina Faso, dans la région des Hauts-Bassins. La figure 2 donne un aperçu de la situation géographique des deux sites.

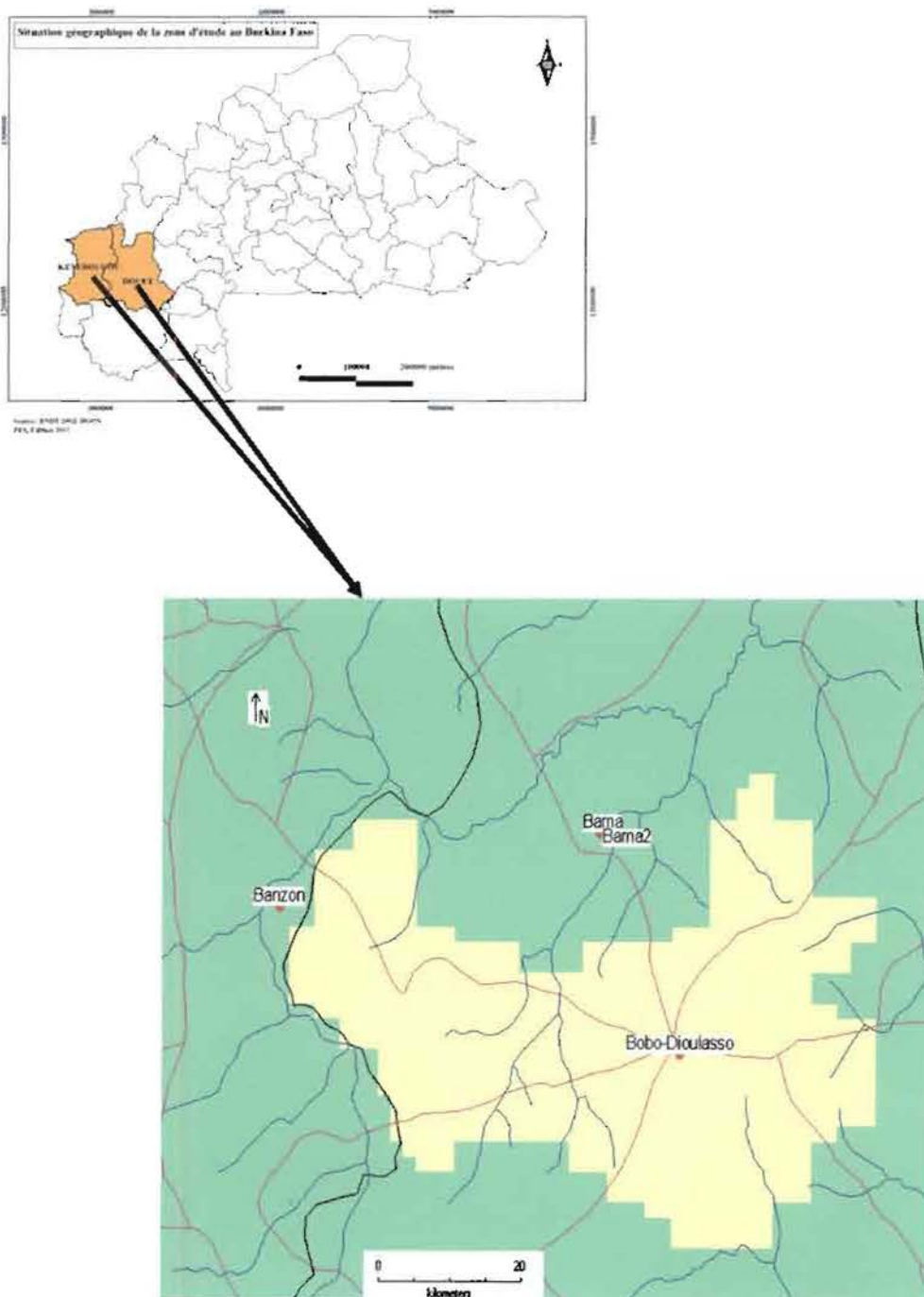


Figure 2: Situation géographique de la zone d'étude.

## I. Site de Banzon

### 1.1. Situation géographique

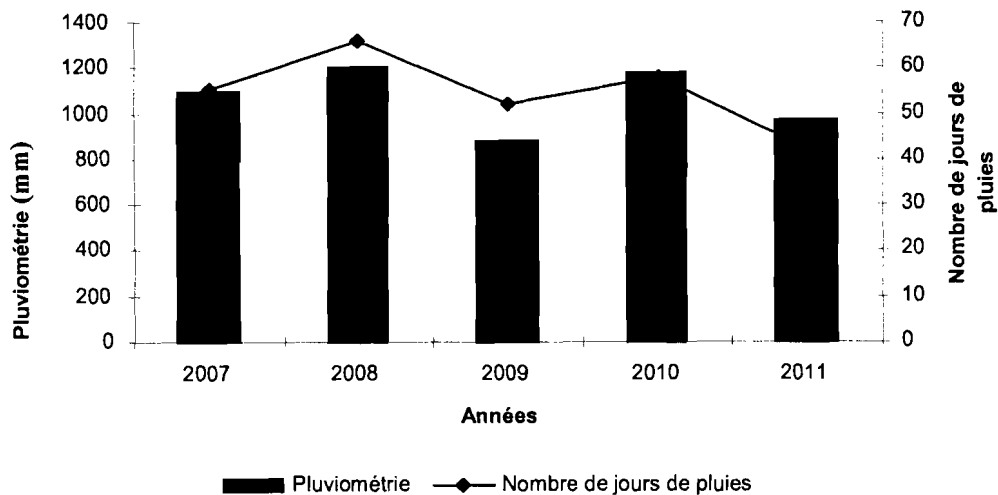
La commune de Banzon est située à l'ouest du Burkina Faso dans la province du kénéDougou, à 65 km de Bobo-Dioulasso. Elle couvre une superficie de 252 km<sup>2</sup> et est limitée au Nord par la commune de Samorogouan, au Sud par la commune de Djigouera et Kourignon et à l'Est par la commune de Karankasso-Sambla. Administrativement, la commune de Banzon appartient à la région du Houet. Il se trouve dans le bassin supérieur du Mouhoun (ancien Volta Noire), cours d'eau présentant d'importantes variations de débit en fonction des précipitations. Banzon « champs de brousse » en langue toussian est construit dans une zone alluviale à sols hydromorphes. Un aménagement hydro agricole destiné à la création de rizière a été réalisé par la coopération chinoise (Chine populaire) en 1981. La superficie irrigable est de 1100 ha dont 454 ha sont effectivement cultivés (PCD/AEPACB 2011). Les coordonnées géographiques de ce site sont comprises entre 4°48' de longitude Ouest et 11°9 de latitude Nord.

### 1.1. Données climatiques

Le climat, de type soudanien est caractérisé par deux saisons nettement marquées : une saison pluvieuse d'Avril à Octobre avec des précipitations annuelles qui dépassent les 1000 mm de pluies ; une saison sèche de Novembre à Avril, marquée par l'installation de vents du nord secs et chargés de poussières. La pluviométrie enregistrée pendant la saison pluvieuse 2010 était de 1175 mm de pluies en 58 jours. L'année 2011 comparativement à 2010, a enregistré 968,7 mm de pluies en 42 jours ; cela traduit visiblement une baisse de la pluviométrie en 2011 qui aura sans doute des effets négatifs sur la production agricole. Le mois le plus pluvieux est le mois d'Août, avec 223,2 mm d'eau répartis sur 10 jours contre 13 mm de pluies en un jour pour le mois de Avril qui a été le moins pluvieux. La figure 3 nous donne un aperçu sur la variation de la pluviométrie de 2002 à 2011.

Les températures maximales sont atteintes en avril et les minimales en Août et Décembre (PCD/AEPACB 2011). La variation de température permet de distinguer plusieurs périodes dans l'année :

- ✓ une période fraîche et sèche de décembre à février,
- ✓ une période de grande chaleur de mars à juin,
- ✓ une période fraîche et humide de juillet à septembre,
- ✓ une période chaude d'octobre à novembre.



**Figure 3 : Variation de la pluviométrie de Banzon de 2007 à 2011**

## 1.2. Ressources naturelles

### 1.2.1. Le relief

Le relief est caractérisé principalement par la présence d'une grande plaine alluviale (30% de l'espace communale, source : PCD/AEPACB 2011) dominée par des collines ou buttes cuirassées situées au Sud et à l'Est de la commune (18% de l'espace communale).

### 1.2.2. Les sols

Les types de sols rencontrés au niveau de la commune de Banzon sont :

- ✓ les sols limoneux à argilo-limoneux en surface et argileux en profondeur ; ce sont des sols hydromorphes à Pseudo-Gley, chimiquement riches ;
- ✓ Les sols hydromorphes peu humifères à pseudo-Gley d'ensemble, des sols ferrugineux lessivés à taches et concrétions, des sols bruns eutrophes – hydromorphes - vertiques, des sols peu évolués d'apport alluvial modaux et des sols bruns eutrophes - ferruginisés. Ces sols rassemblent les meilleures propriétés hydriques, physiques et chimiques et sont favorables à la riziculture pluviale. Ce type de sols occupe 30% de l'espace communale ;
- ✓ Les sols gravillonnaires sont des sols tropicaux lessivés à concrétion sur sédiments sablo-argileux, de profondeur faible (inférieur à 40cm). Ils sont gravillonnaires, hétérogènes dans l'espace, à valeur agricole faible.

### 1.2.3. La végétation

Trois formations végétales se succèdent dans la commune de Banzon :

- La savane arborée se développe dans les pénéplaines et les espèces les plus fréquents sont *Pteleopsis suberosa*, *Terminalia laxiflora*, *Isoberlinia doka* ; cette formation végétale qui devrait être la plus représentative ne compte que pour 5% de la commune suite à l'exploitation abusive du bois et à l'extension des superficies cultivées ;
- Une savane arbustive occupant les buttes et collines cuirassées dont les espèces dominants sont *Pteleopsis suberosa*, *Detarium microcarpum*, *Terminalia laxiflora*, *Hymenocardia acida*, *Feretia podanthera*. Cette formation végétale occupe 20% de l'espace communale ;
- La galerie forestière restante occupe une superficie de 254 hectares. Cette galerie est composée des espèces suivantes : *Alchornea cordifolia*, *Berlinea grandiflora*, *Dichrostachys cinere* ;
- La plaine aménagée qui couvre une superficie d'environ 1100 hectares exploitables dont 454 hectares sont réellement exploités. C'est la partie de la commune qui est plus propice à la culture du riz et aux cultures de contre saison.

### 1.2.4. La faune

La faune autrefois abondante est réduite au petit gibier, mais aussi une colonie importante d'hippopotames (espèce protégée), la faune aviaire est très variée et abondante dans la zone.

### 1.2.5. Hydrographie

L'espace communale est parcourue par d'importants cours d'eau dont les plus importantes sont le Mouhoun et le Pendjab. La commune abrite également des plans d'eau dont les plus importantes sont : à Banzon, à Niawaré et au niveau du campement des pêcheurs. L'ensemble du réseau appartient au bassin hydrographique du Mouhoun supérieur.

## 1.3. Milieu humain

Le peuplement autochtone est constitué par les Toussiants. Mais suite à la migration des années 1977, une mosaïque de population s'est constituée, composé de Mossi, de Peuhl, de Samogo, de Dafin, etc. Selon les résultats définitifs du recensement de la population en 2006, la population de la commune de Banzon était de 14885 habitants dont 7337 hommes et 7548 femmes, avec 2613 ménages.

Entre 1996 et 2006, la population a considérablement augmentée avec un taux de croissance de 3,2%, et une densité de 59,06 h/km<sup>2</sup> (habitants au kilomètre carré). Les projections démographiques de la commune à l'horizon 2015 sont consignés dans le tableau 9.

**Tableau 9 : Perspectives d'évolution de la population de la commune de Banzon en 2015**

Nom du village	Total ménage	2006	2009	2011	2015
BANZON	1515	8201	9014	9600	10889
DORIA	49	298	328	383	396
FIEEZON	276	1507	1656	1939	2001
KOUSENI	543	3401	3739	4377	4517
NABLO-DIASSA	147	904	994	1163	1200
NIANWERE	84	573	630	737	761
<b>TOTAL</b>	<b>2613</b>	<b>14885</b>	<b>16360</b>	<b>19151</b>	<b>19764</b>

Source : Projection réalisée à partir des données du RGPH 2006.

#### 1.4. Activités socio-économiques

##### ✓ L'agriculture

Sur le plan agricole, la production du riz pluvial et irrigué est très importante. L'activité agricole est assez diversifiée et se déroulant sur deux campagnes agricoles dans l'année: une saison sèche du 15 Décembre à la fin du mois de Mai, et l'autre en saison de pluies du 15 juin à la fin novembre. Cela est rendu possible grâce à la présence d'une plaine aménagée d'environ 454 hectares. La production agricole se répartie comme suit :

- cultures céréalières (maïs, sorgho blanc, riz pluvial, riz irrigué) ;
- cultures de rente (sésame, arachide, coton, niébé) ;
- et les féculents (igname, patate, manioc, taro).

Le maïs est la spéculatation dominante occupant 39% des superficies cultivées. Ensuite vient le riz qui occupe 23% des terres cultivées. Mais si l'on tient compte que le riz est produit au cours des deux campagnes agricoles, on peut dire que c'est la production la plus importante dans cette commune. Le sorgho occupe une place non négligeable, soit 23% des superficies emballées.

Au niveau des cultures de contre saison, après le riz, c'est la production de banane qui occupe une place importante, elle est suivie par la culture de patate. D'autres spéculatations telles que le maïs, le manioc, le niébé, l'oignon, les tomates, les choux, le gombo, les courgettes, l'aubergine, l'arachide et les pastèques y sont produites également.

Cette production en saison sèche est possible grâce à l'irrigation à partir des cours d'eau pérennes ; elle permet d'exploiter environ 175 hectares en dehors de la plaine aménagée (PCD / AEPACB 2011).

#### ✓ L'élevage

L'élevage est caractérisé d'une part par l'existence d'un cheptel important dominé par les bovins et d'autre part par un système d'exploitation de type extensif. Il s'agit d'un élevage contemplatif avec d'importants troupeaux. Du fait de la proximité de la ville de Bobo-Dioulasso, il se développe de plus en plus un élevage de type semi-extensif avec l'émergence d'ateliers d'embouche bovine. L'alimentation des animaux est basée sur l'exploitation des pâturages naturels et des résidus de récolte. Les effectifs du cheptel sont consignés dans le tableau 10 :

**Tableau 10 : Effectifs du cheptel des communes de Banzon et Bama**

CHEPTTEL	Bovins	Ovins	Caprins	Porcins	Asiens	Volailles
<b>Banzon</b>	5000	5000	6000	3000	8000	6000
<b>Bama</b>	45310	17928	13979	10043	3896	-

Source : ZATE Banzon et Bama (2011).

Les contraintes majeures qui minent le secteur de l'élevage sont l'inaccessibilité des points d'eau et de zone de pâture en saison pluvieuse et les conflits entre éleveurs et agriculteurs.

#### ✓ La pêche et la chasse

La présence de retenues d'eau dans la commune favorise le développement de l'activité de la pêche. Un nombre très réduit de personnes s'intéressent à ces deux activités dans la commune de Banzon. Elle est pratiquée par des pêcheurs professionnels (courant appelés « Bosso ») semi-professionnels et des amateurs. Les différentes espèces de poissons rencontrées sont : *Clarias gariepinus*, *Tilapia zillii*, *Lates niloticus*, *Heterotis bebe*, *Synodontis sp*, *Mormonis sp*.

Quant-à la chasse, elle est pratiquée par une infime partie de la population. Selon le responsable du service forestier de la zone, on note la présence de quelques braconniers.

#### ✓ Le petit commerce et l'artisanat

L'activité commerciale est la seconde activité qui occupe la population de Banzon.



Elle est organisée autour de la tenue du marché hebdomadaire de Banzon tous les dimanches. L'importance de la production du riz et du maraîchage confère à la commune sa vitalité commerciale. L'activité commerciale trouve son émergence dans le transit quotidien qui s'effectue entre le village et les villes comme Bobo-Dioulasso et Orodara.

L'activité artisanale est présente dans la zone à travers des artisans locaux comme les forgerons, les menuisiers, les couturiers, les apiculteurs et les productrices du beurre de karité.

## **II. Site de la Vallée du Kou**

### **2.1. Site de la vallée du kou**

Le site de la vallée du Kou est situé à l'ouest du Burkina Faso, à environ 30 km au nord-ouest de Bobo-Dioulasso ; la commune rurale de Bama est sur la route nationale n° 9 axe Bobo-Faramana, frontière du Burkina Faso avec le Mali. Les coordonnées géographiques de ce site sont : 4°22' de longitude Ouest et de 11°22' de latitude Nord et une altitude de 300 m (N'KRUMAH, 2000 ; GUIRE, 2011).

Administrativement la commune de Bama appartient à la région des Hauts-Bassins et plus précisément à la province du Houet. La commune de Bama est caractérisée principalement par la présence d'une plaine aménagée de 1260 ha pour la riziculture irriguée. Les travaux d'aménagement de la plaine ont débuté en 1969 et se sont poursuivis avec des travaux d'extension jusqu'en 1974 par la coopération Chinoise (Chine de Formose) (SANON, 2003 ; CIR-B, 2008). Celle-ci a été remplacée par la République Populaire de Chine qui a poursuivi les travaux d'aménagement jusqu'en 1979. De 1986 à 1989, les Pays-Bas sont intervenus pour une réhabilitation complète du réseau hydraulique (CIR-B, 2008).

### **2.2. Données climatiques**

Selon GUINKO (1984), le climat de la vallée du Kou est du type sud-soudanien et est caractérisé par l'alternance d'une saison pluvieuse monomodale de Mai à Octobre et d'une saison sèche de Novembre à Avril.

La pluviométrie enregistrée pendant la saison pluvieuse 2010 était de 1193,7 mm de pluies en 95 jours. L'année 2011 comparativement à 2010 a enregistré 827 mm de pluies en 71 jours (Station de Recherches Agronomiques de Bama).

On note ainsi, une diminution remarquable de la pluviométrie en 2011 qui, aura sans doute une répercussion sur la production agricole de la campagne agricole 2010-2011 comme partout au Burkina Faso. La figure 4 illustre la variation de la pluviométrie de Bama de 2002 à 2011

Les températures moyennes varient entre 23,5 °C et 29.95 °C, avec des minima de l'ordre de 10 à 12 °C enregistrés durant le mois de Décembre et des maxima de 39°C enregistrés au cours des mois de mars et de mai (N'KRUMAH, 2000 ; GUIRE, 2011 ). L'humidité relative fluctue tout aussi fortement dans l'année : de plus de 70 % de juillet à octobre, elle descend jusqu'à près de 30 % en janvier – février.

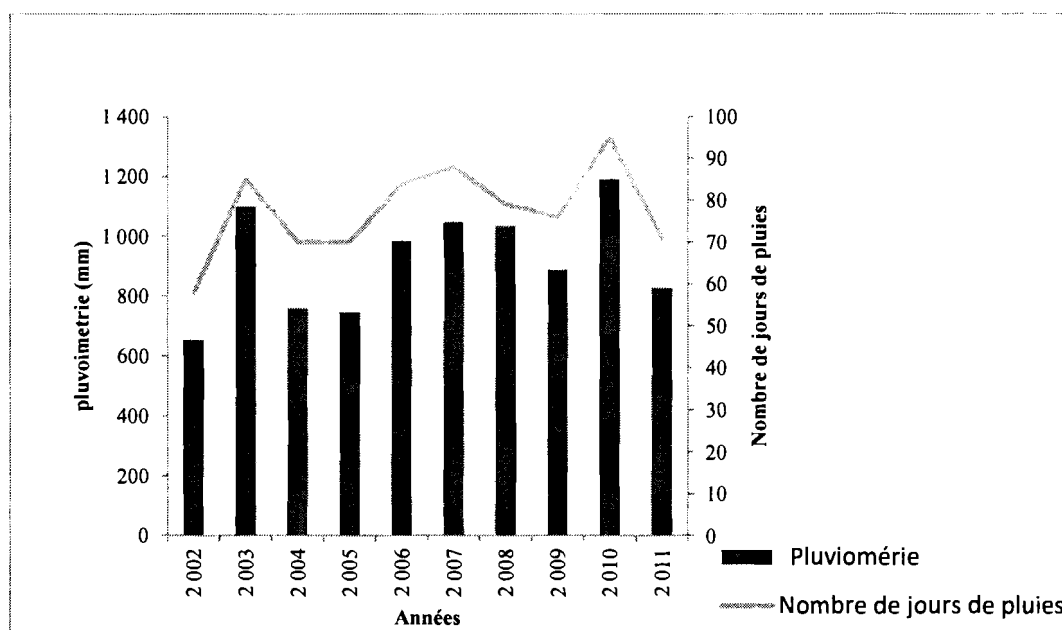


Figure 4: Variation de la pluviométrie de Bama de 2002 à 2011.

### 2.3. Ressources naturelles

#### 2.3.1. Le relief

S'étendant sur une superficie de 1307,8 km<sup>2</sup>, la commune de Bama est dominée des vastes plaines d'une altitude moyenne de 320 mètres couvrant principalement les villages de Bama , Natema, et Séguéré-Niguema. Le sud de la commune est occupé par de nombreuses buttes et collines avec des altitudes allant de 440 à 480 mètres.

#### 2.3.2. Sols

Les sols de la vallée du kou sont aussi recensés comme ferrugineux tropicaux, très hydromorphes par endroits (N'KRUMAH, 2000).

Les différents types de sols rencontrés au niveau de la commune de Bama sont :

- ✓ les sols limono-argileux à argilo-limoneux en surface, et argileux en profondeur. Ces sols sont de type hydromorphe à Pseudo-Gley. Ils occupent plus de la moitié de l'espace communale et conviennent à la riziculture et à la maraîchéculture ;
- ✓ les sols gravillonnaires : ce sont des sols ferrugineux tropicaux lessivés sur sédiment sablo-argileux. Ces sols sont de profondeur inférieure à 40cm et ont une valeur agricole faible ;
- ✓ les sols argilo-sableux en surface et les argileux en profondeur. Ils regroupent les sols bruns eutrophes possédant d'excellentes qualités et aptes aux cultures de rentes (coton, sésame et arachide) ;
- ✓ les sols argilo-sableux en surface : il s'agit des vertisols sur alluvions fluviales. Ce sont des sols ferrugineux tropicaux lessivés ayant une valeur agronomique certaine et propices aux cultures de rentes.

### 2.3.3. La végétation

La description de la zone semi-aride au sud du Sahara attribuée à la région des Hauts-Bassins, une végétation naturelle de type savane arbustive et arborée (N'KRUMAH, 2000). Des forêts claires sont enregistrées aux abords des bas-fonds. La phytogéographie décrite par GUINKO (1984), classe la vallée du kou dans le secteur soudanien méridional. Plusieurs formations végétales se succèdent au sein de la commune :

- ✓ la savane arborée : se développant dans les pénélaines et dominée par les espèces telles que *Parkia biglobosa*, *Detarium microcarpum*, *Sclerocarya birrea*, *Vitellaria paradoxa*, *Piliostigma thonningii*, *Tamarindus indica*, *anogeissus leiocarpus* ;
- ✓ la savane boisée évoluant sur terrasses fluviales dont les espèces dominantes sont : *Mitragyna inermis*, *Terminalia macroptera* et *Piliostigma reticulatum* ;
- ✓ la savane arbustive sur les collines et les buttes cuirassées ; cette formation végétale est caractérisée par *Acacia macrostachya*, *acacia seyal*, *Guiera senegalensis*, *Loudetia togoensis* et *Cymbopogon sp* ;
- ✓ la prairie humide, rencontrée dans plaines inondables ; avec un tapis graminéen composé de : *Andropogon spp*, *Pinacetum pedicellatum*, *Eragrostis trenula*, *Vitiverbia nigriflora*.

### 2.3.4. Hydrographie

La commune de Bama est traversée par la rivière Kou qui abrite un patrimoine remarquable. Affluent du Mouhoun, c'est la plus importante source d'eau qui sert principalement à la riziculture irriguée et à la culture de contre saison. On peut citer d'autres sources aussi importantes comme :

- ✓ le Mouhoun qui occupe la partie centrale de la commune ;

- ✓ le Niamé qui est aussi un autre cours d'eau rendu pérenne à partir des sources de Pessa, il permet aux producteurs du village de Desso d'irriguer leurs périmètres maraîchers et fruitiers.

La commune ne comporte qu'une seule retenue d'eau : le lac de la Vallée du Kou d'une superficie de 100 ha, pour un volume de 100 000 m<sup>3</sup> (SANON, 1995 ; ISND, 2007). Selon SANON (1995), le lac est alimenté en eau par plusieurs sources d'eau :

- ✓ la rivière Kou ;
- ✓ le ruissellement du système d'irrigation des rizières ;
- ✓ la nappe phréatique ;
- ✓ le cours d'eau saisonnier Bongo ;
- ✓ les eaux de pluies.

Cependant, il faut noter qu'un projet d'aménagement hydraulique d'envergure nationale (le barrage de Samandeni) est en exécution sur le site de Natema, localité de la commune.

#### **2.4. Milieu humain**

La présence de la plaine aménagée et surtout l'importance de la riziculture irriguée sont à l'origine de la grande taille de la population de Bama estimée à 76 101 habitants, répartie entre ses 8 quartiers avec une densité de 32.3 habitants au km<sup>2</sup> (ISND, 2007).

La population autochtone les Bobo ne s'était pas intéressée à la mise en valeur du périmètre, si bien que la majorité des producteurs sont des migrants (SANON, 2003). Les autres groupes ethniques rencontrés sont les Mossi, les Peulh, les Dioula, Samo, Dafing et les Sénoufo (CIR-B, 2008).

#### **2.5. Activités socio-économiques**

##### **✓ L'agriculture**

Sur le plan agricole, les cultures céréalières occupent une place de choix dans superficies cultivées (70% des superficies emblavées ; source : PCDB, 2011). La principale culture céréalière est le riz irrigué, produit en double campagne : une campagne hivernale de juin à novembre et une campagne sèche de Janvier à Mai.

Le riz occupe la superficie totale de la plaine aménagée en saison humide, sauf s'il y a des inondations qui rendent inexploitable quelques hectares (SANON, 2003 ; CIR-B, 2008). En plus du riz irrigué, d'autres céréales comme le maïs, le sorgho, le riz pluvial, le riz de bas-fond, et le mil, y sont produites. La présence de l'eau favorise également le développement des cultures maraîchères (choux, tomates, courges, etc.), d'arbres fruitiers (papaye, goyave, citron, etc.) et des plantations de banane.

✓ **L'élevage**

L'élevage est la seconde activité pratiquée dans la commune. Il est caractérisé d'une part par l'existence d'un cheptel important dominé par les bovins (estimé à 45 000 têtes ; source : PCDB, 2011) et d'autre part par un système d'exploitation de type extensif. Il s'agit d'un élevage contemplatif avec d'importants troupeaux. Du fait de la proximité de la ville de Bobo-Dioulasso, l'élevage de type semi-extensif commence à voir le jour avec l'émergence d'ateliers d'embouche bovine dans la commune.

L'alimentation des animaux est basée sur l'exploitation des pâturages naturels et des résidus de récolte.

✓ **La pêche**

L'activité de la pêche est pratiquée au niveau du lac par un groupement de pêcheurs professionnels. Elle est aussi pratiquée par les autochtones de Bama de façon occasionnelle. La production de poissons y est estimée à 100 kg/ ha / an (SANON, 1995).

✓ **Le petit commerce et l'artisanat**

L'activité commerciale est une activité en plein développement dans la commune de Bama. Elle est organisée autour de la tenue des marchés hebdomadaires dans la commune, tous les dimanches au quartier n°4 de Bama, tous les mercredis au quartier n°6 de Bama et les marchés de Soungalaodaga, Desso, Séguéré, Nieguema, Tanwgoma, etc.

L'importance de la production du riz et du maraîchage confère à la commune sa vitalité commerciale. La commercialisation du riz est assurée en majeure partie par les groupements de femmes réunis en union des étuveuses et transformatrices de riz de Bama. L'activité commerciale trouve son émergence dans le transit quotidien qui s'effectue entre le village et les villes comme Bobo-Dioulasso et Sikasso (Mali).

L'activité artisanale est présente dans la zone à travers des artisans locaux comme les forgerons, les soudeurs, les menuisiers, les couturiers, les apiculteurs et la productrices de beurre de karité.

## CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES

### I. Matériels

#### 1.1. Matériels utilisés pour l'évaluation des performances du fourneau et de son acceptabilité

##### 1.1.1. Matériel d'enquête sur l'acceptabilité du fourneau

Une fiche d'enquête a été élaborée à cet effet, afin de nous permettre de récolter les données sur les performances techniques du fourneau et de son acceptabilité par la population concernée.

##### 1.1.2. Matériels du test d'ébullition de l'eau.

###### 1.1.2.1. Foyers métalliques améliorés à balles de riz

Deux prototypes de foyer à balles de riz ont été utilisés pour nos tests d'ébullition de l'eau. Chaque prototype est composé par deux foyers dont l'un est muni d'isolant thermique entre la paroi séparant les deux cylindres (interne et externe) et l'autre est sans isolant thermique (planche 1).



Foyer à balles de riz petit format (Prototype1)

Prototype1 sans isolant thermique

Prototype1 avec isolant thermique



Foyer à balles de riz grand format (prototype2)

Prototype2 sans isolant thermique

Prototype2 avec isolant thermique

#### Planche 1 : différents prototypes de foyers utilisés pour les tests d'ébullition de l'eau



### 1.1.2.2. Autres matériels utilisés

En plus des deux prototypes de foyers, autres matériels ont été utilisés (planche2) pour le test d'ébullition :

- deux marmites en fonte (grise) n°15 et n°6 avec couvercles chacune et de capacités respectives de 40 litres et 15 litres ;
- une fiche de notation;
- des balles de riz comme combustibles ;
- un thermocouple immersible pour les mesures de températures ;
- un support pour maintenir le thermocouple dans l'eau à 5 cm du fond de la marmite et au centre ;
- 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 ;
- un ruban métrique pour le positionnement du thermocouple ;
- une balance de 100 kg pour les pesées ;
- une assiette métallique de 600 g pour peser les cendres chaudes ;
- un briquet et des morceaux de carton pour l'allumage du feu ;
- un mélange d'argile et balles de riz pour servir comme isolant thermique.



Thermocouple numérique, gobelet de 1 litre et les deux prototypes de foyer portant leurs marmites respectives.



Gants de protection, chronomètre et stock de balles de riz ayant servis aux tests

### Planche 2 : Illustration du matériel du test d'ébullition de l'eau

## 1.2. Matériels utilisés pour la fabrique des briquettes

En ce qui concerne la fabrication des briquettes de balles de riz, nous nous sommes servis :

- des balles de riz, ce sont des résidus du riz après décorticage ; ils ont servi de matière première ;
- de plusieurs types de liants que nous avons testés puisque la balle de riz ne se comprime pas aisément à basses pressions ; il s'agit :
  - des liants organiques comme l'amidon (farine de maïs, farine de manioc couramment appelé « gommy »), le fumier de vache (bouse de vache), la pulpe de manioc, les tourteaux de beurre de karité ;
  - de liant inorganique comme l'argile (qui est un minéral) ;
- d'une presse manuelle, confectionnée pour résoudre le problème d'insuffisance de pression que nous avons constaté lors de nos différents essais compression manuelle de la balle de riz. La presse ne fonctionnant pas seule, d'autres accessoires y sont associés ; il s'agit notamment :
  - du moule cylindrique : nous avons testé trois moules au cours de nos expérimentations, deux métalliques et un en plastique (tube PVC) ;
  - d'un piston compresseur qui glisse à l'intérieur du moule pour assurer la compression ;
  - du tube central, qui permet de faire un trou au centre de la briquette lors de sa confection ;
  - et du 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 ;
- de l'huile végétale, ceci a servi à la fois comme lubrifiant pour faciliter les mouvements de la presse au niveau des points de rotation, et dans les mélanges pour la fabrique des briquettes afin d'accroître le pouvoir calorifique des balles de riz ;
- de l'eau pour la dissolution des liants ;
- une marmite et une spatule pour le chauffage des liants ;
- un fourneau métallique à balles de riz et un briquet pour le feu ;
- une vase graduée pour les mesures de liants et d'eau ;
- un appareil photo pour la prise des photos ;
- un ruban métrique pour les mesures sur les briquettes, les moules et la presse ;
- des planches de bois pour le séchage des briquettes ;
- un mortier et un pilon pour broyer les balles de riz et la pulpe de manioc ;
- un tamis pour tamiser la pulpe de manioc broyé et la farine de manioc.

La planche 3 ci-dessous illustre le matériel utilisé pour le pressage des balles de riz.





Presses manuelles à levier simple et à double levier ayant servis au pressage des briquettes



Les trois types de moules testés au cours des différents essais de briquetages

### Planche 3 : Illustration des matériels de pressage de balles de riz

## II. Méthodes

### 2.1. Le test d'ébullition de l'eau

Le test d'ébullition de l'eau ou WBT (Water Boiling Test) est une simulation simple et rapide des étapes habituelles suivies pour la cuisson des aliments. Ce test mis en place par le *Shell Household Energy and Health Program*, permet de comparer facilement certaines caractéristiques thermiques des fourneaux fabriqués pour des usages cuisines.

Il s'agit notamment du rendement thermique qui a trait à l'efficacité du fourneau et à la quantité réelle de combustible consommé, la puissance du feu, la durée du mijotage et le temps d'ébullition spécifique. Le WBT comporte trois phases :

- phase 1 = première phase dite de haute puissance : les tests commencent avec un fourneau à température ambiante et en utilisant une quantité prédéfinie de combustible pour porter une quantité déterminée d'eau à ébullition le plus rapidement possible à partir de l'allumage des balles de riz;

- phase2 = phase dite aussi de haute puissance : exécutée immédiatement après la première phase avec de l'eau froide pendant que le fourneau est complètement chauffé. Cette phase permet de montrer les différences de performances entre un fourneau en régime de mise en route et en exploitation (fourneau froid et chaud) ;
- phase3 = phase de basse puissance, dite de mijotage : suit immédiatement la seconde. On détermine au préalable une quantité de combustible requise pour amener une quantité d'eau mesurée tout juste au point d'ébullition et maintenir la température de l'eau entre le point d'ébullition et 100°C pendant 45 minutes.  
Cette phase permet de simuler la cuisson longue des aliments afin de déterminer la quantité de combustible (balles de riz) consommée.

## 2.2. Conditions préalables avant le début du test

Avant le démarrage du test, il faut :

- s'assurer que l'on dispose des quantités suffisantes d'eau et combustibles pour les tests. Si possible, essayer d'obtenir tout le combustible de la même source. Dans notre cas toutes les balles de riz provenaient du même stock. Le combustible doit être sec et taille homogène (surtout si c'est avec le bois de feu). L'eau ne doit pas être trouble ou boueuse. Le matériel utilisé pour activer le feu doit être préparé d'avance et inclus dans le poids du combustible.
- faire au moins un test de pratique sur chaque type de fourneau à tester afin de se familiariser avec la procédure et les caractéristiques du fourneau. Cet essai permet de donner une indication sur la quantité de combustible requise pour porter à ébullition la quantité d'eau choisie.
- déterminer à partir du test de pratique ; le point local d'ébullition de l'eau. Ce point local d'ébullition de l'eau est le point auquel la température de l'eau n'augmente pas longtemps, peu importe la quantité de chaleur fournie. Il se détermine de la manière suivante :
  - choisir une marmite convenant au type de fourneau et la remplir jusqu'au 2/3 de son volume. Porter l'eau à ébullition et s'assurer que toute l'eau boue ;
  - utiliser le même thermomètre digital immersible qui sera utilisé pour les tests, mesurer la température d'ébullition de l'eau en positionnant le thermomètre au centre de la marmite et à 5 cm du fond. A défaut du thermomètre digital immersible, nous nous sommes servis d'un thermocouple pour nos expériences.
  - les températures doivent être mesurées sur un intervalle de plus de 5 minutes et noter le maximum et le minimum observés. Le maximum et le minimum servent à calculer une température moyenne qui correspond au point d'ébullition local.

- s'assurer 'avoir suffisamment de temps pour compléter le test avant de débiter. Prévoir 1 heure et demie à 2 heures pour faire les tests de haute puissance et basse puissance. Les tests doivent être faits à l'intérieur d'une enceinte protégée du vent, mais suffisamment aérée.

### 2.3. Procédure du test d'ébullition de l'eau

Une fiche doit être établie pour noter les différentes données. Pour chaque phase du test, on procède de la façon suivante :

- peser une quantité de balles de riz jugée suffisante pour la durée du test ( $f_{ci}$ ) ;
- peser le fourneau vide devant contenir les balles de riz (K) ;
- peser la marmite vide devant servir à l'expérience (P) ;
- peser la marmite contenant vingt litres d'eau ( $P_{ci}$ ) ;
- peser la quantité de balles de riz restante à la fin du test ( $f_{cf}$ ) ;
- peser la marmite contenant l'eau à la fin du test ( $P_{cf}$ ) ;
- relever la température (T) à chaque cinq minutes, jusqu'à atteindre la température limite correspondant au point d'ébullition;
- tracer la courbe  $T = f(t)$  ;
- relever les températures initiales ( $T_{ci}$ ) et finale de l'eau ( $T_{cf}$ ) ;
- relever le temps initial ( $t_{ci}$ ) et le temps final ( $t_{cf}$ ) du test ;
- peser les cendres après à la fin du test.

### 2.4. Conduite du test d'ébullition de l'eau

Dans le but d'avoir des données fiables sur l'efficacité du fourneau à balles de riz, nous avons effectué six tests d'ébullition de l'eau sur chaque type de fourneau ; avec trois phases pour chaque test. Ces six tests se composent de trois tests d'ébullition sur le fourneau sans plaquettes d'argile comme isolant thermique et trois autres tests sur le fourneau avec plaquettes d'argile comme isolant thermique placé entre le cylindre interne et externe du fourneau. Le déroulement de chaque test s'est fait en suivant la méthodologie décrite par *Shell Household Energy and Health Program* dans WBT (water boiling test) version 3.0 de janvier 2007. Elle est la suivante :

- **Phase 1 : haute puissance, démarrage avec fourneau à froid**
  - Préparer à l'avance le chronomètre, mais ne pas le déclencher avant que le feu n'ait pris ;
  - Placer la marmite sur une balance, prendre le poids vide puis ajouter de l'eau jusqu'au 2/3 de son volume et noter la quantité (en kg) d'eau mise dans la marmite et le poids de l'ensemble. Dans notre étude, nous avons pris 20 litres d'eau pour la marmite n°15 et 10 litres d'eau pour la marmite n°6 et ce dans le souci de faciliter les calculs ;

- Placer le thermocouple sur le support et ajuster la hauteur pour que la température de l'eau soit mesurée au centre, à 5 cm du fond de la marmite. Noter la température initiale de l'eau et confirmer qu'elle ne varie pas trop de la température ambiante ;
- Utiliser un fourneau froid et allumer le feu de manière reproductible. Noter le matériel de départ utilisé pour allumer le feu, nous nous sommes servi des morceaux de carton et un briquet pour l'allumage ;
- Noter l'heure du début dès que le feu prend,; et tout le long de la phase haute puissance on contrôle le feu avec la méthode locale commune jusqu'à ébullition de l'eau sans gaspiller le combustible. Cette méthode commune dans notre cas consiste à introduire un morceau de fer dans les trous du cylindre de combustion du fourneau et à secouer de sorte à ce que les cendres de balles de riz tombent dans le cendrier ;
- Faire rapidement les étapes suivantes dès que l'eau atteint l'ébullition. Pour cela, il est nécessaire de :
  - a. Noter le temps auquel l'eau a atteint l'ébullition, noter aussi cette température ;
  - b. Retirer toutes les cendres du fourneau et peser ;
  - c. Peser la quantité restante de balles de riz (combustible);
  - d. Peser la marmite contenant l'eau chaude
  - e. Vider l'eau débiter immédiatement la deuxième phase pendant que le fourneau est encore chaud.

➤ **Phase 2 : haute puissance, démarrage avec fourneau chaud**

- Remettre le chronomètre à zéro et ne pas le déclencher tant le feu n'est pas allumé ;
- Remettre dans la marmite la même quantité d'eau que la phase 1, soit respectivement 20 litres et 10 litres dans les marmites n°15 et n°6 en n'oubliant pas de noter la température initiale de l'eau ;
- Allumer le feu de la même manière qu'à la première phase et utiliser la quantité pré pesée de balles de riz
- Noter l'heure de début et on porte rapidement à ébullition l'eau sans gaspiller les balles de riz (combustible)
- Noter le temps et la température auxquels l'eau a atteint l'ébullition
- Répéter rapidement les mêmes étapes citées dans la phase une dès que l'eau arrive à ébullition;
- Remettre les balles de riz dans le fourneau et rallumer, puis commencer immédiatement la troisième phase du test.

### ➤ Phase 3 : basse puissance ou phase de mijotage

- Cette partie du test est conçue pour tester l'habileté du fourneau de passer à une phase de basse puissance suite à une phase de haute puissance, pour bouillir l'eau pendant 45 minutes ; en utilisant une quantité minimale de balles de riz. Pour cela, il faut :
  - Remettre le chronomètre à zéro et le déclencher quand l'eau a atteint le point d'ébullition locale ;
  - Remettre le thermocouple dans le support et placer dans l'eau. Ajuster le feu de sorte à garder l'eau à une température comprise entre le point d'ébullition locale et 100°C et si possible à une température de 3°C en dessous du point d'ébullition locale. Si la température de l'eau descend en dessous de 6°C du point d'ébullition locale, le test est invalide ;
  - Noter la température de l'eau tous les 5 minutes jusqu'à 45 minutes ;
  - Faire rapidement les étapes suivantes après les 45 minutes :
    - noter le temps d'arrêt ;
    - retirer toutes les balles de riz non brûlées du fourneau et les cendres, puis peser les cendres résultantes et les balles de riz restantes ;
    - noter la température finale de l'eau
    - peser la marmite contenant l'eau chaude.

## 2.5. Méthode de détermination des différentes variables

Pendant le test à haute puissance, on peut déterminer les quantités de balles de riz consommée, d'eau vaporisée, d'eau restante, la durée du test, l'efficacité thermique, le taux brûlant, la consommation spécifique de balles de riz et la puissance du feu.

### 2.5.1. Quantité de balles de riz consommée

La quantité de balles de riz consommée est donnée par la différence des masses de balles de riz pesé avant et après le test. Elle correspond à la masse de balles de riz qui a été utilisée pour chauffer l'eau et la maintenir en ébullition.

$$f_{cm} = f_{ci} - f_{cf} \quad (1)$$

Avec :

$f_{cm}$  : poids de balles de riz consommé

$f_{ci}$  : poids initial de balles de riz

$f_{cf}$  : poids final de balles de riz

### 2.5.2. Quantité d'eau vaporisée

Elle correspond à la quantité d'eau évaporée pendant le test et s'écrit comme suit :

$$W_{cv} = P_{ci} - P_{cf} \quad (2)$$

Avec :

$W_{cv}$  : quantité d'eau vaporisée

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

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

### 2.5.3. Quantité d'eau restant à la fin du test

Elle est obtenue en soustrayant du poids final de la marmite d'eau ( $P_{cf}$ ) le poids de la marmite ( $P$ ), soit :

$$W_{cr} = P_{cf} - P \quad (3)$$

Avec :

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

$P$  : poids de la marmite vide

### 2.5.4. Durée du test

C'est le temps nécessaire pour réaliser le test, autrement dit la différence des temps final ( $t_{cf}$ ) et initial ( $t_{ci}$ ).

$$\Delta t = t_{cf} - t_{ci} \quad (4)$$

### 2.5.5. Rendement thermique

Le rendement thermique (ou efficacité thermique) est défini comme étant le rapport entre la quantité d'énergie absorbée par la marmite et la quantité d'énergie produite par les balles de riz. Il s'exprime en pourcentage.

Le rendement thermique est donc déterminé par le pourcentage de chaleur utilisée (PCU) pendant la phase d'ébullition. On le calcule de la manière suivante :

$$PCU = \frac{4,186 \times (P_{ci} - P) \times (T_{cf} - T_{ci}) + 2260 \times W_{cv}}{f_{cm} \times PC} \quad (5)$$

Avec

$T_{ci}$  : température initiale de l'eau

$T_{cf}$  : température finale de l'eau

$f_{cm}$  : équivalent de balles de riz consommées

$PC$  : pouvoir calorifique des balles de riz

Notons que le pouvoir calorifique d'un combustible est la quantité d'énergie libérée pour chaque unité de masse brûlée.

On attribue couramment à la balle de riz un pouvoir calorifique de 15.3MJ/kg (OTA, 1980), ou de 2891 à 3990 kcal/kg voir même 3000 à 4000 kcal/kg (BELLAMY et al, 1984). Cependant, compte tenu d'une humidité relative (hygrométrie) assez faible en zone subsaharienne et de la période de l'année dans laquelle les tests se sont déroulés (saison sèche, plus précisément en Décembre) ; nous considérerons dans nos calculs la valeur supérieure du pouvoir calorifique (4000 kcal/kg).

Dans l'expression (5), le travail effectué en chauffant l'eau est déterminé en ajoutant deux quantités :

- le produit de la masse d'eau contenue dans la marmite ( $P_{ci} - P$ ), la chaleur spécifique de l'eau (4,186 J/g °C) et la variation de la température de l'eau ( $T_{cf} - T_{ci}$ ) ;
- le produit de la quantité d'eau qui s'est évaporée ( $W_{cv}$ ) et de la chaleur latente d'évaporation de l'eau (2260 J/g)

Le dénominateur correspond au produit de l'équivalent de balles de riz consommé et de son pouvoir calorifique.

**Remarque :** Etant donné que dans le calcul du rendement thermique, on doit tenir compte de l'énergie absorbée par la marmite tout au long du test, alors dans la formule (5) il devrait figuré, au numérateur, un terme supplémentaire indiquant à la fois la masse de la marmite et sa chaleur spécifique. Finalement la formule complète du rendement thermique s'écrit :

$$PCU = \frac{4,186 \times (P_{ci} - P) \times (T_{cf} - T_{ci}) + P \times C_{pv} \times (T_{cf} - T_{ci}) + 2260 \times W_{cv}}{f_{cm} \times PC} \quad (6)$$

Où  $C_{pv}$  désigne la chaleur spécifique de la marmite. Nous avons utilisé une marmite en fonte grise ( $C_{pv} = 0,544 \text{ J/g } ^\circ\text{C}$ ).

### 2.5.6. Taux brûlant

Le taux brûlant mesure le taux de consommation de balles de riz par unité de temps ; tout en portant l'eau à l'ébullition (VITA, 1985). Il est obtenu en divisant l'équivalent de balles de riz consommé par la durée du test :

$$r_{cb} = \frac{f_{cm}}{t_{cf} - t_{ci}} \quad (7)$$

### 2.5.7. Consommation spécifique de balles de riz

Elle détermine la quantité de balles de riz exigée par le fourneau pour porter un litre d'eau à ébullition. Elle est donnée par l'expression suivante :

$$SC_C = \frac{f_{cm}}{P_{cf} - P} \quad (8)$$

### 2.5.8. Consommation spécifique de balles de riz corrigée par la température

Elle facilite la comparaison du fourneau à balles de riz aux fourneaux à bois et à charbon. Une correction est effectuée afin de « normaliser » la variation de température observée dans les conditions d'essai par rapport à une variation de température « standard » de 75°C (de 25 à 100°C). Elle s'exprime comme suit :

$$SC_T = \frac{f_{cm} \times 75}{(P_{cf} - P) \times (T_{cf} - T_{ci})} \quad (9)$$

### 2.5.9. Puissance du feu

Elle indique la puissance moyenne du feu (en kW) pendant la phase à haute puissance ou à basse puissance. Elle est donnée par la formule :

$$F_{pc} = \frac{f_{cm} \times PC}{60 (t_{cf} - t_{ci})} \quad (10)$$

Avec :

$F_{pc}$  : puissance du feu

$f_{cm}$  : poids de balles de riz consommé

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

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

PC : pouvoir calorifique des balles de riz

### 2.5.10. Temps d'ébullition spécifique

Le temps d'ébullition spécifique (TES) mesure le temps nécessaire pour amener un litre d'eau de la température ambiante à 100 °C. Cette variable caractérise la vitesse de chauffage du fourneau. Elle est donnée par l'expression suivante :

$$TES = \frac{\Delta t_{100} \times 100}{(P_{ci} - P) \times (100 - T_{ci})} \quad (11)$$

Avec  $\Delta t_{100}$  : durée nécessaire pour porter l'eau à l'ébullition.



## 2.6. Procédure de collecte des données

La collecte de données a consisté à :

- ✓ d'abord une compilation de la documentation existante (statistiques des secteurs agricoles et agro-industriels, rapports et notes auprès des Directions de l'Environnement, de l'agriculture, de SONABEL, l'IRSAT-Bobo, l'INERA-Bobo, l'INSD-Bobo, SOFITEXE) ;
- ✓ ensuite des interviews auprès des responsables des structures concernées pour compléter la documentation et collecter des données sur le terrain (sur les procédés de séchage, les caractéristiques de la presse, les essais de compression des balles de riz et des tests de combustion)
- ✓ et enfin une enquête a été faite auprès de 400 individus à Bama sur l'acceptabilité du fourneau à balles de riz et de ces performances techniques. Cette enquête s'est faite sous forme d'entretien individuel ou collectif avec 50 femmes du centre d'étuvage de Bama et dans 50 ménages de la dite commune choisis de façon aléatoire.

La population cible de cette étude est constituée principalement par les femmes étuveuses de riz de Banzon (430 membres répartis en 14 groupements) et celles de Bama (500 membres) qui en sont les premières bénéficiaires de ladite technologie.

## 2.7. Processus de fabrication des briquettes à base des balles de riz

### ➤ Approvisionnement et préparation des résidus

Les balles de riz sont collectées par des sacs, depuis les machines de décorticage et transportées jusqu'au site d'expérimentation. Une fois arrivée sur le site, les balles de riz sont débarrassées de toute impureté (cailloux, morceaux de bois, plastique, etc.).

### ➤ Broyage des résidus

Des le début de nos expériences, nous avons essayé de broyer les balles de riz à l'aide d'un mortier et d'un pilon ; mais nous avons trouvé que l'activité était périlleuse et ne donne pas des résultats satisfaisants quant à la granulométrie des balles de riz. Nous avons ainsi jugé nécessaire de broyer les balles de riz dans un moulin ; néanmoins, la pulpe de manioc a été broyée par le mortier tout long de nos essais.

### ➤ Séchage des résidus

A part le broyage par le mortier qui a nécessité un séchage solaire de 45 minutes des balles de riz ; les balles de riz n'ont pas subi de séchage car le pourcentage d'humidité était de 5,07 % (résultats de laboratoire du Département de Technologies Alimentaires de Bobo).

### ➤ Préparation du liant

Les liants organiques telles la farine de manioc, la farine de maïs et la farine de pulpe de manioc ont été d'abord diluées dans de l'eau froid ( quantité variant entre 500ml et 2000ml), puis chauffées pendant un intervalle de temps de 5 à 10 minutes en remuant avec la spatule de sorte à avoir une pate gélatineuse. Nous avons également dilué à l'eau froide un mélange de farine de maïs et de manioc de proportion respectives  $\frac{3}{4}$  et  $\frac{1}{4}$ , puis chauffé.

La bouse de vache est ré-humidifiée et délayée de sorte à avoir un mélange homogène lorsqu'elle est sèche et utilisée directement si celle-ci est toujours fraîche.

Les tourteaux d'amendes de karité sont mélangés avec de la farine de manioc, puis chauffés pendant 5 minutes. (6 / 7 ; 1/ 7). En chauffant les tourteaux, le beurre restant dans les résidus va fondre et servir à remplacer l'huile jadis utilisée.

Quant-à l'argile, elle est mélangée à de l'eau puis malaxée de sorte à avoir une pate collante.

### ➤ Mélange des agrégats

Une fois les résidus et le liant préparés (tableau 11), l'ensemble est mis dans un récipient et on procède au mélange. Le processus continue jusqu'à ce qu'on ait un mélange homogène. Le temps du mélange dépend des quantités de balles broyées, de balles entières, et du liant. Il varie entre 10 à 15 minutes.

**Tableau 11 : Composition des différentes recettes testées.**

Composition Recettes	Balles de riz broyées (ml)	Balles de riz entières (ml)	Farine de pulpe de manioc (ml)	Farine de maïs (ml)	Gummy (ml)	Argile (ml)	Tourteau de karité (non cuit) (ml)	Tourteau de karité (cuit) (ml)	Eau (ml)	Huile (ml)
Recette 1	6750	-	-	1000	-	-	-	-	1900	200
Recette 2	6750	-	-	800	200	-	-	-	2000	200
Recette 3	6750	-	1000	-	-	-	-	-	1800	200
Recette 4	3375	3375	-	1000	-	-	-	-	1000	200
Recette 5	-	6750	-	1500	-	-	-	-	2000	200
Recette 6	3375	3375	-	800	200	-	-	-	2000	200
Recette 7	3375	3375	1000	-	-	-	-	-	1000	200
Recette 8	-	6750	-	1000	-	-	-	-	1800	200
Recette 9	2250	2250	800	-	-	-	-	-	1000	0
Recette 10	6750	-	-	-	1000	-	-	-	2000	200
Recette 11	-	6750	-	-	1000	-	-	-	1000	100
Recette 12	-	6750	-	500	-	-	-	-	950	100
Recette 13	3375	3375	-	-	-	-	1500	-	500	-
Recette 14	3375	3375	-	-	-	-	-	1500	500	-
Recette 15	3375	3375	-	-	-	-	1500	-	750	-

Suite du tableau 10

Recette 16	3375	3375	-	-	200	-	800	-	1000	-
Recette 17	3375	3375	-	200	-	-	-	800	1000	-
Recette 18	6750	-	-	-	200	-	-	800	1000	-
Recette 19	6750	-	-	200	-	-	-	800	1000	-
Recette 20	-	6750	-	200	-	-	-	800	100	-
Recette 21	-	6750	-	-	200	-	-	800	1000	-
Recette 22	4500	-	-	-	-	1000	-	-	700	-
Recette 23	2250	2250	-	-	-	1000	-	-	750	-

### ➤ Remplissage du moule

Le mélange homogène ainsi obtenu est mis dans le moule, afin d'être presser ; on s'assure qu'il n'y a pas de vide dans le moule.

### ➤ Pressage ou compactage

Après avoir rempli le moule, celui-ci est déposé sur la presse à briquettes et l'opérateur exerce une pression sur le moule en poussant le levier secondaire vers le bas. Cette action entraîne le levier principal, qui exerce une force (équivalant au double de celle développée sur le levier secondaire) sur le piston compresseur et le résultat de tout cela est la compression du mélange à l'intérieur du moule (planche 4).

### ➤ Démoulage

Lorsque le pressage est terminé, l'opérateur retire le moule toujours minu du piston compresseur de la presse et procède de la manière suivante :

- ✓ il retire d'abord le piston compresseur qu'il dépose de façon verticale,
- ✓ puis il dépose le moule sur le piston compresseur et fait glisser le cylindre du moule du haut vers le bas du piston compresseur,
- ✓ il retire ensuite la briquette toujours menue de la barre verticale qu'il dépose sur la planche servant comme séchoir,
- ✓ et enfin la barre verticale est retirée de la briquette.

### ➤ Séchage des briquettes

Les briquettes, une fois déposées sur les planches sont exposées au soleil pour le séchage. Nous avons préconisé le séchage solaire puisqu'il ne coûte absolument rien ; il suffit seulement de fournir un effort physique pour déplacer les planches du lieu de confection vers la terrasse de séchage.

La durée du séchage dépend de la hauteur des briquettes, du type de résidus utilisé (balles de riz broyées ou non broyées et le liant) et de l'ensoleillement donc de la période de l'année où se déroulent les activités.



**Planche 4 : Résumé du déroulement de l'activité de briquetage.**

### **2.8. Test de résistance des briquettes face à l'humidité**

La méthodologie adoptée pour ce test est celle du CETE- APAVE (Centre d'Etudes Thermiques et Electriques de l'APAVE) et le LBTP (Laboratoire du Bâtiment et de Travaux Publics) (1986). Le test consiste à immerger totalement une briquette dans un seau rempli d'eau pendant 15 secondes, elle est alors sortie et posée sur une surface plane à l'air libre où on la laisse évoluer physiquement jusqu'à ce qu'elle acquière sa forme définitive de séchage. Lorsque la briquette est sèche, on compare qualitativement cette forme avec sa forme initiale.

### **2.9. Tests de résistance des briquettes aux chocs**

Pour connaître la résistance de nos briquettes aux chocs ; deux tests ont été effectués.

- ✓ Le premier 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 deuxième test a consisté à mélanger plusieurs types de briquettes dans un carton que l'on transporte à moto sur une distance de 65 km (Bobo – Banzon), à la vitesse moyenne de 60 km/h et sur route en mauvais état. Arrivée à destination on note les observations suivantes : le nombre de briquettes restées intactes, celles brisées et la friabilité des briquettes ; que l'on compare à leurs états initiaux.

### 2.10. Test d'aptitude des briquettes à la combustion

Pour ce qui concerne la combustion des briquettes, plusieurs essais ont été réalisés.

Ces essais sont consignés dans le tableau 12 :

**Tableau 12. Résumé des essais de combustion réalisés sur les briquettes**

Essais	Résultats
1 <sup>er</sup> : Allumage d'une seule briquette avec du papier.	<b>Négatif</b> , la briquette a noircie, mais ne s'est jamais allumée.
2 <sup>e</sup> : Allumage d'une seule briquette avec des écorces de riz.	<b>Négatif</b> , la briquette a noircie, mais ne s'est jamais allumée.
3 <sup>e</sup> : Allumage d'une seule briquette avec des feuilles de maïs.	<b>Négatif</b> , la briquette a noircie, mais ne s'est jamais allumée.
4 <sup>e</sup> : Préparation d'un feu avec du bois et des feuilles de maïs. Lorsque le feu est allumé, déposer 2-3 briquettes dans le feu.	<b>Positif</b> , les briquettes se sont très bien allumées et la combustion s'est maintenue tant qu'il y avait des briquettes à brûler.
5 <sup>e</sup> : Préparation d'un feu avec du bois et des feuilles de maïs. Lorsque le feu est allumé, déposer 1 seule briquette dans le feu.	<b>Négatif</b> , le feu ne permet pas d'allumer une seule briquette. La briquette réussit difficilement à s'allumer, ou ne s'allume pas du tout, et la combustion est difficile à maintenir, même pour un court moment.
6 <sup>e</sup> : Installation d'un feu avec 3 briquettes déposées sur un « nid » de feuilles de maïs et allumage des feuilles.	<b>Positif</b> , les briquettes ont pu s'allumer, mais beaucoup de feuilles ont dues être utilisées.

### 2.11. Analyses statistiques

Dans cette étude, seules les données concernant les deux prototypes de foyers améliorés à balles de riz ont été incluses dans les analyses statistiques. Ces données ont été saisies à l'aide du logiciel Excel 2007 puis le traitement statistique a été réalisé avec le logiciel STATISTICA. 95. Pour connaître l'effet probable de l'utilisation de l'isolant thermique sur chaque prototype de foyer, une analyse de variance (ANOVA) est effectuée. Une comparaison entre les données des paramètres caractéristiques de chaque foyer est conduit afin de mieux cerner l'effet de l'isolant thermique sur le rendement thermique de chaque prototype de foyer. Le test de Student Newman-Keuls (SNK) à 5% de seuil de confiance a été utilisé pour tester les différences significatives entre les moyennes. Les différences sont significatives lorsque  $p < 0,05$ . Les calculs des écart- types, moyennes et la réalisation des graphiques ont été effectués avec Excel 2007.

## CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION

### I. Performances du fourneau du foyer à balles de riz

#### 1.1. Enquête sur les performances du foyer et son acceptabilité

##### 1.1.1. Performances du foyer

Les résultats de l'enquête réalisée à Bama auprès des utilisatrices du four à écorces de riz sont consignés dans le tableau 13.

**Tableau 13 : Résumé des résultats d'enquête sur les performances du four à écorces de riz**

forces	Faiblesses	Modifications souhaitées par les utilisateurs
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Réduction de la charge des femmes</li> <li>✓ Économie d'argent</li> <li>✓ Combustible gratuit</li> <li>✓ Cuisson rapide</li> <li>✓ Protection de l'environnement (lutte contre la déforestation)</li> <li>✓ Élimine les balles de riz qui jadis étaient encombrants</li> <li>✓ Création d'harmonie entre les femmes et le service forestier</li> <li>✓ Valorisation énergétique des résidus agricoles</li> <li>✓ Amélioration de la qualité du riz étuvé</li> <li>✓ Réduction des coûts de production de l'étuvage du riz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Usage difficile en temps de vent (fuite des flammes, dégagement excessif de chaleur, cuisson non uniforme des aliments)</li> <li>✓ Dégagement de fumé</li> <li>✓ Combustion excessive en temps venteux</li> <li>✓ Occupation entière de la ménagère (car devant secouer à chaque 3minutes pour faire descendre les cendres et activer les flammes)</li> <li>✓ Colmatage des cendres aux parois du cylindre de combustion et de la grille</li> <li>✓ Difficultés de descente des cendres et obstruction de la combustion</li> <li>✓ Descente soudaine des braises et des balles non brûlées</li> <li>✓ Destruction rapide du cylindre central (provoquée par le contact permanent avec le feu et la qualité du métal utilisé dans la fabrication)</li> <li>✓ Salissant (combustion dégageant trop de cendres, remonté des cendres dans les aliments à moindre vent)</li> <li>✓ Inaccessible à tous (prix variant entre 12500f CFA pour le petit formant et 30000f CFA pour le grand formant)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Réduire l'effet du vent sur le foyer afin de le rendre utilisable en toute en toute heure de la journée</li> <li>✓ Réduire le dégagement de fumée</li> <li>✓ Agir sur la chute des braises et des cendres</li> <li>✓ Améliorer la qualité du métal du cylindre central</li> <li>✓ Rendre le four accessible à tous</li> <li>✓ Sensibiliser les femmes sur l'utilisation efficace du four</li> <li>✓ Concevoir un model multi marmites (four pouvant porter différente taille de marmites)</li> </ul>





Photo n°1 : Foyer à balles de riz conçue



Photo n°2 : Foyer multifonctionnel (fonctionnant avec marmites et fûts)



Photo n°3 : Modification de la hauteur du cylindre externe et de ses supports de maintien



Photo n°4 : Modification de la hauteur du cylindre externe et du réservoir à balles de riz.



Photo n°5 : Modification de support de maintien et porte- marmite



Photo n°6 : Modification des supports de maintien



Photo n°7 : Fuite excessive de flamme



Photo n°8 : Réchauffement excessif du cylindre externe et combustion des balles de riz dans le réservoir



Photo n°9 : Dégagement de fumée blanche et épaisse

### Planche 5 : Modifications apportées au foyer et ses faiblesses

Depuis 2008, le foyer à balles de riz (Planche 5) a subi des modifications notables par les artisans locaux afin de renforcer sa résistance et ses performances. Ces modifications ont beaucoup plus concerné les supports de maintien du cylindre externe avec le réservoir de balles (photos n° 4 ; 5 et 8 de la planche 5), la hauteur de ces cylindres (Planche 5 : photos n°2 ; 3 et 4) et la porte marmite (Planche 5 : photos n°2 ; 3 et 5).

L'activité d'étuvage du riz avec le four est beaucoup plus propice en temps calme et de vent relativement faible. Lors de nos enquêtes, il s'avère que ce temps se situe entre 18 h et 5 h 30 minutes, donc dans la nuit.

### **1.1.2. Résultats de l'acceptabilité du four à écorces de riz**

L'enquête réalisée auprès de 50 familles à Bama et au près des 50 femmes du centre d'étuvage nous donne les résultats suivants :

- ✓ 82 % de cette population disposent d'un foyer et utilisent ;
- ✓ 100 % de cette population connaissent le foyer et l'apprécient positivement (économie de combustible, de temps et d'argent) ;
- ✓ 18 % de la population ne disposent pas du foyer ;
- ✓ 90 % de la population trouvent que le prix du foyer est relativement élevé ;
- ✓ Et seulement 10 % trouvent que le prix du foyer est abordable.

## **1.2. Résultats des tests d'ébullition de l'eau**

Nous présentons dans cette partie les résultats de mesures réalisées à partir des différents tests d'ébullition de l'eau. Nous avons d'abord utilisé les foyers (petit format et grand format) sans placer l'isolant thermique (plaquette faite d'un mélange d'argile et de balles de riz) entre le cylindre interne et externe ; puis les foyers avec plaquette d'argile entre cylindre interne et externe.

### **1.2.1. Première phase du test dite phase haute puissance : démarrage à froid**

#### **1.2.1.1. Petit foyer sans plaquette d'argile**

Nous avons effectué trois tests avec le prototype1 en l'absence d'isolant thermique entre les deux cylindres (externe et interne). Les différentes variables mesurées sont représentées dans le tableau 1 de l'annexe 3. A partir des formules décrites dans la partie **méthode de détermination des différentes variables**, nous avons calculé les paramètres qui caractérisent le prototype1 (foyer petit format) en absence d'isolant thermique. Les résultats sont consignés dans le tableau 14.



**Tableau 14: Paramètres caractérisant le foyer petit format en l'absence d'isolant thermique**

Grandeurs	$f_{cm}$ (kg)	$W_{cv}$ (l)	$W_{cr}$ (l)	$\Delta t$ (mn)	$\Delta t_{100}$ (mn)	$r_{cb}$ (kg/mn)	$SC_c$ (kg/l)	$SC_T$ (kg/l)	$F_{pc}$ (kw)	PCU (%)	TES (mn/l)
Test n°1	1,4	0,2	10,4	41	34	0,034	0,135	0,145	2,28	17,02	4,58
Test n°2	3,2	0,2	10,4	45	32	0,071	0,308	0,304	4,74	8,05	3,9
Test n°3	3,2	0,4	10,2	50	43	0,064	0,314	0,343	4,27	8,29	5,71
Moyenne	2,6	0,267	10,3	45,33	36,33	0,056	0,25	0,264	3,76	11,12	4,73
Ecart-type	1,04	0,12	0,12	4,51	5,86	0,02	0,1	0,1	1,31	5,11	0,91

Avec :

$f_{cm}$  = Quantité de balles de riz consommée

$w_{cv}$  = Quantité d'eau vaporisée

$w_{cr}$  = Quantité d'eau restante à la fin du test

$\Delta t$  = Durée du test

$\Delta t_{100}$  = Durée nécessaire pour porter l'eau à l'ébullition

$r_{cb}$  = Taux brûlant

$SC_c$  = Consommation spécifique de balles de riz

$SC_T$  = Consommation spécifique de balles de riz corrigée par la température

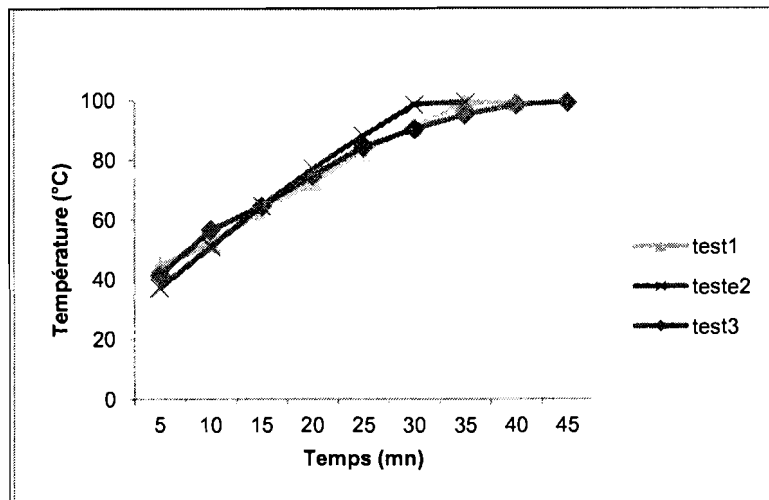
$F_{CP}$  = Puissance du feu

PCU = Rendement thermique

TES = Temps d'ébullition spécifique

La quantité de balles de riz (écorces de riz) consommée en 45 minutes 33 secondes (durée moyenne du test) est de 3200 g, correspondant à un taux brûlant de 56 g / mn. La consommation spécifique corrigée de balles par la température est de 264 g / l, pour une puissance du feu s'élevant à 3,761 kW. Le rendement thermique moyen pour le four en l'absence d'isolant thermique est de 11,12 %. Le temps d'ébullition spécifique est de 5 minutes 13 secondes par litre en moyenne.

La figure 5 illustre les courbes traduisant l'évolution de la température de l'eau au cours de la première phase (phase haute puissance en démarrant avec un foyer froid) du test d'ébullition de l'eau, pour le prototype1 en l'absence de plaquette d'argile (isolant thermique). La durée de mijotage, déterminée à partir du moment où l'eau a atteint la température d'ébullition (100°C) jusqu'au moment où la température redescend à 95°C est, en moyenne 38 minutes pour le prototype 1 (four petit format) démuné d'isolant thermique.



**Figure 5: Courbes d'évolution de la température de l'eau en fonction du temps, pour le prototype1 sans isolant (phase1).**

#### 1.2.1.2. Petit foyer avec plaquette d'argile

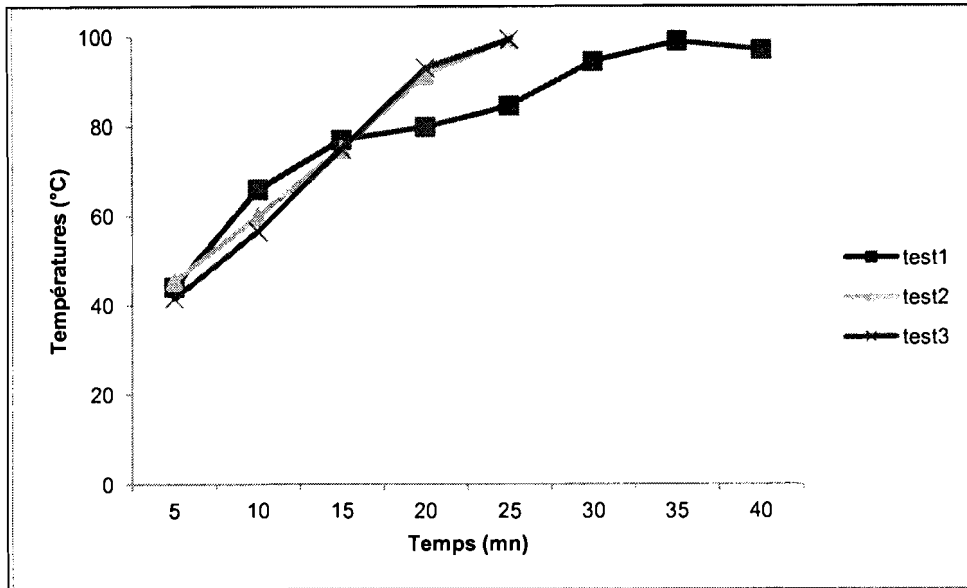
Dans cette rubrique ; le vide se trouvant entre le cylindre interne et externe du prototype1 a été fermé jusqu'aux trous d'alimentation en air supérieur avec un isolant thermique fait d'un mélange d'argile et de balles. Les variables mesurées sont représentées par le tableau 2 de l'annexe 3.

Les grandeurs caractérisant le prototype1 avec l'isolant thermique sont consignées dans le tableau 15.

**Tableau 1 5: Paramètres caractérisant le foyer petit format avec isolant thermique (plaquette d'argile) pour la première phase.**

Grandeurs	$f_{cm}$ (kg)	$W_{cv}$ (l)	$W_{cr}$ (l)	$\Delta t$ (mn)	$\Delta t_{100}$ (mn)	$r_{cb}$ (kg/mn)	$SC_c$ (kg/l)	$SC_T$ (kg/l)	$F_{pc}$ (kw)	PCU (%)	TES (mn/l)
<b>Test n°1</b>	2,2	0,6	10	37	34	0,059	0,22	0,258	3,96	12,76	4,802
<b>Test n°2</b>	1,6	0,4	10,2	25	24	0,064	0,157	0,169	4,27	16,79	3,221
<b>Test n°3</b>	3,4	0,4	10,2	27	22	0,126	0,333	0,345	8,4	8,14	2,801
<b>Moyenne</b>	2,4	0,47	10,1	29,67	26,67	0,083	0,237	0,257	5,54	12,56	3,608
<b>Ecart-type</b>	0,92	0,12	0,12	6,43	6,43	0,04	0,09	0,09	2,48	4,33	1,06

Les courbes d'évolution de la température de l'eau au cours cette phase du test pour le prototype1 muni de plaquette d'argile comme isolant thermique, sont représentées dans la figure 6.



**Figure 6: Courbes d'évolution de la température en fonction du temps pour le prototype1 muni d'isolant thermique (phase 1).**

Dans le cas où le prototype 1 est muni de l'isolant thermique, nous obtenons une consommation moyenne de balles de riz (écorces de riz) de 2400 g en 30 minutes 07secondes, soit un taux brûlant de 83 g/mn. La consommation spécifique de balles de riz rapportée à la température est de 257 g/l, avec une puissance du feu de 5,542 kW.

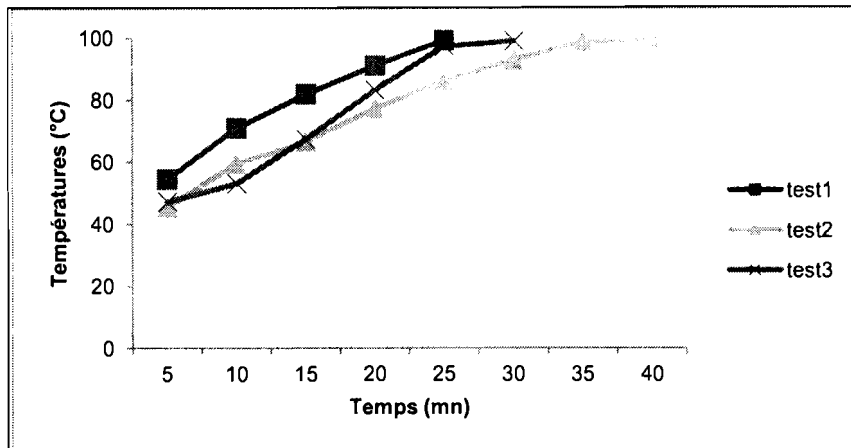
Le rendement thermique du four atteint 12,56 %, pour un temps d'ébullition spécifique de 4 minutes 01 seconde par litre en moyenne, pour un démarrage à froid. La durée moyenne de mijotage est de 27 minutes 33 secondes pour le prototype 1 muni d'isolant thermique.

### 1.2.1.3. Grand foyer sans plaquette d'argile

Comme le prototype1, il a été réalisé sur le prototype2 (foyer grand format) en l'absence d'isolant, trois tests d'ébullition de l'eau ; dont les résultats de la première phase sont représentés par le tableau 16 et la figure 7.

**Tableau 16: Paramètres caractérisant le prototype2 sans isolant thermique (phase1)**

Grandeurs	$f_{cm}$ (kg)	$W_{cv}$ (l)	$W_{cr}$ (l)	$\Delta t$ (mn)	$\Delta t_{100}$ (mn)	$r_{cb}$ (kg/mn)	$SC_c$ (kg/l)	$SC_T$ (kg/l)	$F_{pc}$ (kw)	PCU (%)	TES (mn/l)
Test n°1	3,1	2,8	19	36	23	0,086	0,165	0,175	5,74	27,35	1,493
Test n°2	4,8	1	21	39	35	0,123	0,233	0,255	8,21	11,88	2,328
Test n°3	2,8	0,4	21	30	26	0,093	0,132	0,129	6,22	14,9	1,553
Moyenne	3,57	1,4	20	35	28	0,101	0,177	0,186	6,72	18,04	1,792
Ecart-type	1,08	1,25	1,25	4,58	6,24	0,02	0,05	0,06	1,31	8,2	0,47



**Figure 7 : Courbes d'évolution de la température en fonction du temps pour le prototype2 sans isolant thermique (phase1).**

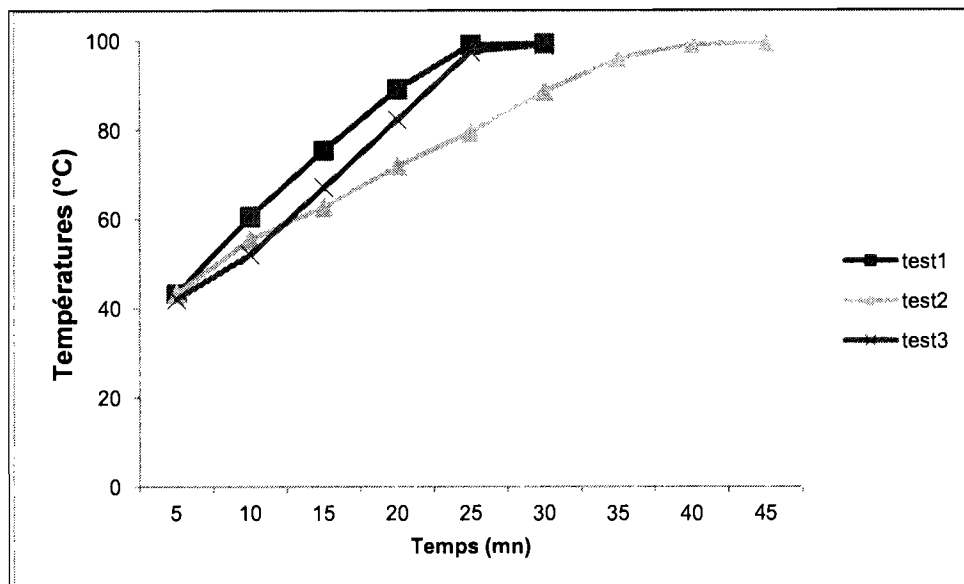
En ce qui concerne le prototype 2 (foyer grand format) dépourvu d'isolant thermique, la consommation de balles de riz enregistrée est de 3570 g en 35 minutes avec un taux brûlant de 101 g par minute. Sa consommation spécifique de balle de riz corrigée par la température est de 186 g / l. Le taux brûlant du prototype 2 démunie d'isolant thermique est de l'ordre de 6,723 kW. Le rendement thermique du foyer est de 18,04%, pour un temps d'ébullition spécifique de 2 minutes 19 secondes par litre. Le temps de mijotage moyen est 28 minutes 33 secondes pour le prototype 2 dépourvu d'isolant thermique.

#### 1.2.1.4. Grand foyer avec plaquette d'argile

Les résultats des mesures et tests d'ébullition réalisés sur le prototype 2 en plaçant la plaquette d'argile entre les cylindres interne et externe consignés dans le tableau 17 et illustré par la figure 8 ci-après :

**Tableau 17: Paramètres caractérisant le prototype2 avec isolant thermique**

Grandeurs	$f_{cm}(kg)$	$W_{cv}$ (l)	$W_{cr}$ (l)	$\Delta t$ (mn)	$\Delta t_{100}$ (mn)	$r_{cb}$ (kg/mn)	$SC_c$ (kg/l)	$SC_T$ (kg/l)	$F_{pc}$ (kw)	PCU (%)	TES (mn/l)
<b>Test n°1</b>	4,4	0,4	21,2	28	26	0,157	0,208	0,217	10,5	11,36	1,66
<b>Test n°2</b>	6,8	1,1	20,5	46	40	0,148	0,332	0,365	9,86	8,557	2,583
<b>Test n°3</b>	5,5	0,6	21	30	26	0,183	0,262	0,288	12,2	9,259	1,717
<b>Moyenne</b>	5,57	0,7	20,9	34,67	30,67	0,16	0,27	0,29	10,9	9,73	1,99
<b>Ecart-type</b>	1,2	0,36	0,36	9,87	8,08	0,02	0,06	0,07	1,23	1,46	0,52



**Figure 8: Courbes d'évolution de la température en fonction du temps pour le prototype2 muni d'isolant thermique (plaquette d'argile) (phase1).**

Lorsque nous plaçons l'isolant thermique entre les deux cylindres du foyer, nous obtenons une consommation de 5570 g de balles de riz en 35,07 minutes. Ce qui correspond à un taux brûlant de 160 g par minute et une consommation spécifique rapportée à la température de 290 g /l. La puissance du feu s'élève à 10,85 kW correspond à un rendement thermique de 9,73% et à un temps spécifique d'ébullition de 2 minutes 39 secondes par litre d'eau. La durée moyenne de mijotage atteint 31 minutes pour le prototype2 muni d'isolant thermique.

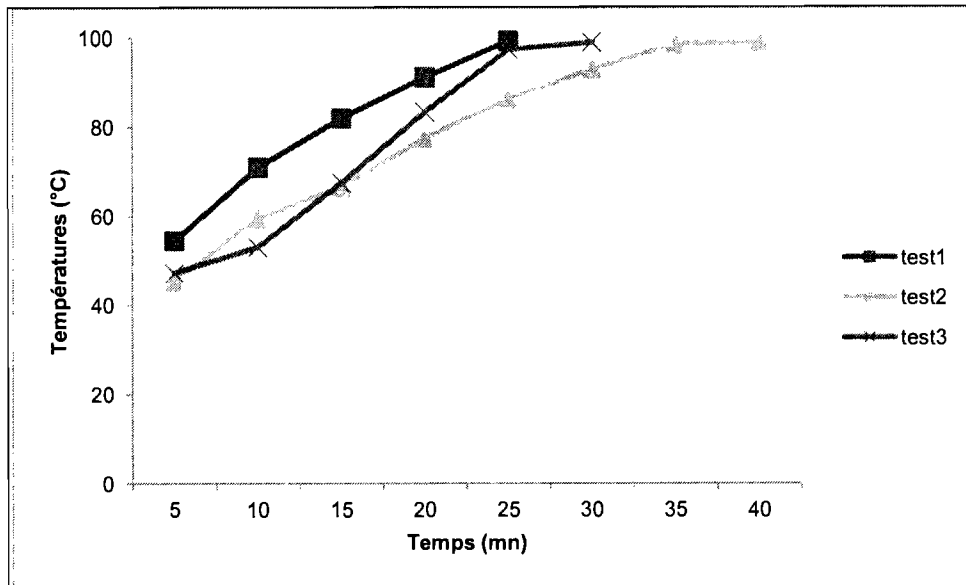
### 1.2.2. Deuxième phase du test dite phase haute puissance : démarrage à chaud

#### 1.2.2.1. Petit foyer sans plaquette d'argile

Les résultats pour la deuxième phase des tests d'ébullition de l'eau concernant le prototype1 sans isolant thermique sont représentés par le tableau 18 et la figure 9.

**Tableau 18: Grandeurs caractérisant le prototype1 sans isolant thermique (phase2)**

Grandeurs	$f_{cm}$ (kg)	$W_{cv}$ (l)	$W_{cr}$ (l)	$\Delta t$ (mn)	$\Delta t_{100}$ (mn)	$r_{cb}$ (kg/mn)	$SC_c$ (kg/l)	$SC_T$ (kg/l)	$F_{pc}$ (kw)	PCU (%)	TES (mn/l)
Test n°1	1,6	0,2	10,4	30	27	0,053	0,154	0,168	3,56	14,78	3,62
Test n°2	0,8	0,6	10	26	23	0,031	0,08	0,082	2,05	38,55	2,93
Test n°3	1,6	0,4	10,2	41	36	0,039	0,157	0,162	2,6	17,35	4,63
Moyenne	1,33	0,4	10,2	32,33	28,67	0,041	0,13	0,137	2,74	23,56	3,73
Ecart-type	0,46	0,2	0,2	7,77	6,66	0,01	0,04	0,05	0,76	13,05	0,85



**Figure 9 : Courbes traduisant l'évolution de la température en fonction du temps de l'eau pour le prototype1 sans isolant thermique (phase 2).**

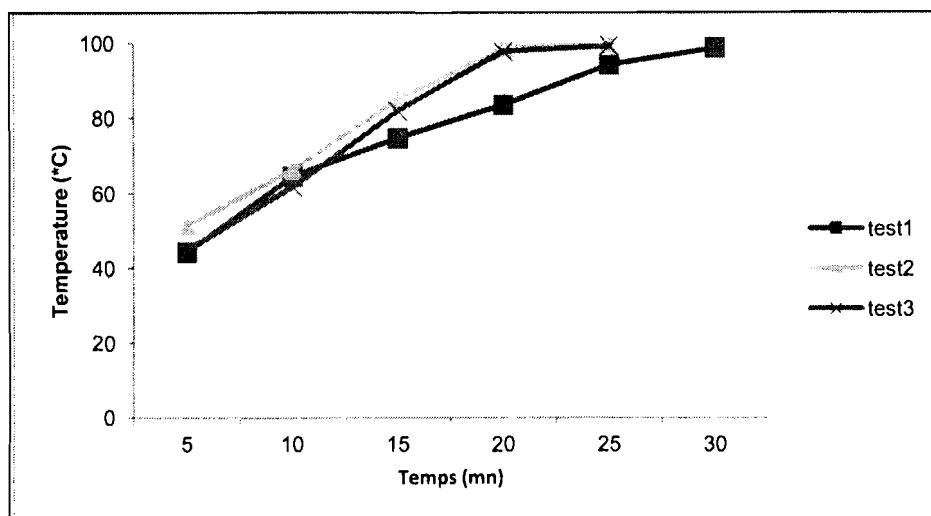
Pour le démarrage à chaud du prototype1 sans isolant thermique, nous avons enregistré une consommation de balles de riz de 1330 g au bout de 32,33 minutes ; soit un taux brûlant de 41 g / mn. La consommation spécifique de balles de riz rapportée à la température est de l'ordre de 130 g / l, pour une puissance du feu de 2,736 kW. Le rendement thermique du foyer est de 23,56 %, soit un temps d'ébullition spécifique de 4,13 minutes par litre. Le temps moyen de mijotage s'élève à 30 minutes pour un démarrage à chaud du prototype1 sans isolant thermique.

### 1.2.2.2. Petit foyer avec plaquette d'argile

En plaçant l'isolant thermique dans le prototype1 ; on obtient lors de la deuxième phase du test, les résultats ci-après. :

**Tableau 19: Grandeurs caractérisant le prototype1 avec l'isolant thermique (phase2)**

Grandeurs	$f_{cm}$ (kg)	$W_{cv}$ (l)	$W_{cr}$ (l)	$\Delta t$ (mn)	$\Delta t_{100}$ (mn)	$r_{cb}$ (kg/mn)	$SC_c$ (kg/l)	$SC_T$ (kg/l)	$F_{pc}$ (kw)	PCU (%)	TES (mn/l)
Test n°1	2,4	0,2	10,4	30	27	0,08	0,231	0,25	5,33	9,913	3,608
Test n°2	1,4	0,6	10	24	21	0,058	0,14	0,152	3,89	21,13	2,846
Test n°3	1,6	0,6	10	26	22	0,062	0,16	0,166	4,1	18,66	2,835
Moyenne	1,8	0,47	10,1	26,67	23,33	0,067	0,177	0,19	4,44	16,57	3,097
Ecart-type	0,53	0,23	0,23	3,06	3,21	0,012	0,05	0,05	0,78	5,89	0,44



**Figure 10: Courbes d'évolution de la température de l'eau en fonction du temps pour le prototype1 avec l'isolant thermique (phase2).**

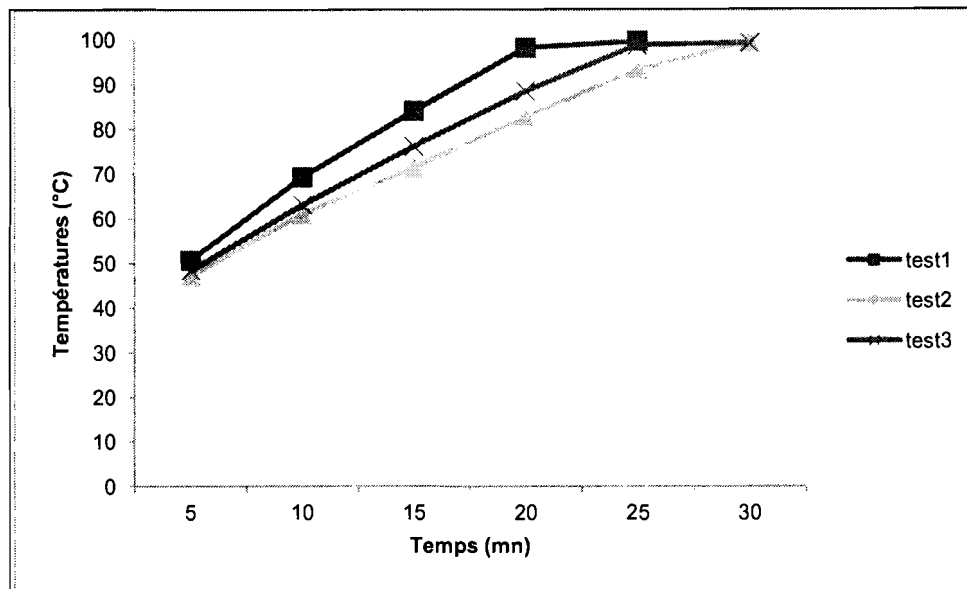
Lorsque le prototype1 est munie de l'isolant thermique, au bout de 27,07 minutes, le four consomme 1800g de balles de riz. Ce qui correspond à un taux brûlant de 67 g/ mn et une consommation spécifique corrigée par la température de 190 g/l. La puissance du feu est proche de 4,45 kW, soit un rendement thermique de l'ordre de 16,56% et un temps d'ébullition spécifique de 3 minutes 01 seconde par litre. La durée moyenne nécessaire pour porter l'eau à ébullition est de 23 minutes 33 secondes avec le prototype1 munie de l'isolant thermique.

### 1.2.2.3. Grand foyer sans plaquette d'argile

Les résultats de la phase 2 du test concernant le prototype2 sans isolant thermique sont consignés dans le tableau 20 et la figure 11.

**Tableau 20 : Grandeurs caractérisant le prototype2 en l'absence d'isolant thermique (phase2)**

Grandeurs	$f_{cm}$ (kg)	$W_{cv}$ (l)	$W_{cr}$ (l)	$\Delta t$ (mn)	$\Delta t_{100}$ (mn)	$r_{cb}$ (kg/mn)	$SC_c$ (kg/l)	$SC_T$ (kg/l)	$F_{pc}$ (kw)	PCU (%)	TES (mn/l)
Test n°1	3,1	2,4	19,2	23	21	0,135	0,161	0,177	8,99	25,06	1,391
Test n°2	3,6	1	20,6	33	29	0,109	0,175	0,193	7,27	15,72	1,957
Test n°3	3,2	1,9	19,7	30	26	0,107	0,162	0,172	7,11	22,38	1,686
Moyenne	3,3	1,77	19,8	28,67	25,33	0,117	0,166	0,181	7,79	21,05	1,678
Ecart-type	0,26	0,71	0,71	5,13	4,04	0,016	0,007	0,011	1,04	4,81	0,28



**Figure 11 : Courbes traduisant l'évolution de la température de l'eau en fonction du temps pour le prototype2 sans isolant thermique (phase 2).**

Au cours de cette phase, nous avons enregistré avec le prototype2 dépourvu de l'isolant thermique, une consommation de balles de riz de 3300 g au bout de 29,07 minutes. Cette consommation correspond à un taux brûlant de 117 g / mn et une puissance du feu de 7,79 kW. La consommation spécifique de balles de riz corrigée par la température est de l'ordre de 181 g / l, et ce, pour un rendement thermique de 21,05 %. Quant-au temps d'ébullition spécifique, il est de l'ordre de 2, 08 minutes par litre. En l'absence de l'isolant thermique la durée nécessaire de mijotage de l'eau est en moyenne de 25 minutes 33 secondes.

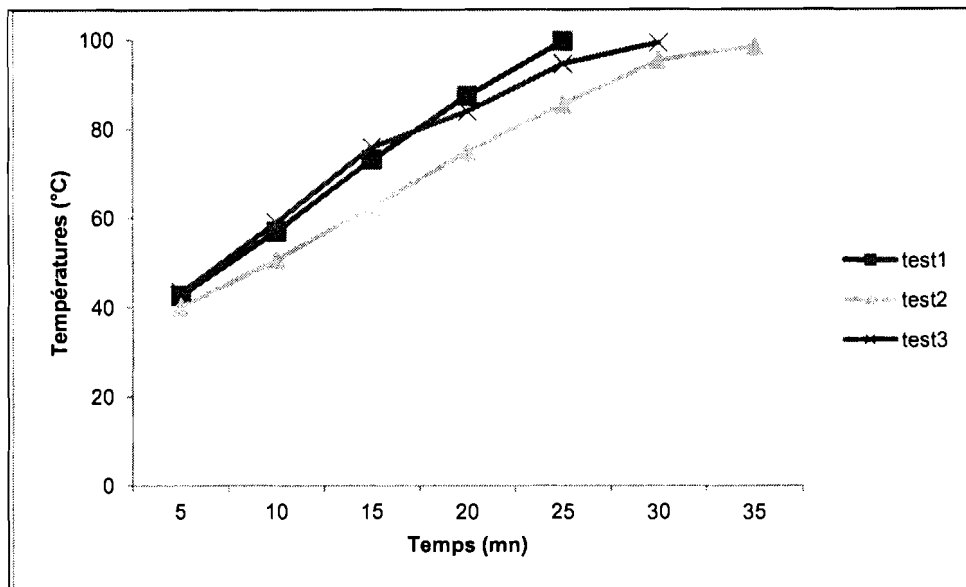
#### 1.2.2.4. Grand foyer avec plaquette d'argile

Les résultats cumulés des trois tests sur le prototype2 en plaçant l'isolant thermique, sont représentés dans le tableau 21 et par la figure 12.

**Tableau 21 : grandeurs caractérisant le prototype2 avec isolant thermique (phase2)**

Grandeurs	$f_{cm}$ (kg)	$W_{cv}$ (l)	$W_{cr}$ (l)	$\Delta t$ (mn)	$\Delta t_{100}$ (mn)	$r_{cb}$ (kg/mn)	$SC_c$ (kg/l)	$SC_T$ (kg/l)	$F_{pc}$ (kw)	PCU (%)	TES (mn/l)
Test n°1	4,8	1	20,6	28	24	0,171	0,233	0,246	11,4	12,2	1,516
Test n°2	5,4	1,8	19,8	40	32	0,135	0,273	0,348	9	11,63	2,386
Test n°3	4,7	0,4	21,2	28	27	0,168	0,222	0,248	11,2	10,04	1,841
<b>Moyenne</b>	<b>4,97</b>	<b>1,07</b>	<b>20,5</b>	<b>32</b>	<b>27,67</b>	<b>0,16</b>	<b>0,24</b>	<b>0,28</b>	<b>10,5</b>	<b>11,29</b>	<b>1,91</b>
<b>Ecart-type</b>	<b>0,38</b>	<b>0,7</b>	<b>0,7</b>	<b>6,93</b>	<b>4,04</b>	<b>0,02</b>	<b>0,03</b>	<b>0,06</b>	<b>1,34</b>	<b>1,12</b>	<b>0,44</b>





**Figure 12: Courbes d'évolution de la température en fonction du temps pour le prototype2 avec l'isolant thermique.**

Une fois l'isolant thermique placée, au bout de 32 minutes, nous obtenons une consommation de 4970 g de balles de riz avec le prototype2. Le taux brûlant atteint 160 g / mn, et la puissance du feu s'élève à 10,54 %. La consommation spécifique rapportée à la température s'élève aussi à 280 g / l. Tandis que le rendement thermique descend à 11,29 %, le temps d'ébullition spécifique augmente à 2,31 minutes.

### 1.2.3. Troisième phase du test dite de basse puissance : phase de mijotage

#### 1.2.3.1. Petit foyer sans plaquette d'argile

Le tableau 22 présente les différents résultats issus des trois tests.

**Tableau 22 : paramètres caractérisant le prototype1 sans isolant thermique (phase3)**

Grandeurs	$f_{cm}$ (kg)	$W_{cv}$ (l)	$W_{cr}$ (l)	$\Delta t$ (mn)	$r_{cb}$ (kg/mn)	$SC_c$ (kg/l)	$F_{pc}$ (kw)	PCU (%)
Test n°1	2,6	1,6	9	45	0,058	0,289	3,85	9,31
Test n°2	2	1,9	8,7	45	0,044	0,23	2,96	14,32
Test n°3	3	1,6	9	45	0,067	0,333	4,44	8,07
Moyenne	2,53	1,7	8,9		0,056	0,284	3,75	10,57
Ecart-type	0,5	0,17	0,17	0	0,01	0,05	0,75	3,31

Pour cette phase du test, la durée du test est de 45 minutes puisque le test commence lorsque l'eau a atteint son ébullition et se prend fin 45 minutes après. Etant utilisée comme simulation d'une longue cuisson d'aliment, nous trouvons une consommation de 2530 g de balles de riz avec un taux brûlant de 56 g / mn. La consommation spécifique est de 284 g par litre, pour une puissance du feu de 3,753 kW. Le rendement thermique du foyer est de 10,57 % au cours de cette phase de basse puissance.

### 1.2.3.2. Petit foyer avec plaquette d'argile

Les mêmes tests ont été répétés sur le prototype1 contenant l'isolant thermique et les résultats sont les suivants :

**Tableau 23 : Paramètres caractérisant le prototype1 menue d'isolant thermique (phase3)**

Grandeurs	$f_{cm}$ (kg)	$W_{cv}$ (l)	$W_{cr}$ (l)	$\Delta t$ (mn)	$r_{cb}$ (kg/mn)	$SC_c$ (kg/l)	$F_{pc}$ (kw)	PCU (%)
Test n°1	2,9	1,8	8,8	45	0,064	0,33	4,3	9,199
Test n°2	2	1,3	9,3	45	0,044	0,215	2,96	9,631
Test n°3	2	1,7	8,9	45	0,044	0,225	2,96	12,6
Moyenne	2,3	1,6	9	45	0,051	0,256	3,41	10,48
Ecart-type	0,52	0,26	0,26	0	0,0115	0,06	0,77	1,85

Au cours des 45 minutes d'activité du foyer munie de l'isolant thermique, sa consommation est estimée à 2300 g de balles de riz. Ce qui correspond à un taux brûlant de 51 g / mn et une puissance de feu d'environ 3,41 kW. La consommation spécifique du foyer descend à 256 g par litre avec un rendement thermique de 10,48 %.

### 1.2.3.3. Grand foyer sans plaquette d'argile

Les résultats de la phase de basse puissance des trois tests réalisés sur le prototype2 en l'absence de plaquette d'argile, sont cumulés dans les tableaux 24.

**Tableau 24: Paramètres caractérisant le prototype2 sans isolant thermique (phase3)**

Grandeurs	$f_{cm}$ (kg)	$W_{cv}$ (l)	$W_{cr}$ (l)	$\Delta t$ (mn)	$r_{cb}$ (kg/mn)	$SC_c$ (kg/l)	$F_{pc}$ (kw)	PCU (%)
Test n°1	3,6	2,2	19,4	45	0,08	0,186	5,33	9,164
Test n°2	3,8	3,2	18,4	45	0,084	0,207	5,63	12,49
Test n°3	3,6	3	18,6	45	0,08	0,194	5,33	12,52
Moyenne	3,67	2,8	18,8	45	0,081	0,195	5,43	11,39
Ecart-type	0,12	0,53	0,53	0	0,003	0,011	0,17	1,93

A l'issue des 45 minutes de fonctionnement, le foyer a consommé 3670 g de balles de riz pour un taux brûlant de 81 g / mn. Pour une puissance du feu de 5,432 kW, la consommation spécifique de balles s'élève à 195 g / l. le rendement thermique atteint 11,39 % pour le foyer en l'absence de l'isolant thermique pendant la phase de mijotage.

#### 1.2.3.4. Grand foyer avec plaquette d'argile

Nous présentons ici, les résultats de la phase de mijotage des trois tests réalisés sur le prototype2 muni d'isolant thermique (tableau 25).

**Tableau 25 : Paramètres caractérisant le prototype2 avec isolant thermique (phase3)**

Grandeurs	$f_{cm}(kg)$	$W_{cv}$ (l)	$W_{cr}$ (l)	$\Delta t$ (mn)	$r_{cb}$ (kg/mn)	$SC_c$ (kg/l)	$F_{pc}$ (kw)	PCU (%)
Test n°1	5,8	3	18,6	45	0,129	0,312	8,59	7,906
Test n°2	4,9	3	18,6	45	0,109	0,263	7,26	9,169
Test n°3	4,9	4,1	17,5	45	0,109	0,28	7,26	12,72
Moyenne	5,2	3,37	18,2	45	0,116	0,285	7,7	9,933
Ecart-type	0,52	0,64	0,64	0	0,0115	0,025	0,77	2,498

La présence de l'isolant a tendances à accroître la consommation de balles de riz qui atteint 5200 g et le taux brûlant passe à 116 g / mn. La consommation spécifique de balles de riz augmente également à 285 g / l, de même que la puissance du feu qui passe à 7,71 kW. Tandis que le rendement thermique décroît à environ 9,93 % au cours de cette phase de mijotage pour le foyer muni de l'isolant thermique.

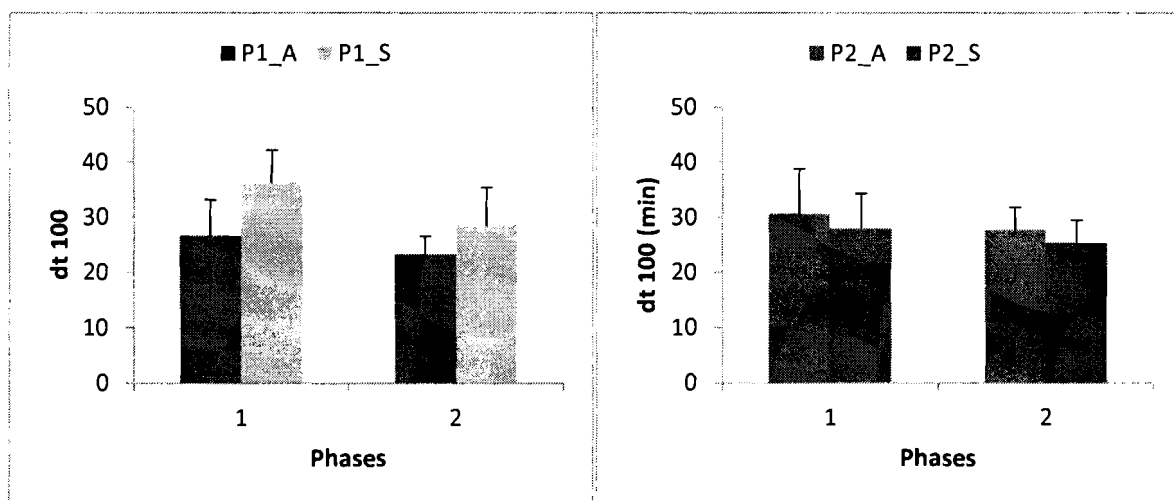
### 1.3. Analyses statistiques

Les résultats d'analyse de la durée nécessaire pour porter l'eau à ébullition ( $\Delta t_{100}$ ) lors de la phase1, montrent que la valeur moyenne obtenue pour le prototype1 avec isolant thermique est plus faible que celle obtenue pour le prototype1 sans isolant ( $26,67 \pm 6,43$  min contre  $36,33 \pm 5,86$  min).

Cette même tendance est observée en phase2 avec cependant des valeurs plus petites ( $23,33 \pm 3,21$  min pour le prototype1 avec isolant et  $30,67 \pm 8,08$  min pour celui dépourvu d'isolant). Cependant le test de Newman Keuls révèle qu'aucune différence significative n'a été enregistrée lors de la phase haute puissance ( $P > 0,05$ ).

La tendance observée au cours des deux phases du prototype1 s'inverse pour le prototype2 lors de la phase1. Les valeurs obtenues sont respectivement de  $30,67 \pm 8,08$  mn pour le prototype2 muni de l'isolant thermique et de  $28 \pm 6,24$  mn pour celui qui en est dépourvu.

Pendant la phase2, on observe une situation analogue à la première avec cependant des valeurs relativement faibles pour les deux types ( $27,67 \pm 4,04$  mn et  $25,33 \pm 4,04$  mn respectivement le prototype2 muni d'isolant et celui dépourvu de l'isolant thermique). Toutefois, le test de Newman Keuls au seuil de confiance de 5% n'a pas observé de différence significative entre les deux types de foyers pendant la phase haute puissance (figure 13).



**Figure 13 : Comparaison du temps nécessaire pour porter l'eau à ébullition des deux prototypes de foyer à balles de riz.**

L'analyse du taux brulant ( $r_{cb}$ ) au cours de la phase1 du test, donne des valeurs relativement proches entre le prototype1 dépourvu de l'isolant thermique ( $0,08 \pm 0,04$  kg / mn) et celui muni de l'isolant thermique ( $0,06 \pm 0,02$  kg / mn).

Lors de la phase2, on observe la même tendance avec des valeurs plus faibles ( $0,07 \pm 0,01$  kg / min pour le prototype1 avec isolant et  $0,04 \pm 0,01$  kg / mn pour celui sans isolant).

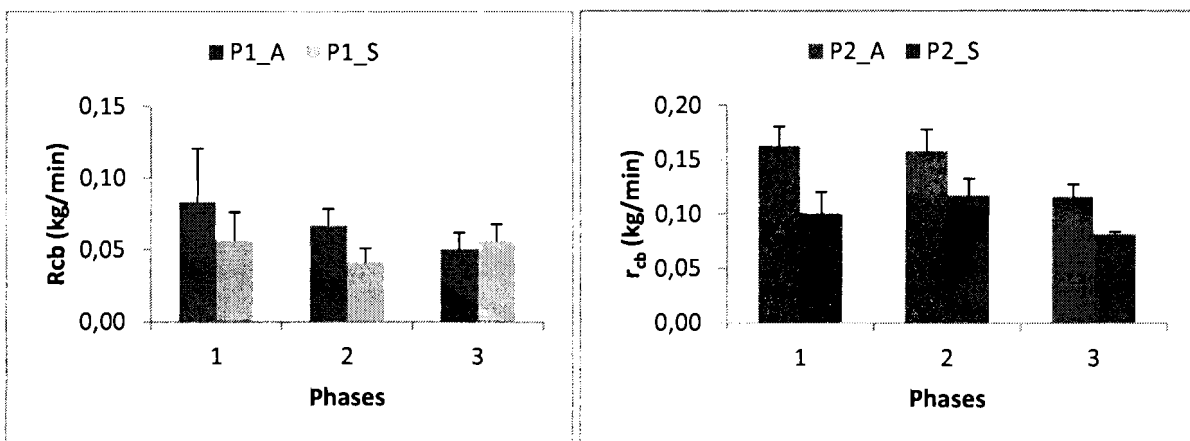
Cette tendance s'inverse au cours de la phase3 du test, mais avec des valeurs plus faibles ( $0,05 \pm 0,01$  kg / mn et  $0,06 \pm 0,01$  kg / mn respectivement pour les prototypes1 avec isolant et sans isolant).

Notons qu'au cours de la phase haute puissance et celle dite de basse puissance, les tests ANOVA indiquent qu'aucune différence significative n'a été observée ( $P > 0,05$ ).

En ce qui concerne le prototype2, les résultats d'analyse du  $r_{cb}$  au cours de la phase1 révèlent une situation contraire à celle du prototype1. Les valeurs obtenues sont respectivement de  $0,16 \pm 0,02$  kg / mn pour le prototype2 avec isolant et de  $0,10 \pm 0,02$  kg / mn pour celui dépourvu de l'isolant (figure 14).

Au cours de la phase2, on observe une situation analogue à la première avec des valeurs presque similaires ( $0,16 \pm 0,02$  kg / mn et  $0,12 \pm 0,02$  kg / mn respectivement pour les prototype2 muni et dépourvus d'isolant thermique).

Lors de la phase3, on observe la même tendance avec cependant des valeurs plus faibles ( $0,12 \pm 0,01$  kg / mn pour le prototype2 avec isolant et  $0,08$  kg / mn pour le prototype2 sans isolant). Toutefois aucune différence significative n'a été observée entre les deux types lors des phases haute et basse puissance ( $P > 0,05$ ).



**Figure 14 : Comparaison du taux brûlant des deux prototypes de foyer à balles de riz**

Les résultats d'analyse de la consommation spécifique pendant la phase1, donnent des valeurs moyennes presque identiques entre le prototype1 muni de l'isolant thermique ( $0,24 \pm 0,09$  kg / l) et le prototype1 dépourvu d'isolant ( $0,25 \pm 0,1$  kg / l).

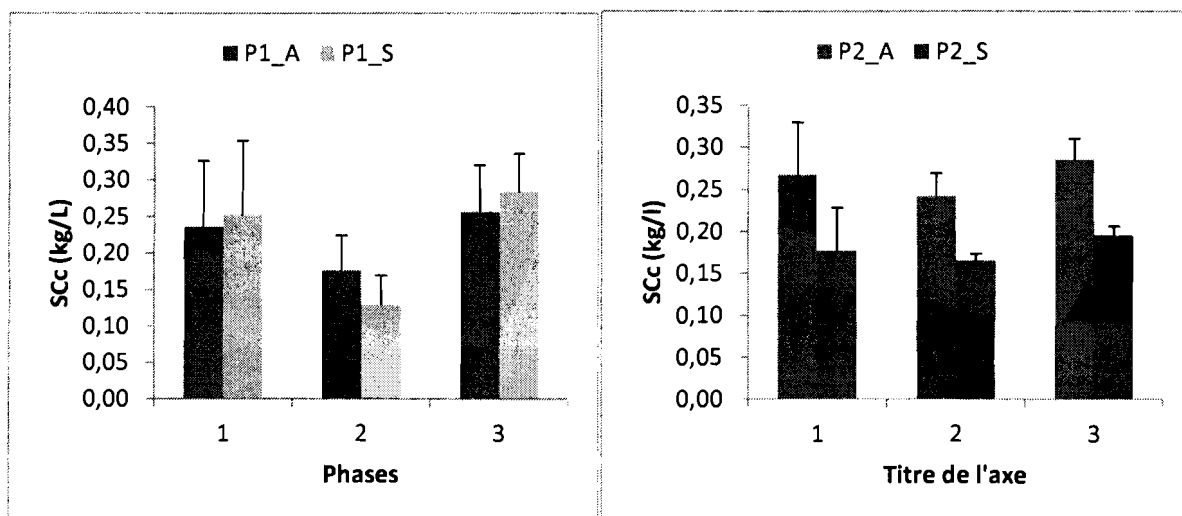
Au cours de la phase2, on observe une inversion de la tendance avec cependant des valeurs faibles ( $0,18 \pm 0,05$  kg / l et de  $0,13 \pm 0,04$  kg / l respectivement pour les prototypes1 avec isolant et sans isolant).

Au cours de la phase3, on observe une situation analogue à celle de la phase1, mais avec de valeurs plus élevées ( $0,26 \pm 0,06$  kg / l pour le prototype1 avec isolant et de  $0,28 \pm 0,05$  kg / l pour le prototype1 sans isolant). Cependant, aucune différence significative n'a été observée entre les pototypes1 muni d'isolant et sans isolant ( $P > 0,05$ ).

Quant – au prototype2, les résultats de l'analyse du SCc lors de la phase1 révèlent une inversion de la tendance observée avec le prototype1. Les valeurs obtenues sont de  $0,27 \pm 0,06$  kg / l pour le prototype2 avec isolant et de  $0,18 \pm 0,05$  kg / l pour le prototype2 sans isolant (figure 15).

Au cours de la phase2, la même tendance se maintient, mais avec des valeurs plus faibles ( $0,24 \pm 0,03$  kg / l et  $0,17 \pm 0,01$  kg / l respectivement pour le prototype2 avec isolant thermique et celui sans isolant).

Pendant la phase 3, on obtient des valeurs élevées avec une tendance analogue à celle de la phae2 ( $0,28 \pm 0,02$  kg / l et de  $0,20 \pm 0,01$  kg / l respectivement pour le prototype2 minus d'isolant et celui dépourvu de l'isolant. Toutefois aucune différence significative n'a été observée ( $P > 0,05$ ).



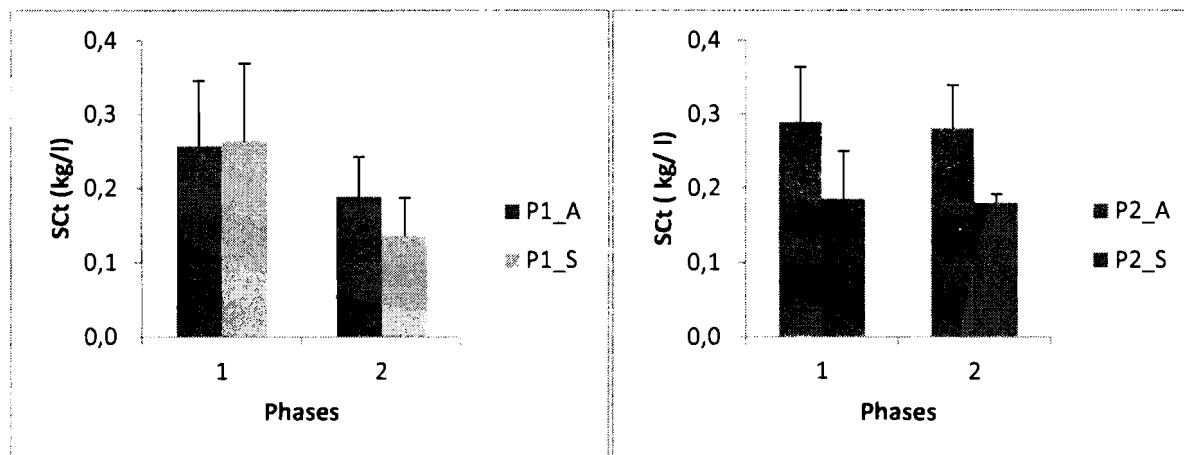
**Figure 15 : Comparaison de la consommation spécifique des deux prototypes de foyers à balles de riz.**

Les résultats issus de l'analyse de la consommation corrigée par la température ( $SC_T$ ) lors de la phase1 du test, donnent des valeurs identiques pour le prototypes1 munis et celui dépourvu d'isolant ( $0,26 \pm 0,09$  kg / l et  $0,26 \pm 0,1$  kg / l respectivement pour les prototypes1 avec isolant et sans isolant) (figure16).

Pendant la phase2, on constate que la valeur du  $SC_T$  est d'autant plus élevée pour le prototype1 minus de l'isolant ( $0,29 \pm 0,07$  kg / l) que pour le prototype1 dépourvu de l'isolant ( $0,19 \pm 0,05$  kg / l). Cependant aucune différence significative n'a été enregistrée au cours de la phase haute puissance au seuil de 5%.

Pour ce qui est du prototype2, l'analyse du  $SC_T$  au cours de la phase1, a révélé une inversion de la tendance obtenue pour le prototype1 en phase2 ( $0,29 \pm 0,007$  kg / l et  $0,19 \pm 0,05$  kg / l respectivement pour le prototype2 avec isolant et sans isolant).

La même tendance est maintenue au cours de la phase2, mais avec une légère diminution des valeurs ( $0,28 \pm 0,06$  kg / l pour le prototype2 avec isolant et  $0,18 \pm 0,01$  kg / l pour le prototype2 sans isolant). Toutefois, aucune différence significative n'a été observée au cours e la phase haute puissance. ( $P > 0,05$ ).



**Figure 16 : Comparaison de la consommation spécifique corrigée par la température des deux prototypes de foyer à balle de riz.**

Les résultats issus de l'analyse de la puissance du feu lors de la phase1 du test sont respectivement de  $5,54 \pm 2,48$  kW pour le prototype1 avec isolant et de  $3,76 \pm 1,31$  kW pour le prototype1 sans isolant.

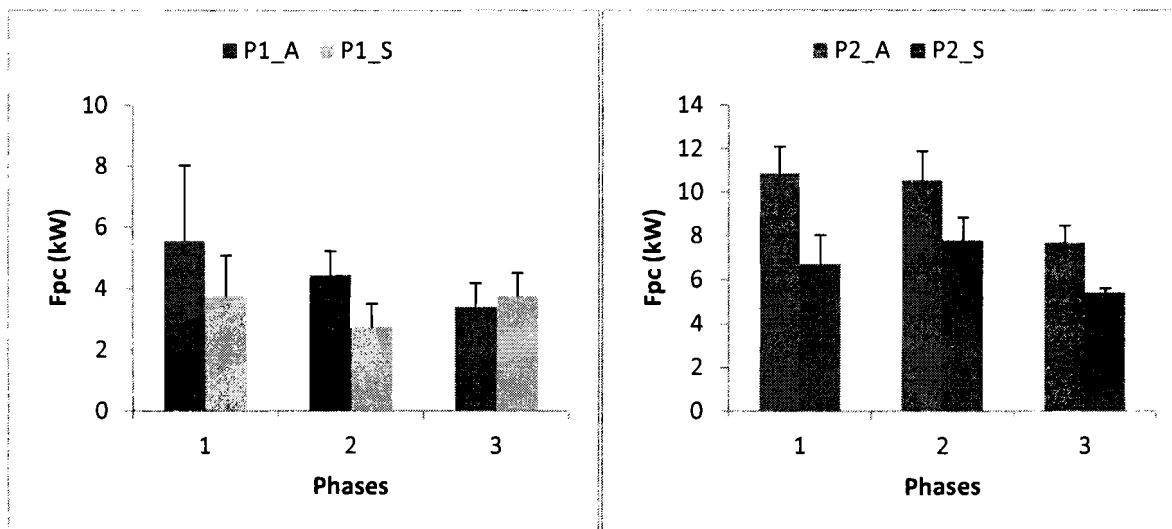
Au cours de la phase2, on observe la même tendance ( $4,44 \pm 0,78$  kW et de  $10,85 \pm 1,23$  kW respectivement pour les prototypes 1 avec isolant et sans isolant).

On observe une inversion de la tendance au cours de la phase3, mais avec des valeurs plus faibles ( $3,41 \pm 0,77$  kW pour le prototype1 avec isolant et de  $3,75 \pm 0,75$  kW pour le prototype1 sans isolant thermique). Au cours des phases haute et basse puissance, aucune différence significative n'a été observée au seuil de 5%.

Quant – au prototype2, les résultats d'analyse lors de la phase 1 donnent les valeurs de  $10,83 \pm 1,23$  kW et de  $6,72 \pm 1,31$  kW respectivement pour les prototypes2 avec isolant et celui sans isolant (figure 17).

Pendant la phase2, on observe une situation analogue à la phase1 avec des valeurs respectives de  $10,54 \pm 1,34$  kW pour le prototype2 avec isolant et de  $7,79 \pm 1,04$  kW pour le prototype2 sans isolant. On observe une différence significative au cours de la phase haute puissance ( $P < 0,05$ ).

La même tendance se maintient au cours de la troisième phase du test, mais avec des valeurs plus petites ( $7,70 \pm 0,77$  kW et  $5,43 \pm 0,17$  kW respectivement pour les prototypes2 minus et dépourvu d'isolant thermique). Cependant, aucune différence significative n'a été observée pendant cette phase ( $P > 0,05$ ).



**Figure 17: Comparaison de la puissance du feu des deux prototypes de foyer à balle de riz**

L'analyse du rendement thermique du prototype1 au cours de la phase1 montre que le PCU du prototype1 avec isolant thermique est légèrement élevé par rapport à celui du prototype1 sans isolant ( $12,56 \pm 4,33$  % contre  $11,12 \pm 5,11$  %).

Au cours de la phase2, on observe une inversion de la tendance, mais avec des valeurs plus élevées ( $16,57 \pm 5,89$ % et  $23,756 \pm 13,05$  % respectivement pour les prototypes1 avec isolant est sans isolant).

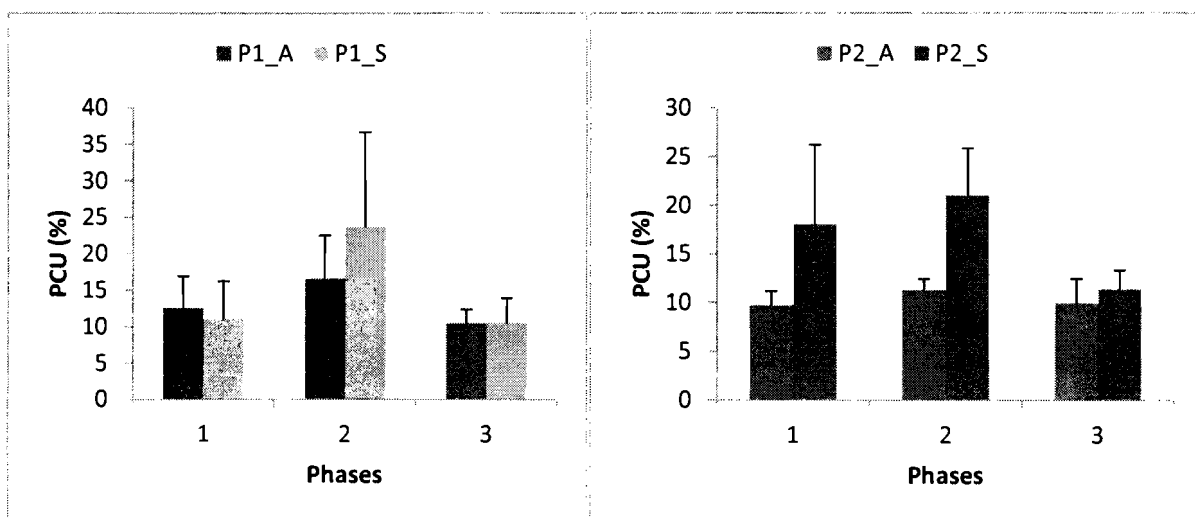


Au cours de la phase3 du test, les résultats d'analyse attestent que les valeurs moyennes du PCU obtenues pour les prototypes1 muni d'isolant et dépourvu sont presque identiques (respectivement de  $10,48 \pm 1,85 \%$  et de  $10,57 \pm 3,37 \%$ ). Toutefois aucune différence significative n'a été observée au seuil de 5%.

Pour ce qui est du prototype2, les résultats d'analyse du PCU au cours de la phase1, révèlent une situation antagoniste à celle du prototype1. Les valeurs moyennes obtenues lors de cette phase sont respectivement de  $9,73 \pm 1,46 \%$  pour le prototype2 avec isolant et de  $18,04 \pm 8,20 \%$  pour le prototype2 sans isolant thermique (figure 18).

La même tendance se maintient pendant la phase2, mais avec des valeurs plus élevées ( $11,29 \pm 1,12 \%$  et  $21,05 \pm 4,81\%$  respectivement pour le prototype2 avec isolant et celui sans isolant).

Lors de la phase3 du test, on observe une situation analogue à la phase, mais avec des valeurs plus petites ( $9,93 \pm 2,50 \%$  pour le prototype2 muni d'isolant et  $11,39 \pm 1,93 \%$  pour le prototype2 sans isolant). Cependant, aucune différence significative n'a été observée ( $P > 0,05$ ).



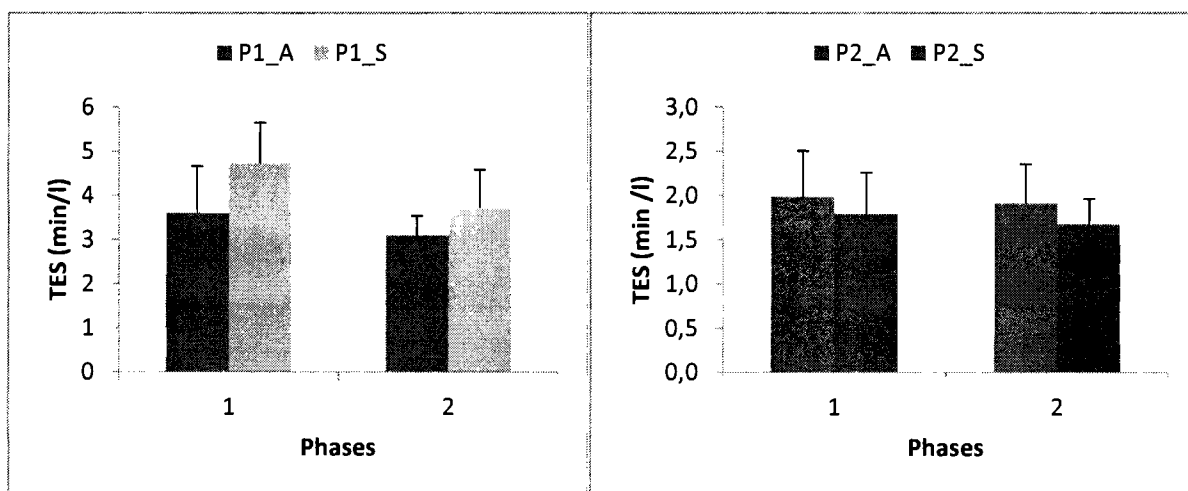
**Figure 18: Comparaison du rendement thermique des deux prototypes de foyer à balle de riz**

Les résultats d'analyse du temps d'ébullition spécifique (TES) de la phase1 du test donnent les valeurs de  $3,61 \pm 1,06$  mn / L et de  $4,73 \pm 0,91$  mn / L respectivement pour les prototypes1 avec isolant thermique et sans isolant (figure 19).

Au cours de la phase2, on observe des valeurs plus faibles avec cependant une inversion de la tendance ( $3,10 \pm 0,44$  mn / L et  $3,73 \pm 0,85$  mn / L respectivement pour les prototypes1 avec isolant et sans isolant). Une différence significative a été observée au cours de la phase haute puissance entre le prototype1 muni de l'isolant et celui qui en est dépourvu ( $P < 0,05$ )

En ce qui concerne le prototype2 en phase1, les résultats de l'analyse révèlent que la valeur moyenne du TES obtenue avec le prototype2 dépourvu de l'isolant est légèrement en baisse ( $1,79 \pm 0,47$  mn / L) comparée à celle du prototype2 muni de l'isolant ( $1,99 \pm 0,52$ mn / L).

La même tendance est observée lors de la phase2, mais avec de faibles variations ( $1,68 \pm 0,28$  mn / L et  $1,91 \pm 0,44$  mn / L respectivement pour les prototype2 sans isolant et avec isolant). Au cours de cette phase, aucune différence significative n'a été observée ( $P > 0,05$ ).



**Figure 19 : Comparaison du temps d'ébullition spécifique des deux prototypes du foyer à balles de riz.**

## II. Fabrication des briquettes de balles de riz

### 2.1. Tests de liants et de mélanges

Plusieurs recettes de liants et de mélanges ont été testées au cours de nos expérimentations, les résultats obtenus sont représentés dans le tableau 26 et images ci-dessus :

**Tableau 26: Observations directes faites sur les recettes**

<b>Recettes</b>	<b>Observations</b>
Recette 1	Très bonne compaction des briquettes. Démoulage facile. Séchage : 6 jours. Très bonne tenue des briquettes après séchage.
Recette 2	Très bonne compaction des briquettes. Démoulage facile. Séchage rapide (4 jours). Bonne tenue des briquettes après séchage.
Recette 3	Mauvaise compaction des briquettes. Démoulage peu facile. Séchage : 5 jours. Briquettes
Recette 4	Très bonne compaction des briquettes. Démoulage facile. Séchage : 4 jours. Bonne tenue des briquettes après séchage.
Recette 5	Très bonne compaction des briquettes. Démoulage facile. Séchage : 4 jours. Bonne tenue des briquettes après séchage.
Recette 6	Très bonne compaction des briquettes. Démoulage facile. Séchage rapide (4 jours). Bonne tenue des briquettes après séchage.
Recette 7	Mauvaise compaction des briquettes. Démoulage difficile. Séchage : 5 jours. Mauvaise tenue des briquettes après séchage.
Recette 8	Bonne compaction des briquettes. Démoulage peu facile. Séchage 6 jours. Bonne tenue des briquettes après séchage.
Recette 9	Compaction moyenne. Démoulage facile. Tenue assez bonne des briquettes.
Recette 10	Très bonne compaction des briquettes. Démoulage facile au début et difficile à la fin. Séchage : 4-5 jours. Très bonne tenue des briquettes après séchage.
Recette 11	Bonne compaction des briquettes. Démoulage facile au début et difficile à la fin. Séchage : 4 jours. Briquettes tiennent bien après séchage, mais sont friables.
Recette 12	Compaction moyen. Démoulage facile. Séchage : 4 jours. Faible tenue des briquettes après séchage.
Recette 13	Compaction faible. Démoulage facile. Bonne apparence visuelle. Démolissement des briquettes lors du séchage.
Recette 14	Idem recette n° 13
Recette 15	Idem recette n°13
Recette 16	Très bonne compaction des briquettes. Démoulage facile. Séchage : 5 jours. Bonne tenue des briquettes après séchage.
Recette 17	Très bonne compaction des briquettes. Démoulage facile. Séchage : 5-6 jours. Bonne tenue des briquettes après séchage.
Recette 18	Très bonne compaction des briquettes. Démoulage facile. Séchage : 5 jours. Bonne tenue des briquettes après séchage.

## Suite du tableau 26

---

Recette 19	Très bonne compaction des briquettes. Démoulage facile. Séchage : 5-6 jours. Bonne tenue des briquettes après séchage.
Recette 20	Compaction moyenne. Démoulage facile. Tenue assez bonne des briquettes (friables).
Recette 21	Compaction moyenne. Démoulage facile. Tenue assez bonne des briquettes (friables).
Recette 22	Assez bonne compaction des briquettes mais friables après démoulage. Démoulage facile. Séchage 5 jours. Mauvaise tenue des briquettes après séchage.
Recette 23	Mauvaise compaction des briquettes. Briquettes friables Démoulage difficile. Séchage 6 jours. Mauvaise tenue des briquettes après séchage

---



Photo n°1 : Briquettes de la recette n°1



Photo n°2 : Briquettes de la recette n°2



Photo n°3 : Briquettes de la recette n°3



Photo n°4 : briquettes de la recette n°4



Photo n°5 : Briquettes de la recette n°5



Photo n°6 : Briquettes de la recette n°6



Photo n°7 : Briquettes de la recette n°7



Photo n°8 : Briquettes de la recette n°8



Photo n°9 : Briquettes de la recette n°9



Photo n°10 : Briquettes de la recette n°10



Photo n°11 : Briquettes de la recette n°11



Photo n°12 : Briquettes de la recette n°12



Photo n°13 : Briquettes de la recette n°13



Photo n°14 : Briquettes de la recette n°14



Photo n°15 : Briquettes de la recette n°15

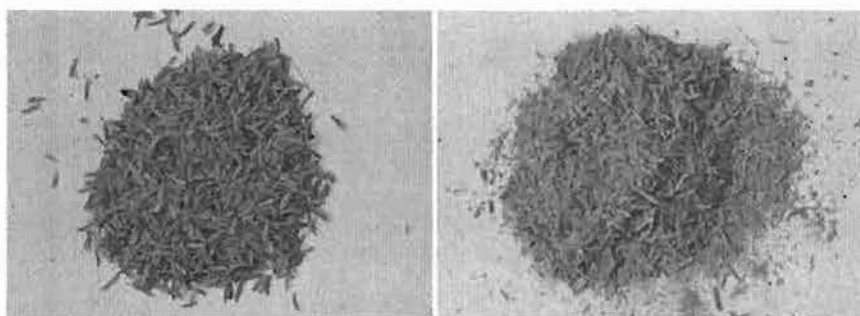
**Planche 6 : Photos illustrent les briquettes obtenues à partir des différentes recettes.**

D'une manière générale, la balle de riz est difficilement compressible à basses pressions même avec l'utilisation d'un liant. La farine d'épluchures de manioc ne se comporte pas en bon liant quelque soit la quantité et la nature de la matière première.

L'argile aussi ne donne pas de bons résultats, les briquettes se démolissent lors du séchage.

La farine de manioc ou gommy donne des résultats satisfaisants tant avec les balles de riz entières, broyées qu'avec les mélanges des deux (broyées + entières). Le mélange de liants (farine de maïs + gommy ; tourteau de beurre de karité + gommy) donne aussi de bons résultats.

Notons que la granulométrie est l'un des facteurs de réussite de la compaction lors de la fabrication des briquettes. En effet les briquettes faites à l'aide des balles de riz broyées sont plus compactes et résistantes comparées à celles faites de balles entières ou d'un mélange de balles broyées et balles entières.



Photos c et d : Balles de riz entier Photo : Balles de riz broyé

## 2.2. Confection de presse manuelle

Dès les premières instants de nos expérimentations, nous nous sommes servi d'une brique pleine de 12 kg pour exercer la pression sur le piston compresseur afin de densifier les balles de riz. Mais nous avons très vite remarqué que cette pression était insuffisante pour la compression des balles de riz. C'est ainsi que nous nous sommes attelés à confectionner une presse manuelle capable de développer d'importante force (pression) pour servir à la compression des balles de riz.

Une première presse a été confectionnée, mais celle-ci s'est avérée inefficace pour des raisons de faibles pressions développées et la forme rectangulaire de son moule ne favorisant pas le bon déroulement de la confection des briquettes.

Ainsi nous nous sommes inspirés de l'image d'une presse manuelle confectionnée au Togo en 1985 par un groupe de volontaires, et nous avons mis en place une deuxième presse manuelle à double levier dont les résultats sont très satisfaisants (planche n°3).

Elle permet de multiplier par 10 la force appliquée au bout de la manche. Par exemple une personne de 60 kg exerce une force de 588N sur la manche, avec le facteur de levier (10X) cette force devient 5880 N. Cette même personne (60 kg) exerce une pression de  $19,1\text{N/cm}^2$  sur le moule placé à 30cm du point de rotation du levier principal. Avec cette presse, on obtient des briquettes de 135 à 200 g suivant leurs compositions.

## **2.3. Caractéristiques des briquettes**

### **2.3.1. Dimensions**

Tout au long de nos différentes expérimentations, nous avons testé plusieurs moules de dimensions variables afin de pouvoir déterminer les dimensions convenables aux briquettes. Nous avons choisi dès le départ des briquettes cylindriques de dimensions suivantes : hauteur de 13 cm, diamètre externe de 9,5 cm et un diamètre du trou centrale de la briquette de 2,5 cm (photos g et h). Mais nous avons trop vite compris que ces dimensions (surtout la hauteur et le trou central) ne favorisaient pas un séchage rapide des briquettes et que les essais préliminaires de combustion ne donnaient pas de bons résultats.

En effet, les briquettes dont la taille est comprise entre 10 et 13 cm de long prennent assez de temps à sécher et ne favorisent pas une bonne combustion. Il est très commode d'observer un développement de moisissures au sein des briquettes au cours du séchage et après séchage (photos e et f).

Par contre les briquettes dont la taille est comprise entre 4 et 5,5 cm sèchent très rapidement et brûlent relativement bien comparativement à celles de grandes tailles ; mais l'inconvénient majeur de ces briquettes est qu'elles tiennent faiblement et ont tendance à se briser au moindre choc.





Photos e et f : Développement de moisissures dans les briquettes de 9,5 cm

A l'issue de plusieurs essais, nous avons retenu les briquettes cylindriques de 7,5 cm de long avec un diamètre de 10 cm et muni d'un trou central de 3 cm de diamètres qui présentent l'avantage de séchage rapide et de bonne combustion. Les images ci-dessous donnent un aperçu des dimensions de quelques briquettes.



Photos g et h : Taille des briquettes



Photos i et j : Diamètres externe des briquettes



### 2.3.2. Densité

Elle est fonction de la nature de la matière première, mais aussi du liant utilisé. Elle varie de 0,29 pour les briquettes faites à base de balles de riz entières et de gommy comme liant, de 0,36 pour les briquettes constituées d'un mélange de balles de riz broyées, et de balles de riz entières avec la farine de maïs comme liant ; à 0,42 pour les briquettes composées de balles broyées avec un mélange de tourteau de beurre de karité + gommy comme liant.

## 2.4. Tests d'aptitudes des briquettes

### 2.4.1. Test de tenue à l'humidité

Les résultats sont consignés dans le tableau 27 :

**Tableau 27: Condensé des résultats des tests d'immersion des briquettes.**

Type de briquette	Gonflement	Cohésion des particules	Type de briquette	Gonflem ent	Cohésion des particules
Balles broyée + farine de pulpe de manioc	Très important	Nulle	Balles broyées + Balles entières + farine de maïs	Assez important	Faible
Balles broyées + balles entières + farine de pulpe de manioc	Très important	Nulle	Balles broyées + Balles entières + farine de maïs + gommy	Léger	Bonne
Balles entières + farine de maïs	Très important	Très faible	Balles broyées + Argile	Assez important	Nulle
Balles broyées + farine de maïs	Léger	Bonne	Balles broyées + farine de maïs + gommy	léger	Assez bonne
Balle entière + farine de maïs + gommy	Très important	Faible	Balles broyées + balles entières + gommy	Assez important	Bonne
Balles broyées + balles entières + tourteau de karité + gommy	léger	Bonne			

Ces résultats démontrent que les briquettes faites avec les balles de riz entiers ont une mauvaise tenue vis-à-vis de l'humidité. Par contre celles composées uniquement de balles broyées ou du mélange balles broyées + balles entières, résistent mieux à l'humidité. De même, il découle de ces résultats que les liants comme le gommy, la farine de maïs, la farine de maïs + gommy, et les tourteaux de karité + gommy confèrent une bonne cohésion aux briquettes.

#### **2.4.2. Test de résistance aux chocs**

Les résultats de la première méthode montrent que les briquettes faites à base de balles entières ne résistent pas aux chocs quel que soit le type de liant utilisé.

En effet après l'impact au sol des différentes briquettes, nous avons constaté que les briquettes se brisent en deux ou trois morceaux. Même si celle-ci ne se brise pas, on observe soit des fissures sur les briquettes, soit un détachement d'une quantité importante des particules de balles de riz de la briquette diminuant considérablement la masse de celle-ci. Les briquettes composées uniquement de balles de riz broyées sont les plus solides et résistent très bien aux chocs. Excepté les briquettes faites avec la farine de pulpe de manioc comme liant, aucune briquette faite avec les autres liants (farine de maïs, gommy, tourteau de beurre de karité + gommy et farine de maïs + gommy) ne s'est brisée.

Le seul constat fait est qu'une quantité infime de particules de balles de riz se détachent des briquettes (surtout celles utilisant la farine de maïs comme liant).

Quant-aux briquettes composées d'un mélange de balles de balles de riz entières et de balles de riz broyées, ce sont celles utilisant le gommy comme liant qui sont les plus résistantes (aucune briquette ne s'est brisée), secondées par celles utilisant le mélange gommy + farine de maïs comme liant (3 briquettes sur 10 ont brisées), puis celles utilisant tourteaux de beurre de karité + gommy (une seule s'est brisée et une autre présentant des fissures) et enfin viennent celles faites à base de farine de maïs comme liant puisqu'elles sont beaucoup plus friables et quelques-unes se brisent (5 briquettes sur les 10 sont brisées).

Les résultats issus de la deuxième méthode sont consignés dans le tableau 28.

**Tableau 28 : Résultats du test de résistance aux chocs avec la deuxième méthode.**

<b>Caractéristiques des briquettes utilisées</b>	<b>État initial</b>	<b>État final</b>
Matière : balles entières Liant : farine de maïs	10 briquettes intactes	Aucune briquette n'est parvenue à destination.  8 briquettes sont restées intactes, 2 briquettes n'avaient plus leur formes initiale (perte de ¼ de leur masse).
Matière : balles broyées Liant : farine de maïs	10 briquettes intactes	4 sont restées intactes, 3 avaient perdu leur forme et 1/4 de leur masse et 3 s'étaient brisées. 1 briquette restée intacte, 2 ont perdu 2/3 de leur masse avec modification apparente de la forme initiale et 7 brisées.
Matière : balles entières + balles broyées Liant : farine de maïs	10 briquettes intactes	10 briquettes sont restées intactes.
Matière : balles entières Liant : gommy	10 briquettes intactes	7 intactes, 2 perdent 1/4 de leur masse initiale sans affectée la forme initiale, 1 brisée.
Matière : balles broyées Liant : gommy	10 briquettes intactes	1 intacte, 3 perdent 2/3 de leur masse initiale, 6 brisées.
Matière : balles entières Liant : farine de maïs + gommy	10 briquettes intactes	7 intactes, 3 perdent ¼ de leur masse initiale.
Matière : balles broyées Liant : farine de maïs + gommy	10 briquettes intactes	6 intactes, 2 perdent 1/3 de leur masse, 3 brisées.
Matière : balles entières + balles broyées Liant : tourteau de beurre de karité + gommy	10 briquettes intactes	8 intactes, 1 perd ¼ de sa masse initiale, 1 brisée.
Matière : balles broyées Liant : tourteaux de beurre de karité + gommy	10 briquettes intactes	9 intactes, 1 perd ¼ de sa masse initiale.

### 2.4.3. Test de combustion

Au cours de nos différents essais, il ressort clairement qu'il est très difficile d'allumer directement les briquettes ; il faut au préalable allumer du feu avec un autre combustible avant d'amorcer la combustion des briquettes. Les briquettes ne servent donc pas à l'allumage direct de feu de cuisine, mais elles sont efficaces à maintenir le feu lorsque celui-ci est déjà allumé. Deux à trois briquettes étaient nécessaires pour maintenir une bonne combustion, il ne nous a donc pas été possible de récolter des données sur une seule briquette, puisque la combustion ne se maintient pas assez longtemps pour permettre de prendre des mesures significatives. Les résultats de ces tests sont consignés dans le tableau 29.

**Tableau 29 : Résultats des tests de combustion des briquettes**

Recette utilisée	Temps d'ignition (mn)	Temps de combustion (mn)	Température maximale (°C)	Observations sur la combustion
Recette 1 Recette 2	Toutes les briquettes se sont démolies au cours du séchage			
Recette 3	3	15	-	Allumage difficile, nécessite un feu préalable. Combustion étouffante, dégagement importante de fumée.
Recette 4	-	-	-	Démolissement des briquettes au cours de la combustion. Allumage très facile avec épiluchures de maïs, bonne combustion avec beaucoup de flammes. Faible émission de fumée. Combustion ne nécessitant pas d'agitation du grillage.
Recette 5	1	18	-	Allumage peu facile nécessitant un feu allumé d'avance.
Recette 6	1,25	28,5	-	Combustion lente avec production moyenne de flamme. Dégagement faible de fumée dès le début de combustion.
Recette 7	1,45	26	620	Allumage relativement facile mais nécessitant toute fois un feu préalablement allumé. Dégagement d'importantes fumées blanches épaisses. Combustion étouffante nécessitant une agitation constante du grillage. Flammes moins vives.

## Suite du tableau 29

Recette 8	1,23	32	575	Allumage relativement facile mais nécessitant toute fois un feu préalablement allumé. Dégagement d'importantes fumées blanches épaisses. Combustion étouffante nécessitant un brassage régulier du grillage.
Recette 9, Recette 10				Toutes les briquettes se sont démolies lors du séchage
Recette 11	2,3 0	30	659	Allumage difficile surtout pour les briquettes de grande taille. Les briquettes d'environ 5cm s'allument mieux. Dégagement de fumées blanches épaisses. Combustion étouffante.
Recette 12				Briquettes très friables et se démollissant au cours du séchage
Recette 13	1	31	653	Allumage facile. bonne combustion avec beaucoup de flamme. Pas besoin d'agitation du grillage. dégagement faible de fumées des le début de la combustion.
Recette 14	1,38	35	-	Allumage peu facile nécessitant un feu allumé d'avance. Combustion lente avec production moyenne de flamme. Dégagement faible de fumées au cours de la combustion.
Recette 15	1,3	30	631,33	Allumage très facile .très bonne combustion avec beaucoup de flammes. Dégagement faible de fumées blanches. Combustion ne nécessitant pas d'entretien régulier du feu.
Recette 16	1,16	20	675	Allumage facile. Bonne combustion avec beaucoup de flamme. Pas besoin d'agitation du grillage. Dégagement faibles fumées des le début de la combustion.
Recettes 17, 18, 19, 20, 21, 22 et 23				Toutes les briquettes se sont démolies lors du séchage



Photo k : Combustion des briquettes peu denses



Photo l : Combustion des briquettes denses



Photo m : Combustion des briquettes a densité faible

## 2.5. Aspects socio-économique de fabrication des briquettes de balles de riz

### 2.5.1. Disponibilité et coût

La disponibilité des balles de riz est relative à la zone, par exemple dans la commune de Bama où le foyer métallique à écorces de riz est très répandu, les écorces de riz se font de plus en plus rares. La production annuelle de balles de riz est estimée à environ 150000 tonnes (station agro météorologique de la Vallée du Kou). A l'issue de nos enquêtes et au cours de nos différentes expérimentations à Bama, nous avons constaté que le prix du sac de 100 kg rempli de balles de riz, pesant environ 18 kg se vendait à 150 FCFA. Lorsque les balles deviennent rares, ce prix passe à 200 FCFA. Par contre à Banzon, le foyer n'étant pas encore très vulgarisé, les balles de riz sont abondantes et grduites. Dans cette commune rurale, nous avons inventorié 11 décortiqueuses de riz dont 6 étaient fonctionnelles. Chaque unité de décortiquage, décortique en moyenne 25 tonnes de riz par mois et ce, pendant les 4 mois qui suivent les récoltes de chaque campagne. Sur la base que 1kg de riz paddy génère 0.22 kg de balles (FAO, 1979), chaque décortiqueuse produit en moyenne 44 tonnes de balles de riz par an. Donc la production des 6 décortiqueuses est estimée à 264 tonnes par an.

### 2.5.2. Utilisation concurrentielle des balles de riz

Une enquête auprès de la population du Banzon sur l'utilisation des balles de riz, nous a révélé les utilisations alternatives suivantes :

- ✓ Fabrication de briques en banco, en effet, une infime quantité de balles de riz est mélangée au banco pour conférer une certaine résistance aux briques ;
- ✓ Engrais organique dans les champs, les balles de riz sont brûlées et les cendres résultantes épandues sur les champs ;
- ✓ Litière dans les plantations de bananes, les balles de riz sont versées sur les pieds de bananes pour limiter l'évaporation pendant la saison sèche ;
- ✓ Litière en aviculture, en effet, la balle de riz est transportée jusqu'à Bobo-Dioulasso pour couvrir les terrasses d'élevage des poules pondeuses et de races (viandes).

### 2.5.3. Evaluation du coût d'installation de l'unité de briquetage

Le coût d'installation de l'unité de briquetage pour une production à petite échelle s'évalue à hauteur de 125 200 FCFA (tableau 30).

**Tableau 30 : Coût d'installation de l'unité de briquetage**

Dépenses	Coûts (FCFA)
<b>La presse</b>	
Coût de fabrication initial	60 000
<b>Accessoire pour la presse</b>	
Pressoir en bois (piston compresseur)	3000
Moule en fer	2500
Tube central en PVC (pour 1m)	800
Disque en bois	500
<b>Accessoire pour la fabrication</b>	
Tasse à mesurer	2000
Bol pour mélange (2 bols)	2400
Sceau pour eau (2 )	1500
Marmite pour la préparation du liant	1250
Source de combustible (balles de riz)	0
Récipients de stockage des briquettes	15000
Broyeur de balles de riz	25000
<b>Total de dépenses</b>	<b>125200</b>

### 2.5.4. Evaluation du coût de production d'un kilogramme de briquettes

Le coût de production du kilogramme de briquettes varie en fonction du type de liant utilisé, de la nature de la matière première utilisée, mais aussi de la main d'œuvre.

D'autres paramètres tels que l'entretien de la presse et le remplacement des accessoires de la presse sont à prendre en compte. Deux personnes sont nécessaires pour le fonctionnement de la presse et produisant 50 briquettes par heure. Le temps de production d'une briquette est de 1 minute 20 secondes. La production estimée pour 8 heures de fonctionnement par jour et 25 jours de travail par mois est de 1,5 tonnes de briquettes, soit 12 tonnes de briquettes par an (en considérant une activité de 8 mois sur 12). Le coût de production du kilogramme de briquettes se compose comme suit :

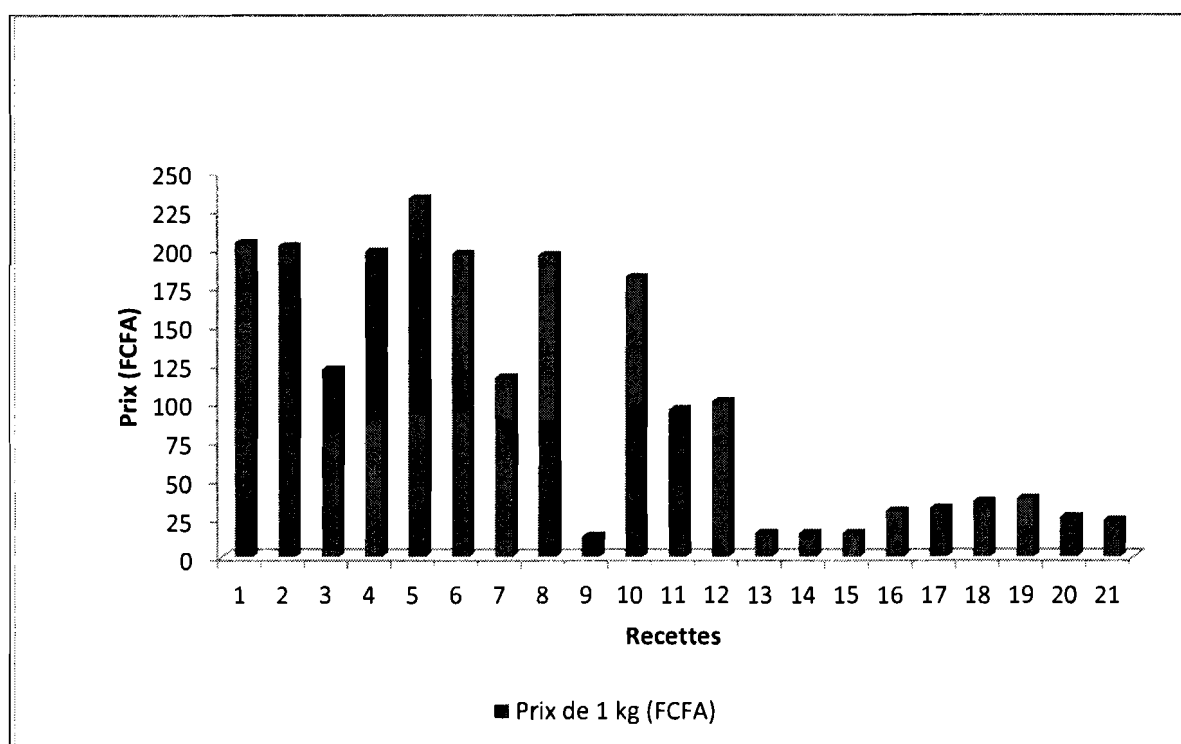
- ✓ frais de production d'un kilogramme de briquettes ;
- ✓ frais de maintenance de la presse et de ces accessoires ;
- ✓ main d'œuvre ;
- ✓ et de l'amortissement de la presse.

La durée de vie de la presse est estimée à 5 ans, ce qui donne un amortissement de 1FCFA / kg.

Chaque ouvrier sera payé à 20 000 FCFA / mois, ce qui correspond à une main d'œuvre de 8FCFA / kg. Les frais de maintenance de la presse et de ses accessoires sont estimés à 0,44FCFA/ kg.

➤ **Estimation du cout du kg de briquettes par recette.**

La quantité de briquettes fabriquée correspond à celle qui peut être faite avec le dernier moule en fer que nous avons fabriqué. Le nombre de briquettes par recette obtenu avec ce moule est de 10 et chaque briquette séchée pèse 200g. L'estimation est faite en fonction des 10 briquettes (figure 20).



**Figure 20: Évolution du prix de 1kg de briquettes en fonction des recettes**

Le prix de revient du kilogramme de briquette varie en fonction de la nature de la matière première et du type de liant utilisé. En effet le broyage des résidus et l'utilisation de l'huile augmentent considérablement le prix du kg de briquette. De même l'utilisation de la farine de maïs comme liant rend le prix de revient du kilogramme onéreux. Il varie de 14 FCFA / kg (recette n° 9) à 233 FCFA / kg (recette n°5). En tenant compte de la tenue des briquettes, ce prix varie entre 24 FCFA / kg (recette n°21) à 233 FCFA / kg (recette n°5). Dans l'optique de réduire les coûts de production des briquettes, nous prendrons uniquement en compte le coût le plus bas, c'est-à-dire les 24 FCFA / kg (figure20).



Si nous prenons en compte une marge bénéficiaire de l'unité de production de 11 fcfa / kg, le prix de vente à l'unité de production est de 35 FCFA / kg.

### **2.5.5. Compétitivité des briquettes par rapport aux combustibles traditionnels**

Les briquettes de balles de riz comparés au charbon de bois paraissent compétitives du point de vue prix, étant donné que le charbon de bois est vendu à (100 FCFA / kg) à Bobo et environ 60 FCFA / kg en milieu rural. Elles sont donc plus compétitives que le charbon de bois aussi bien en milieu urbain que rural. Les briquettes de balles de riz comparés au bois de feu semblent être peu compétitives en milieu rural vu la disponibilité du bois à des prix imbattables et voir même sans contribution monétaire. En milieu urbain, les briquettes de balles de riz paraissent peu compétitives vu la faible différence des prix (25 FCFA/kg de bois contre 35 FCFA/kg pour les briquettes).

## **III. Discussion**

### **3.1. Adoption et utilisation de foyers améliorés à balles de riz**

L'acceptation du foyer par la population de Bama s'explique par le fait de la raréfaction du combustible bois et surtout du développement de l'activité d'étuvage du riz à Bama. Le foyer à balles de riz est donc perçu par les femmes comme la solution palliative au problème de bois énergie. Mais l'utilisation du foyer n'est pas exempte de toutes contraintes.

En effet, il faut noter qu'après 1 heure d'activité le cylindre externe du four se réchauffe excessivement entraînant une combustion des balles de riz (écorces de riz) contenues dans le réservoir à balles. Cet état de fait provoque une perte inestimable des balles de riz et donc une perte conséquente d'énergie pour l'étuvage. Cela est lié à l'absence probable d'isolant thermique entre les deux cylindres.

Le dégagement de fumée constitue aussi un inconvénient majeur de l'usage du four à balles de riz par les étuveuses de riz. Ce dégagement de fumée s'explique par trois raisons essentielles :

- ✓ L'état d'humidité des balles de riz (écorces de riz) ; en fait, le manque crucial de balles de riz dans la commune de Bama amène les femmes à utiliser les balles de riz directement issues de la décortiqueuse sans attendre ni vérifier son état d'humidité. Pourtant nous sommes tous unanimes que juste après la récolte le riz n'est pas entièrement sec et contient toujours d'humidité; donc en utilisant des balles pas totalement sèches, on aura une obstruction de la combustion ; d'où le dégagement de fumée ;

- ✓ Le non maîtrise de l'utilisation du four par les femmes, nous avons constaté sur le terrain que certaines femmes ne savent pas utiliser convenablement le four. En effet la majeure partie des femmes ne savent pas l'utilité de chaque partie du four, pourtant chaque partie du four joue un rôle essentiel dans son fonctionnement. Elles ont tendance à remplir les balles de riz jusqu'à boucher les trous d'alimentation en air supérieurs du four, créant ainsi un état étouffant de la combustion ;
- ✓ La conception de certain four ne respecte pas les dimensions initiales que le GCIUS 2008 et BERE ont mis en place ; ce qui fait que les trous d'aération de la grille et du cylindre de combustion ne sont souvent pas adaptés à un apport optimal d'air dans le four , donc un manque d'air entrainant l'obstruction de la combustion.

Un autre inconvénient ayant attiré notre attention lors de nos enquêtes et de nos expériences sur le terrain est l'occupation entière de l'utilisatrice de four à balles de riz. Une fois que le feu est allumé, la femme ne peut plus s'occuper d'autre chose car non seulement la combustion est excessive et demande beaucoup de suivi afin que l'aliment ne se calcine ; mais aussi, le feu nécessite un entretien régulier de risque qu'il ne s'éteint. Pratiquement à chaque 03 minutes, il faut à l'aide d'une barre de fer secouer dans le réservoir à balles pour faire chuter les balles de riz dans le cylindre de combustion et secouer aussi le cylindre de combustion pour faire descendre les cendres dans le cendrier. Il faut également vider à chaque fois les cendres contenues dans le cendrier dans une brouette et les transporter hors du hall d'étuvage pour éviter de salir l'enceinte et de polluer le riz étuvé. Les images n°16 ; 17 ; 18 ; 19 ; 20 et 21 du annexe n°4 illustrent clairement l'aspect fastidieux de l'utilisation du four à balles riz.

La qualité du métal utilisé joue sur la durée de vie du foyer. En effet, les artisans afin de diminuer le coût de production du foyer et de réaliser des bénéfices, utilisent du métal qui ne résiste pas à la chaleur (tôle n°6 et 8). Lors de nos enquêtes, il ressort que le cylindre central est la première pièce vulnérable du four dû au fait qu'il est en contact direct et permanent avec les flammes, et à la mauvaise qualité de son métal. A l'issue d'une année de fonctionnement permanent du four, le cylindre central se détériore, mais si l'activité est modérée celui-ci peut atteindre deux ans. Donc la durée de vie du foyer dépend de son utilisation. Les images n°22 ; 23 et 24 de l'annexe n° 4 témoignent de la mauvaise qualité du métal utilisé dans la confection du foyer.

### 3.2. Teste d'ébullition de l'eau

Soulignons que pour un démarrage à froid, le taux brûlant qui indique la quantité de balles de riz consommée par minute est de 56g/mn pour le prototype1 contre 101 g / mn pour le prototype2, tous dépourvus d'isolant thermique

Dans le cas du démarrage à chaud, le taux brûlant décroît pour le prototype1 (41g/mn), mais augmente légèrement pour le prototype2 (117g/mn). En plaçant l'isolant thermique, on trouve des taux brûlant de 83g/ mn et 160g/mn respectivement pour le prototype1 et le prototype2. On constate que le taux brûlant augmente pour les deux types de foyers, engendrant des pertes de combustible de l'ordre de 48% pour le prototype1 et de 58% pour le prototype2.

Le temps d'ébullition spécifique (TES), qui mesure la vitesse du foyer à amener un litre d'eau de la température ambiante à la température d'ébullition, est de 5,13 mn / L pour le prototype1 sans isolant thermique et de 2,19 mn / L pour le prototype2 sans isolant; pour le démarrage à froid. Le TES du prototype1 est plus élevé que celui du prototype2 tous dépourvus d'isolant. Le petit foyer prend plus de temps que le grand foyer pour chauffer l'eau. En présence de l'isolant thermique, le TES est de 4mn /L pour le prototype1 et de 2,39 mn/ L pour le prototype2. Le petit foyer a un temps d'ébullition légèrement supérieur à celui du grand foyer. Ce qui est encourageant dans la mesure où des foyers améliorés à bois ont des temps d'ébullition de l'ordre de 20 à 36 mn / L pour un démarrage à froid (VITA, 1985).

Dans le cas du démarrage à chaud, les temps d'ébullition restent sensiblement égaux (4,13mn / L et 2,08mn / L respectivement pour les prototypes 1 et 2 dépourvus d'isolant). Mais on observe que la consommation de balles de riz augmente légèrement pour le prototype2 (3300g à 3570g) et décroît significativement pour le prototype1 (3200g à 1330g). Cela est dû au facteur vent qui est un paramètre dont dépend la combustion et impossible de contrôler dans les conditions des tests sur le terrain. L'impact du vent est plus élevé sur le prototype2 que sur le prototype1 vu la taille de celui-ci et le nombre important des trous d'aération (apport d'air en excès). En plaçant l'isolant thermique, cela n'a pas d'effet notable sur le temps d'ébullition spécifique car il demeure presque constant pour les deux foyers (3,10 mn / L et 2,31mn / L respectivement pour le prototype1 et le prototype2 sans isolant thermique).

La consommation spécifique des deux foyers décroît lorsqu'on passe du démarrage à froid au démarrage à chaud (250g / L à 130 g / L pour le prototype1 et de 172 g / L à 117g / L pour le prototype2) ; ce qui traduit une diminution de la consommation du foyer. Si la consommation spécifique décroît lors de la phase2 (démarrage à chaud), cela 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.

Elle décroît aussi avec l'isolant thermique lorsqu'on passe du démarrage à froid au démarrage à chaud (237g / L à 177g / L pour le prototype1 et de 270 g / L à 240 g / L pour le prototype2).

Une fois de plus, nous constatons que l'isolant thermique augmente la consommation du foyer ; elle passe de 130 g / L à 177 g / L pour le prototype1 et de 166 g / L à 240 g / L. Ce qui traduit clairement qu'il n'est pas adapté et cela pourrait être expliqué par le fait que l'argile utilisée ne correspondait à celle utilisée en poterie.

Pour la phase de mijotage, la consommation moyenne de balles de riz en absence d'isolant thermique est de 2530g pour le prototype1 et de 3670g pour le prototype2. Une fois l'isolant placé, cette consommation diminue pour le prototype1 (2300g), tandis qu'il augmente pour le prototype2 (5200g). Cette phase étant assimilée à une cuisson à longue durée, nous constatons que les quantités de balles de riz consommées par chaque foyer sont relativement élevées (51,11g/mn pour le prototype1 et 115,56g/mn pour le prototype2). Ce qui dénote une énorme perte d'énergie dans le transfert de chaleur par les deux foyers.

Cependant le rendement thermique du foyer sans isolant thermique est de 11,12% pour le prototype1 et de 18,04% pour le prototype2, pour un démarrage à froid. Ce rendement connaît une nette amélioration lors du démarrage à chaud, il passe à 23,6% pour le prototype1 et à 21,05% pour le prototype2. Avec l'isolant thermique, ce rendement augmente légèrement pour le prototype1 (12,56%), mais chute pour le prototype2 (9,73%) si on est en phase1 du test (démarrage à froid). En effet, il est beaucoup plus facile de minimiser les pertes d'énergies lorsque le foyer est de petite taille puisqu'à grande taille, certains paramètres (dimensions et nombres des trous d'aération, dimensions du réservoir à balles de riz, du cylindre de combustion, de la grille, etc.) deviennent incontrôlables. Le même constat est observé lors de la phase haute puissance (16,56% pour le prototype1 et 11,29% pour le prototype2).

En comparaison avec le foyer traditionnel trois pierres qui a un rendement thermique variant entre 12 à 14% (José et *al*, 1994), les deux foyers autorisent des gains respectifs de 5,36 et de 7,54%, respectivement pour les prototypes 1 et 2. Ce qui est très insignifiant en comparaison avec le foyer à biomasse de l'Inde ou « Chulha Navjyoti » qui économise 23,3% de combustibles (Béatrix et Dorsi, 1995).

Les deux foyers ont un rendement thermique moyen légèrement proche à 20% ; ce qui est relativement proche au rendement du foyer à balles de riz « Voila 2 rice husk stove » du Pérou qui est de 20% (Assureira, 2002).

Ce rendement thermique comparé à celui des autres foyers améliorés, tels que les foyers ronds Burkina mixte 23%, Ouaga métallique environ 24%, multimarmite environ 20 % (IRSAT/ GTZ, 2008) ;

le foyer à charbon black power avec un rendement thermique de 26 – 33% et au foyer ultra perfectionné Sazawa avec 44,3% de rendement (KIMBEMBE et *al*, 2007), prouve que la déperdition thermique est encore trop grande

### **3.3. Fabrication de brique de balle de riz**

La fabrication manuelle de briquettes à base de balles de riz rencontre des difficultés liées à la faible pression et à la disponibilité du liant. En effet, la principale limite à la production des briquettes de balles de riz dans notre site, est la disponibilité du liant (gommy) puisqu'on ne produit pas de manioc dans notre zone d'étude ; en plus le maïs étant une céréale constituant l'aliment de base de la population, l'utilisation de la farine de maïs comme liant ne saurait être acceptée par la population. Cet aspect avait déjà été signé par le CDI-CRA (1993), en stipulant que : « les liants constituent le principal inconvénient de ce procédé ». Il précise également que les liants doivent être disponibles et à moindre frais sur le lieu de densification ; ce qui n'est pas le cas pour notre site.

Les différentes briquettes confectionnées avec des balles de riz entières n'ont eu aucune tenue quel que soit le type de liant utilisé. Cela s'explique d'une part, par la nature de la balle de riz (teneur élevée en silice et cellulose) ; et d'autre part, par le fait que la pression développée par la presse est faible pour favoriser une élévation de la température des particules de balles de riz dans le moule, afin de provoquer des réactions de polymérisation. En effet, selon CETE- EPAVE et LBTP (1993), la balle de riz ne se comprime pas aisément, elle demande des pressions de l'ordre de 200 à 300 bars pour être comprimée sans liant.

Le test des liants révèle que quatre types de liant donnent de réelles satisfactions dans la confection des briquettes de balles de riz surtout avec les balles de riz broyées ou mélangées (broyées + entières). Il s'agit essentiellement des farines de maïs, de manioc (gommy) et des mélanges gommy + farine de maïs, gommy + tourteau de karité. Cela est dû au fait que la farine de maïs et de manioc contiennent toutes de l'amidon puisque plusieurs études attestent que l'amidon est bon liant lorsqu'il subit un chauffage (BELLAMY *et al*, 1984).

Les briquettes faites en se servant de la farine de pulpe de manioc comme liant ne tiennent pas. Cela pourrait être dû à la faible teneur en amidon (30%) en sucre (1%) de la pulpe de manioc.

De même celles utilisant l'argile comme liant n'ont eu aucune tenue ; et cela s'explique par le fait même de la qualité de l'argile. En effet le type d'argile qui était disponible gratuitement sur notre site d'étude, était impur puisqu'elle contenait une quantité assez conséquente de sable, ce qui réduit sa plasticité donc son aspect collant.

Afin de réduire significativement le coût de production des briquettes, nous optons pour le liant fait du mélange gommy + tourteau de karité. Avec ces liants on obtient des briquettes résistantes certes, mais un effet gênant que nous avons constaté est la friabilité des briquettes. Deux raisons justifient cet état de fait :

- ✓ L'utilisation de l'huile ; en effet, nous nous sommes servi de l'huile pour faciliter le démoulage de nos briquettes et pour augmenter le pouvoir calorifique des balles qui selon la littérature est faible (3200 – 4000 kcal/ kg). Mais d'un autre côté, l'huile rend les briquettes plus friables puisqu'elle ne possède aucune propriété adhésive et de plus diminue l'aspect collant du liant ;
- ✓ Et la granulométrie des résidus utilisés, le broyage des balles de riz étant fait soit à la main soit au moulin, nous n'obtenons pas de granulométrie homogène ; pourtant la théorie de densification suggère une granulométrie homogène pour permettre une bonne compaction des résidus.

La presse développe des pressions comprises entre 3 kg/ cm<sup>2</sup> et 2 kg/cm<sup>2</sup> lorsque le moule est placé respectivement à 14 cm et 30 cm du pivot du levier principal. Les briquettes obtenues lorsque le moule est à 30 cm, ont des densités comprises entre 0,29 et 0,42.

En comparaison, la pression de notre presse est inférieure à celle des presses manuelles à levier qui est comprise entre 5 à 15 kg/cm<sup>2</sup> (BELLAMY et al, 1984); mais sa pression s'élève à 6,5 kg/cm<sup>2</sup> lorsque le moule est placé à 5cm du point de rotation du levier principal. Certaines presses à levier plus performantes telles que les presses de marque COMBUSTARAM et TERSTARAM développent des pressions variant entre 60 à 90 kg/cm<sup>2</sup>. Nous pouvons améliorer ses performances en allongeant le levier secondaire jusqu'à 2 m et plaçant le moule à 5cm, ce qui fait passer la pression à 8kg/cm<sup>2</sup>. La capacité de production de la presse est de 10 kg/ heure pour deux adultes, soit 400 briquettes par jour, ce qui est relativement faible par rapport à la capacité de production des presses manuelles qui oscille entre 25 à 30kg/h. La presse TERSTARAM atteint une production variant entre 8000 et 9000 briquettes par jour soit 500 et 1000 kg/jour. Pour augmenter la production de notre presse, il serait indéniable d'employer jusqu'à 04 personnes.

Pour la combustion des briquettes, l'allumage direct est impossible, il faut au préalable préparer un feu pour amorcer la combustion. Ce qui est d'ailleurs normale, puisque des études antérieures (CDI-CRA, 1993 ; CETE-EPAVE et LBTP, 1986) sur les briquettes avaient signalés cet aspect ; de plus, les autres combustibles solides comme le bois ou le charbon nécessitent toujours l'usage d'autres sources d'énergie (pétrole, brindilles, carton, etc.) pour amorcer leur combustion.

Une fois le feu installé, les briquettes brûlent en produisant dès le début, de faibles quantités de fumées blanches souvent épaisses et cela ne dure qu'une à trois minutes avant de céder la place à des hautes flammes. Cet aspect est aussi constaté pour la plupart des briquettes de biomasse obtenues à basses pressions par Grover et Mishra (1995), IEPF (2000).

La durée des flammes est fonction du type de briquette, donc de la nature du liant utilisé. La température maximale atteinte par les flammes est de 675 °C. La combustion est fonction de la densité, de la hauteur des briquettes et de la nature du liant.

En effet, les briquettes denses faites de balles broyées ne donnent pas une bonne combustion, elles se noircissent et produisent beaucoup de fumées blanches et épaisses (photo l). La combustion s'obstrue et le feu s'éteint rapidement ; par contre les briquettes moins denses brûlent bien en produisant de faibles quantités de fumées au début de la combustion (photos k et m). Donc la densité des briquettes affecte leur combustion.

Certains auteurs comme Chin Chin et *al* (2000) ont montré que plus la densité des briquettes est faible, plus le taux de combustion est plus grand et la combustion est rapide, comparé aux briquettes à plus grande densité.

Les briquettes ayant une hauteur comprise entre 5 à 7,5 cm sont les plus aptes à la combustion comparées à celles dont la hauteur est comprise entre 9 et 13 cm. La combustion des briquettes dégage une certaine odeur qui serait lié à la nature même des balles de riz ou à la nature du liant utilisé ; pourtant, selon le CDI-CRA (1993), les liants utilisés pour la densification ne doivent pas entraîner de dégagement toxique ou odorant lors de la combustion.

Le prix du kg de briquette étant de 35 FCFA, les briquettes sont plus compétitives que le charbon de bois en ville, mais peu compétitives en milieu rural. Comparé au bois, les briquettes sont peu compétitives tant en milieu rural que urbain. Le prix des briquettes étant relativement élevé que celui des combustibles domestiques ; il serait utopique de dire que les briquettes peuvent servir définitivement comme combustibles alternatifs au bois et charbon de bois. D'autres études (Grover et Mishra. 1995 ; CDI-CRA.1993 ; BELLAMY et *al*, 1984 ; IEPF, 2000 ; USAID, 2010), avaient confirmé cela et souligné que c'est d'ailleurs un facteur majeur limitant le succès et la diffusion de ce type de combustible.

Ce prix comparé avec les prix des briquettes et charbon de balles de riz de la société DELTA 2000, qui sont respectivement 40 FCFA et 60 FCFA (Groupement d'Ingénieurs Conseil du Sahel, 1998), prouve que notre procédé de densification est moins coûteux. Sur le plan environnemental et écologique, nous pouvons dire que les briquettes sont économiques dans la mesure où les briquettes permettent de débarrasser de la nature de ces résidus jadis encombrants et polluant et préserver les forêts contre la déforestation.

Son introduction dans le monde rural va sans doute prendre du temps et se heurtera à des barrières liées aux habitudes culinaires et à la psychologie du monde paysan qui semble être peu septique à la modernisation. Cependant avec des efforts de promotion et de sensibilisation, ce combustible trouvera vite sa place en milieu urbain surtout avec la raréfaction du bois et la cherté galopante de la vie.



## CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

Au terme de cette étude, il est apparu que la balle de riz pouvait faire l'objet d'une valorisation énergétique. Cette valorisation énergétique se fait de deux manières différentes :

- ✓ combustion directe dans un foyer amélioré conçu à cet effet,
- ✓ ou par production à basse pression de briquettes de balles de riz à l'aide d'une presse manuelle à levier.

Pour ce qui concerne l'évaluation des performances du foyer (four) à balles de riz, cette étude a montré que le foyer est accepté par la totalité de la population de Bama. En effet, 82% de cette population l'utilise effectivement. Le prix du four variant de 12 500 FCFA pour le prototype1 à 25 000 FCFA pour le prototype2, demeure le seul handicap à la diffusion du four. Le foyer demeure cependant méconnu par la population de Banzon, excepter quelques femmes de l'Union des Etuves et Transformatrices du Riz de Banzon. .

Sur le plan technique, le test d'ébullition a révélé que le prototype1 a un rendement thermique moyen de 17,36 % contre 19,54 % pour le prototype2, avec des taux brûlant de l'ordre de 48,5 g / mn et 109 g / mn respectivement pour le prototype1 et 2. Les temps d'ébullition spécifique varient entre 2,39 mn / L pour le prototype2 et 4 mn / L pour le prototype1 ; correspondant en moyenne à des consommations spécifiques corrigées par la température respectives de 183,5 g / L et 197 g / L. Cette étude a permis également de montrer que l'isolant thermique utilisé pour augmenter le rendement thermique n'est pas adapté.

Toutefois le rendement thermique trouvé n'est pas satisfaisant pour un foyer amélioré en ce sens que celle-ci est inférieure à 20% pour les deux prototypes. Des défaillances techniques demeurent toujours sur la conception du four ; en plus, sa diffusion n'est pas effective dans les zones du Burkina possédant des aménagements hydro-agricoles.

Le manque de matériels techniques et de moyens financiers n'a pas permis de faire une étude comparée des deux technologies valorisant énergétiquement les balles de riz ; mais toutefois, les deux technologies sont les bienvenues car les femmes n'ayant pas les moyens pour acquérir le four pourront se servir des briquettes pour la cuisine. Ce qui contribue à endiguer la déforestation et à créer de nouvelles sources de revenus pour les étuveuses, et d'emplois supplémentaires pour la population.

Quant - à la confection des briquettes à partir des balles de riz, l'étude a permis de montrer la possibilité de production à basse pression de briquettes de balles de riz à l'échelle du village. Il existe d'énormes potentialités de production de briquettes de balles de riz dans cette zone vu l'abondance de balle de riz (production du riz en double campagne et abondance de décortiqueuses).

Il ressort de notre étude la possibilité de produire manuellement des briquettes de balles de riz dans le contexte villageois vue le faible niveau de technicité et d'investissement requis. Cependant cela ne peut être fait sans l'utilisation de liant et d'une presse à levier pour assurer une agglomération efficace des briquettes. Cette presse à double levier développant des pressions variant entre  $2 \text{ kg/cm}^2$  à  $6,5 \text{ kg/cm}^2$  permet d'obtenir des briquettes de densité sensiblement égale à 0,5 et donnant des résultats satisfaisants de combustion. Elle pourrait servir à la densification d'autres résidus tels la sciure de bois, les déchets de papiers et la poussière de charbon.

Du point de vu prix, ces briquettes semblent être plus compétitives que le charbon de bois et le bois en ville (surtout en saison hivernale) ; et inversement en milieu rural en raison de la proximité des populations rurales aux ressources ligneuses et de la faible monétarisation des ces ressources. Les principales contraintes de cette activité sont :

- la disponibilité de liant (farine de manioc) dans la zone, puisque la culture du manioc est éphémère dans la zone ;
- l'irrégularité de granulométrie de la matière première liée à l'absence de broyeur des balles de riz.

A l'issus de notre étude, nous formulons les recommandations suivantes :

- ✓ A l'endroit des partenaires financiers :
  - D'appuyer effectivement les travaux d'optimisation du rendement thermique du four ;
  - De soutenir la diffusion du four dans les plaines rizicoles du Burkina et dans la sous région ;
  - De soutenir la valorisation énergétique des résidus de culture et des déchets urbains ;
  - De faire en sorte que la fabrication manuelle de briquettes soit d'actualité au Burkina.
- ✓ A l'endroit des responsables techniques du four :
  - De procéder à la formation des artisans locaux sur la confection des fours ;
  - D'œuvre à la standardisation des dimensions du four par la mise en place d'une fiche technique pour la confection du four ;

- De procéder à la formation des utilisatrices du four pour une utilisation efficiente du four ;
  - De mobiliser des fonds pour la recherche d'optimisation des performances techniques du four.
- ✓ A l'endroit des utilisateurs des deux technologies :
- De faire preuve d'utilisation efficiente du four et de participer à sa vulgarisation (surtout dans la zone de Banzon) ;
  - De s'approprier de la technologie de briquetage et de faire une étude de marché avant l'implantation de l'unité de briquetage ;
  - De collaborer ouvertement pour la satisfaction de leurs besoins.

La recherche d'optimisation du rendement thermique du four peut se faire par :

- ✓ La standardisation des dimensions du four et la recherche d'un isolant thermique adéquat. On pourrait se servir des cendres de balles de riz avec de l'argile utilisée en poterie (confection d'une plaque en céramique) ;
- ✓ La recherche de la diminution des fuites de flammes en temps de vent. Cela est faisable en jouant sur la hauteur du cylindre externe de sorte à ce que la marmite puisse être encastrée dans le cylindre externe;
- ✓ De trouver une solution à la chute des braises du cylindre de combustion. La mise en place d'un système de double grille dont une fixe et l'autre rotatif pourrait résoudre ce problème.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

**ADAM-YEBOUA N. 2000.** Etude d'une fumure à base de Burkinaphosphate sur le riz irrigué à la Vallée du Kou , dans l'Ouest du Burkina Faso. Mémoire de fin cycle d'ingénieur du développement rural. Institut du Développement Rural (IDR). Université Polytechnique de Bobo-dioulasso (UPB). 88p.

**Assureira E. 2002.** Rice husk – an alternative fuel in Perú. In Boiling Point No 48. 6/11/02. p35.

**Bailis R., Ogle D., Maccarty N., Smith K. R. and Rufus E., 2007.** The water boiling test (WBT). Household energy and health, Program Shell Foundation. 38p. Disponible sur : <http://www.fao.org/docrep/p3350f/p3350f03.htm> [Date d'acquisition: 18 octobre 2011]

**Béatrix W. et 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, Frankfurt 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. Algérie. 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). Université Polytechnique de Bobo-dioulasso (UPB). 84p.

**BERE S. F. et GCIUS. 2008.** Conception et réalisation d'un four (foyer) à écorces (balles) de riz. Rapport de Recherche. 29p.

**BLIN. J. 2005.** La biomasse : Ressource énergétique. Formation et sensibilisation à la biomasse énergie. Ouagadougou le 29 11 2005. CIRAD. 58p.

**CETE-APAVE et LBTP. 1986.** Valorisation énergétique des résidus agricoles. Conseil de l'Entente / Secrétariat Administratif, Fond d'Aide et de Coopération de la République Française. 181p.

**CDI et CRA. 1993.** Briquettes à base de déchets végétaux. Centre pour le Développement Industriel. ACP-CCE. CRA Gembloux. Les guides du CDI. Serie technologies N°1. 61p.

**Chin, O. C. and Siddiqui K. M. 2000.** Characteristics of some biomass briquettes prepared under modest die pressures. In Biomass and Bioenergy 18, pp 223–228. Disponible sur : <http://www.sciencedirect.com/journal> [Date d'acquisition: 01 octobre 2011].

**CIR-B. 2008.** L'élaboration d'un plan d'assainissement des principales coopératives pour une relance durable de la production rizicole au Burkina Faso. Plan d'action des plaines rizicoles de Bama et Banzon. Rapport provisoire. 77p.

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

**DEMBELE Y. 2009.** Les capacités de recherche au Burkina faso. Atelier sur les enjeux de l'initiative rizicole Cotonou (Benin).

**Devendra C. 1988.** Forage supplements : Nutrition significance and utilization for draught, meat and milk production. In proceedings of the second world Buffalo. Congress, vol2. 12- 17 december 1988, Indian Council of Agricultural Research (ICAR), New Delhi, India. pp 409-423.

**FAO. 1993.** Improved solid biomass burning cookstoves: a development manual. Regional wood energy development program in Asia, GCP/RAS/154/NET. Food and Agriculture Organization of United Nations, Bangkok, pp.59-68.

**FAO . 1999.** Perspectives du secteur forestier mondial : Incidence des tendances futures du marché des produits ligneux sur la gestion durable des forêts. Quatorzième session du comité des forêts. Point 6 de l'ordre du jour provisoire. Disponible sur le site <http://www.fao.org/docrep/meeting/x0329f.htm>. Consulté le 18 / 01 / 2012

**FAO.1979.** Agricultural residues : Quantitative Survey. Agricultural Services Bulletin FAO, Rome , 1979. p9.

**Gerald L. et Marcia G. 1989.** Manuel d'énergie domestique. Memento et guide intérimaire. Document technique numéro 67F de la Banque Mondiale. 211p.

**GUINEBAULT A. 1997.** L'énergie en milieu rural en Afrique. In énergie et développement durable en milieu rural en Afrique : 10 fiches pour comprendre les besoins énergétiques, pour connaître les solutions pouvant améliorer la situation des populations, pour maîtriser les critères techniques, économiques et sociaux de prise de décision et pour utiliser au mieux les énergies renouvelables. Dossier pédagogique. GERES. ASSOCIATION LOI 1901.

**GUINKO S. 1984.** Végétation de Haute Volta. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Bordeaux III (France), 145p.

**GUIRE A. 2011.** Criblage variétal du riz pour la tolérance à la toxicité ferreuse. Mémoire de fin cycle d'ingénieur du développement rural. Institut du Développement Rural (IDR). Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso (UPB). 66p.

**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. 1995.** Proceedings of the International Workshop on Biomass Briquetting NEW DELHI, INDIA (3-6 APRIL 1995). Regional Wood Energy Development Programme in Asia GCP/RAS/154/NET. Report No.23. FAO, Bangkok Aptil 1996. 193p

**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 Aptil 1996. 48p

**Hassan A. 2010.** Biomass briquetting in Sudan: A feasibility study. Women's refugee commission of United States Agency for International Development. 95p

**Heino V. 2003.** Small Scale Briquetting and Carbonisation of Organic Residues for Fuel. In GTZ – infogate. 12p.

**HERAIL A. 2006.** Study about biomass waste in Cambodia and processing them as alternative fuels. **Internship for bachelor degree**, from 6th March to 30th June 2006. Digital publication on July 2006. 55p.

**IEPF. 2000.** Pour une gestion durable de la biomasse-énergie. In Liaison Energie-Francophonie article numéro 47 – 2<sup>e</sup> trimestre 2000. 47p.

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

**ISND. 2005.** Eenquête annuelle sur les conditions de vie des ménages au burkina Faso.

**ISND. 2007.** Burkina Faso en chiffres, Données synthétique. Ministère de l'économie et des finances. Edition 2007. 8p.

**Jean – Paul M. 2000.** La question énergétique au Sahel. Éditions KARTHALA et IRD, 1999. 173p.

**José C., Pascal C., Ha Chu Chu, philippe G., Paul C., Smaïl K., Corinne M., Arthur R., Yves S., Youba S., Philippe T., Louis-François V., Pierre V. 1994.** Guide biomasse-énergie. IEPF-ADEME- CQVB. Editions ACADEMIA. Collection Etudes et filières. 317p.

**KABORE H. 2008.** Analyse spatio-temporelle de la disponibilité en biomasse du Burkina Faso. Master Pro M2 en Système d'information et Informatique Normal (SIIN). Université de Picardie Jules Verne.62p.

**KABORE P.et ZONON A. (pas de date).** Bilan énergétique et maîtrise de l'énergie au Burkina Faso : connaissances pour le développement. pp 127- 148. Disponible sur le site <http://www.rgcb.capes.bf/IMG/connaitssances3.chap7>. Consulté le 28/11/2011.

**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 [http : www.sesec.org/pdf/8/SESEC8\\_koutaba.pdf](http://www.sesec.org/pdf/8/SESEC8_koutaba.pdf). Consulté le 15 / 01/ 2012.

**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.

**LOUZOLO-KIMBEMBE P., VOUMBO M. L. , MISSETETE A. R., MANANGA S. 2007.** Amélioration des performances d'un foyer métallique pyramidal à charbon de bois. Annales de l'Université Marien NGOUABI, 2007 ; 8 (4) : 156-169 Sciences et Techniques ISSN : 1815 – 4433. 14p

**Matthew O., David S., Chris D. et Morten P. 2002.** Les options en matière de cuisson des aliments dans les situations liées aux réfugiés. UNHCR - Unité de l'environnement, Section des services de l'environnement et de l'ingénierie. 49p.

**Ministère des Mines des Carrières et de l'Energie, 2008.** Vision 2020 de l'accès aux services énergétiques modernes au Burkina Faso. Projet MEPRED Elaboration du Livre Blanc National. 89p.

**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/esa/agenda21/natinfo:countr/burkfaso/index.htm](http://www.un.org/esa/agenda21/natinfo:countr/burkfaso/index.htm). Consulté le 25 / 08 / 2011.

**OTA. 1980.** Energy from biological Processes. Congress of United States Office of Technology Assessment. July 1980. 201p.

**OUEDRAOGO K., SOMDA J., TAPSOBA I. et NIANOGO A. J. 2006.** Energie traditionnelle au Burkina Faso : Etudes sur le bois énergie. UICN, 2006.195p.

**PERACOD / GTZ. 2006.** Etude finale sur la faisabilité technico-économique du développement d'une filière de valorisation du *Typha australis* en combustible domestique par la technologie de carbonisation « 3fûts » dans le delta du fleuve Sénégal. 23p.

**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

**Réseau Mixte – Technologies/ Biomasse. 2008.** Produire, mobiliser et valoriser durablement la biomasse en énergie. Kit pédagogique. Ministère de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Pêche. France. 138p.

**SANOGO O. 2005.** Procédés et technologies matures pour la production d'énergie à partir de la biomasse. Atelier de formation BEPITA – Koamboinsé – 1<sup>er</sup> Décembre 2005. 30p.

**SANOGO O. 2008.** Les Foyers améliorés au Burkina Faso «*Le rôle de la recherche scientifique*». Conférence MESWAD 26 - 27 Mars 2008 Dakar, Sénégal. 14 p.

**SANON C. G. 2003.** Contribution à la caractérisation des circuits de commercialisation, de transformation et distribution du riz local dans la zone ouest du Burkina Faso : cas de la Vallée du Kou et de N'Dorola Touélé. Mémoire de fin d'études. Institut Polytechnique Rural de Formation et de Recherche Appliquée (IPR/ IFRA). République du Mali. 63p.

**SANON Z. L. 1995.** Inventaire et dynamique de quelque espèces de poissons dans la réserve de la biosphère de la marre aux hippopotames et dans le lac de vallée du Kou. Mémoire de fin cycle d'ingénieur du développement rural. Institut du Développement Rural (IDR). Université Polytechnique de Bobo-dioulasso (UPB). 80p

**UEMOA. 2006.** Etude sur le développement « Ethanol / Guel » comme énergie de cuisson dans l'espace UEMOA. Rapport provisoire du projet n°004 / 2005 / CR / COM / UEMOA. 158p.

**VITA, 1985.** Testing the efficiency of wood burning cookstoves: Provisional internal standards, volunteers in Technical assistance. Arlington, VA. P. 76. 66p.



## **ANNEXES**

**Annexe 1 : Photos du matériel utilisé pour le testes d'ébullition de l'eau**



Foyer a balles de riz prototype2 conçu en 2008.



Prototype2+ marmite n15 + gobelet de 1litre



Protoype1 + marmite n 6 + gobelet de 1litre



Balance pour les pesées



Gants de protection



Ruban métrique



Briquet pour allumage



Chronomètre



Eau en ébullition



Température d'ébullition



Eau a 1/3 du volume de la marmite



Morceaux de carton pour allumage



Fiches de notation



Support de maintien du thermocouple



Thermocouple numérique



Gobelet de 1litre pour les mesures

## Annexe 2 : Produits issus du décortiquage du riz paddy et atelier de confection du foyer a balles de riz.



Grain de riz decortiquee



Son de riz



Balles de riz



Stock de balles de riz à Banzon



Balles de riz prisées à Bama



Atelier de fabrique du foyer a balles de riz

## Annexe 3 : Résultats des mesures directes des tests d'ébullition de l'eau

Tableau 1 : Résultats des mesures de la première phase pour le foyer petit format sans plaquette d'argile.

Etat initial				Etat final			
Variables	Test n°1	Test n°2	Test n°3	Variables	Test n°1	Test n°2	Test n°3
P (kg)	3	3	3	P (kg)	3	3	3
P <sub>cl</sub> (kg)	13,6	13,6	13,6	P <sub>cf</sub> (kg)	13,4	13,4	13,2
f <sub>cl</sub> (kg)	15,2	9,8	3,8	f <sub>cf</sub> (kg)	13,8	6,6	0,6
t <sub>cl</sub>	15h 50mn	06h 24mn	09h 44mn	t <sub>cf</sub>	16h 31mn	07h 09mn	10h 34mn
T <sub>cl</sub> (°c)	29,9	22,5	28,9	T <sub>cf</sub> (°c)	99,3	98,3	97,5
				P <sub>ce</sub> (kg)	0,8	0,8	0,8

Avec :

P = masse de la marmite vide avec couvercle

f<sub>cl</sub> = masse initiale de balles de riz

f<sub>cf</sub> = masse finale de balles de riz

t<sub>cl</sub> = temps initial du test

$t_{cf}$  = temps final du test

$T_{ci}$  = température initiale de l'eau

$T_{cf}$  = température finale de l'eau

$P_{ce}$  = masse de cendre résultant du test

**Tableau 2 : Résultats des mesures de la première phase pour le foyer petit format avec plaquette d'argile comme isolant thermique.**

Etat initial				Etat final			
Variables	Test n°1	Test n°2	Test n°3	Variables	Test n°1	Test n°2	Test n°3
<b>P (kg)</b>	3	3	3	<b>P (kg)</b>	3	3	3
<b>P<sub>ci</sub> (kg)</b>	13,6	13,6	13,6	<b>P<sub>cf</sub> (kg)</b>	13	13,2	13,2
<b>f<sub>ci</sub> (kg)</b>	17	9,4	4,4	<b>f<sub>cf</sub> (kg)</b>	14,8	7,8	2,6
<b>t<sub>ci</sub></b>	13h00mn	17h 32mn	21h 09mn	<b>t<sub>cf</sub></b>	14h 47mn	17h 57mn	21h 36mn
<b>T<sub>ci</sub> (°c)</b>	33,2	29,7	25,9	<b>T<sub>cf</sub> (°c)</b>	97,1	99,4	98,3
				<b>P<sub>ce</sub> (kg)</b>	0,5	0,4	0,5

**Tableau 3: Résultats des mesures de la première phase, pour le prototype2 sans isolant**

Etat initial				Etat final			
Variables	Test n°1	Test n°2	Test n°3	Variables	Test n°1	Test n°2	Test n°3
<b>P (kg)</b>	7kg	7kg	7kg	<b>P (kg)</b>	7kg	7kg	7kg
<b>P<sub>ci</sub> (kg)</b>	28,6kg	28,6kg	28,6kg	<b>P<sub>cf</sub> (kg)</b>	25,8kg	27,6kg	28,2kg
<b>f<sub>ci</sub> (kg)</b>	17kg	12,6kg	18kg	<b>f<sub>cf</sub> (kg)</b>	13,9kg	7,8kg	15,2kg
<b>t<sub>ci</sub></b>	18h 32mn	15h 29mn	06h 56mn	<b>t<sub>cf</sub></b>	19h 08mn	16h 08mn	07h 26mn
<b>T<sub>ci</sub> (°c)</b>	28,7°C	30,4°C	22,5°C	<b>T<sub>cf</sub> (°c)</b>	99,2°C	99,0°C	99,3°C
				<b>P<sub>ce</sub> (kg)</b>	0,8kg	1,4kg	0,8kg

**Tableau 4 : Résultats des mesures effectuées sur le prototype2 munie d'isolant thermique**

Etat initial				Etat final			
Variables	Test n°1	Test n°2	Test n°3	Variables	Test n°1	Test n°2	Test n°3
<b>P (kg)</b>	7	7	7	<b>P (kg)</b>	7	7	7
<b>P<sub>ci</sub> (kg)</b>	28,6	28,6	28,6	<b>P<sub>cf</sub> (kg)</b>	28,2	27,5	28
<b>f<sub>ci</sub> (kg)</b>	11,4	12,8	15,7	<b>f<sub>cf</sub> (kg)</b>	7	6	10,2
<b>t<sub>ci</sub></b>	08h 20mn	12h 14mn	15h 55mn	<b>t<sub>cf</sub></b>	08h 48mn	13h00mn	16h 25mn
<b>T<sub>ci</sub> (°c)</b>	27,5	28,3	29,9	<b>T<sub>cf</sub> (°c)</b>	99,1	96,4	98,2
				<b>P<sub>ce</sub> (kg)</b>	1	1,8	

**Tableau 5 : Résultats des mesures réalisées sur le prototype1 sans isolant thermique (phase2)**

Etat initial				Etat final			
Variables	Test n°1	Test n°2	Test n°3	Variables	Test n°1	Test n°2	Test n°3
<b>P (kg)</b>	3	3	3	<b>P (kg)</b>	3	3	3
<b>P<sub>ci</sub> (kg)</b>	13,6	13,6	13,6	<b>P<sub>cf</sub> (kg)</b>	13,4	13	13,2
<b>f<sub>ci</sub> (kg)</b>	13,8	6,6	1,8	<b>f<sub>cf</sub> (kg)</b>	12,2	5,8	0,2
<b>t<sub>ci</sub></b>	16h 48mn	07h 13mn	10h 47mn	<b>t<sub>cf</sub></b>	17h 18mn	07h 39mn	11h 28mn
<b>T<sub>ci</sub> (°c)</b>	29,7	25,9	26,6	<b>T<sub>cf</sub> (°c)</b>	98,5	99,0	99,3
				<b>P<sub>ce</sub> (kg)</b>	0,7	0,7	0,6

**Tableau 6 : Mesures enregistrées sur le prototype1 avec l'isolant thermique (phase2)**

Etat initial				Etat final			
Variables	Test n°1	Test n°2	Test n°3	Variables	Test n°1	Test n°2	Test n°3
<b>P (kg)</b>	3	3	3	<b>P (kg)</b>	3	3	3
<b>P<sub>ci</sub> (kg)</b>	13,6	13,6	13,6	<b>P<sub>cf</sub> (kg)</b>	13,4	13,0	13
<b>f<sub>ci</sub> (kg)</b>	14,8	7,8	2,6	<b>f<sub>cf</sub> (kg)</b>	12,4	6,4	1
<b>t<sub>ci</sub></b>	14h 47mn	18h 06mn	21h 45mn	<b>t<sub>cf</sub></b>	15h 17mn	18h 30mn	22h 11mn
<b>T<sub>ci</sub> (°c)</b>	29,4	30,4	26,8	<b>T<sub>cf</sub> (°c)</b>	98,7	99,3	98,9
				<b>P<sub>ce</sub> (kg)</b>	0,4	0,45	0,4

**Tableau 7: Résultats des mesures sur le prototype2 en l'absence d'isolant thermique (phase2)**

Etat initial				Etat final			
Variables	Test n°1	Test n°2	Test n°3	Variables	Test n°1	Test n°2	Test n°3
<b>P (kg)</b>	7	7	7	<b>P (kg)</b>	7	7	7
<b>P<sub>ci</sub> (kg)</b>	28,6	28,6	28,6	<b>P<sub>cf</sub> (kg)</b>	26,2	27,6	26,7
<b>f<sub>ci</sub> (kg)</b>	13,9	7,8	15,2	<b>f<sub>cf</sub> (kg)</b>	10,8	4,2	12
<b>t<sub>ci</sub></b>	19h 25mn	16h 21mn	07h 40mn	<b>t<sub>cf</sub></b>	19h 48mn	16h 54mn	08h 10mn
<b>T<sub>ci</sub> (°c)</b>	30,1	31,4	28,6	<b>T<sub>cf</sub> (°c)</b>	98,7	99,3	99,3
				<b>P<sub>ce</sub> (kg)</b>	1	0,6	1

**Tableau 8: Résultats des mesures réalisés sur le prototype2 avec isolant thermique (phase2)**

Etat initial				Etat final			
Variables	Test n°1	Test n°2	Test n°3	Variables	Test n°1	Test n°2	Test n°3
<b>P (kg)</b>	7	7	7	<b>P (kg)</b>	7	7	7
<b>P<sub>ci</sub> (kg)</b>	28,6	28,6	28,6	<b>P<sub>cf</sub> (kg)</b>	27,6	26,8	28,2
<b>f<sub>ci</sub> (kg)</b>	7	6	10,2	<b>f<sub>cf</sub> (kg)</b>	2,2	0,6	5,5
<b>t<sub>ci</sub></b>	09h 08mn	13h 14mn	16h 36mn	<b>t<sub>cf</sub></b>	09h 36mn	13h 54mn	17h 04mn
<b>T<sub>ci</sub> (°c)</b>	26,7	37,9	32,1	<b>T<sub>cf</sub> (°c)</b>	97,8	96,7	99,1
				<b>P<sub>ce</sub> (kg)</b>	1,6	2,4	2,6

**Tableau 9: Mesures effectuées sur le prototype1 sans isolant thermique (phase3)**

Etat initial				Etat final			
Variables	Test n°1	Test n°2	Test n°3	Variables	Test n°1	Test n°2	Test n°3
<b>P (kg)</b>	3	3	3	<b>P (kg)</b>	3	3	3
<b>P<sub>ci</sub> (kg)</b>	13,6	13,6	13,6	<b>P<sub>cf</sub> (kg)</b>	12	11,7	12
<b>f<sub>ci</sub> (kg)</b>	12,2	5,8	3,2	<b>f<sub>cf</sub> (kg)</b>	9,6	3,8	0,2
<b>t<sub>ci</sub></b>	17h 59mn	08h 00mn	10h 48mn	<b>t<sub>cf</sub></b>	18h 44mn	08h 45mn	12h 33mn
<b>T<sub>ci</sub> (°c)</b>	99,0	99,4	99,3	<b>T<sub>cf</sub> (°c)</b>	97,1	97,5	97,4
				<b>P<sub>ce</sub> (kg)</b>	0,9	0,9	0,6

**Tableau 10 : Mesures réalisées sur le prototype1 contenant l'isolant thermique (phase3)**

Etat initial				Etat final			
Variables	Test n°1	Test n°2	Test n°3	Variables	Test n°1	Test n°2	Test n°3
<b>P (kg)</b>	3	3	3	<b>P (kg)</b>	3	3	3
<b>P<sub>ci</sub> (kg)</b>	13,6	13,6	13,6	<b>P<sub>cf</sub> (kg)</b>	11,8	12,3	11,9
<b>f<sub>ci</sub> (kg)</b>	12,4	6,4	2,4	<b>f<sub>cf</sub> (kg)</b>	9,5	4,4	0,4
<b>t<sub>ci</sub></b>	15h 30mn	18h 50mn	22h 30mn	<b>t<sub>cf</sub></b>	16h 15mn	19h 35mn	23h 15mn
<b>T<sub>ci</sub> (°c)</b>	99,3	99,6	99,4	<b>T<sub>cf</sub> (°c)</b>	99,0	99,8	99,7
				<b>P<sub>ce</sub> (kg)</b>	0,8	0,4	0,4

**Tableau 11: Mesures réalisées sur le prototype2 sans isolant thermique (phase3)**

Etat initial				Etat final			
Variables	Test n°1	Test n°2	Test n°3	Variables	Test n°1	Test n°2	Test n°3
<b>P (kg)</b>	7	7	7	<b>P (kg)</b>	7	7	7
<b>P<sub>ci</sub> (kg)</b>	28,6	28,6	28,6	<b>P<sub>cf</sub> (kg)</b>	26,4	25,4	25,6
<b>f<sub>ci</sub> (kg)</b>	10,8	4,2	12	<b>f<sub>cf</sub> (kg)</b>	7,2	0,4	8,4
<b>t<sub>ci</sub></b>	20h 03mn	17h 02mn	08h 39mn	<b>t<sub>cf</sub></b>	20h 48mn	17h 49mn	09h 24mn
<b>T<sub>ci</sub> (°c)</b>	99,3	99,4	99,7	<b>T<sub>cf</sub> (°c)</b>	98,5	99,7	98,5
				<b>P<sub>ce</sub> (kg)</b>	1,2	0,8	1,2

**Tableau 12 : Mesures effectuées pour le prototype2 avec isolant thermique (phase3)**

Etat initial				Etat final			
Variables	Test n°1	Test n°2	Test n°3	Variables	Test n°1	Test n°2	Test n°3
<b>P (kg)</b>	7	7	7	<b>P (kg)</b>	7	7k	7
<b>P<sub>ci</sub> (kg)</b>	28,6	28,6	28,6	<b>P<sub>cf</sub> (kg)</b>	25,6	25,6	24,5
<b>f<sub>ci</sub> (kg)</b>	18,6	20,6	5,5	<b>f<sub>cf</sub> (kg)</b>	12,8	15,7	0,6
<b>t<sub>ci</sub></b>	10h 08mn	14h 23mn	17h 17mn	<b>t<sub>cf</sub></b>	10h 53mn	15h 08mn	18h 02mn
<b>T<sub>ci</sub> (°c)</b>	99,5	99,1	99,7	<b>T<sub>cf</sub> (°c)</b>	97,0	98,1	96,8
				<b>P<sub>ce</sub> (kg)</b>	1,1	1,4	1,4



**Annexe 4 : Modifications apportées sur le foyer et faiblesses de fonctionnement.**



Photo n°1 : Foyer multifonctionnel (fonctionnant marmites et fûts)



Photo n°2 : Modification de la hauteur du cylindre externe et de ses supports de maintien



Photo n°3 : Modification de la hauteur du cylindre externe et du réservoir à balles de riz.



Photo n°4 : Modification de support de maintien et porte-marmite



Photo n°5 : Modification des supports de maintien et des trous d'aération.



Photo n°6 : Porte-marmite et supports de maintien et réservoir modifiés



Photo n°7 : Combustion en temps de vent fort.



Photo n°8 : Fuite excessive de flamme



Photo n°9 : Combustion hors du cylindre de combustion



Photo n°10 : Réchauffement excessif du cylindre externe et perte d'énergie.



Photo n°11 : combustion des balles de riz dans le réservoir à balles de riz



Photo n°12 : Dégagement de fumée blanche et épaisse



Photo n°13 : Dégagement de fumée suivant la direction du vent



Photo n°14 : Combustion étouffée et dégagement excessif de fumée



Photo n°15 : Fumée envahissant le hall d'étuvage



Photo n°16 : Remplissage du réservoir à balles de riz





Photo n°17 : Secouement du cylindre de combustion



Photo n°18 : Secouement du réservoir à balles de riz



Photo n°19 : Activation du feu



Photo n°20 : Aération du cylindre de combustion



Photo n°21 : Vidange des cendres



Photo n°22 : destruction du réservoir à balles de riz



Photo n°23 : Destruction des cylindres.



Photo n°24 : Destruction du cylindre central

### Annexe 5 : Résumé du déroulement de confection des briquettes à balles de riz



Les différentes phases de remplissage du moule



Les étapes de pressage des briquettes



Retrait du piston compresseur et du cylindre du moule



Retrait de la briquette du moule et dépôt sur la planche pour être séché au soleil