

EFFICACITE, EFFICIENCE ENERGETIQUE ET ECOLOGIQUE DES BRIQUETTES COMBUSTIBLES A BASE DE BALLE DE RIZ. FACTEURS INFLUANT SUR LE PCI/PCS : CAS DU DISTRICT DE MOROMBE

L. ANDRIANAIVO ¹, N. ANDRIAMIHARIMANANA ¹, J. L. RASOANAIVO ², A.O. RAVONINJATOVO ²

¹ Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Equipe d'Accueil Exergie et Géoingénierie, Université d'Antananarivo, BP 1500 Antananarivo 101 Madagascar

²Département Energétique, Centre National de Recherches Industrielle et Technologique (CNRIT), BP 6294 Antananarivo 101 Madagascar

e-mail : aandrianaivoo@gmail.com

Résumé

Le district de Morombe est le grenier à riz de la région Atsimo Andrefana avec 15 675ha de superficies rizicoles pour un rendement de production de 3t/ha. Le riz paddy contient 21% de balle de riz, ce qui représente une ressource potentielle disponible à chaque récolte et valorisable à des fins énergétiques. La balle de riz n'a pas d'utilisation particulière à part la cuisson de brique pour 3% seulement de ces ressources.

Devant ce constat et la cherté voire la dégradation des ressources forestières locales, la valorisation des balles de riz à des fins énergétiques domestiques est une priorité locale. Le présent travail de recherches a pour finalité de fournir à la population locale une source d'énergie, écologique, hygiénique et alternative au bois énergie à partir des ressources locales qu'est la balle de riz.

La méthodologie adoptée pour la concrétisation du présent travail consiste à passer à travers les différentes étapes d'activités suivantes : la recherche bibliographique et webographie, la descente sur terrain pour voir de visu la réalité locale sur la disponibilité de la ressource à exploiter, les enquêtes sur les habitudes culinaires locales ainsi que le traitement et l'analyse des données collectées.

Le résultat issu de ce travail a permis de disposer une ressource annuelle de 9 875t en balles de riz. La consommation mensuelle moyenne par capita en charbon de bois est de 12,6 kg, soit 63 kg/mois/ménage de cinq personnes. Leur habitude culinaire est très énergétivore (150 kg/an/capita en charbon de bois) par rapport à la moyenne nationale (100 kg/an/capita en charbon de bois). Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) des briquettes à base de balle de riz varie selon deux paramètres importants : la teneur en liant et en matière fine. Pour une teneur en liant variant de 4% à 10%, le PCI minimum passe de 3512,13 kcal/kg à 4284,77 kcal/kg mais celui du PCI maximal varie de 3542,13 kcal/kg à 5293,72 kcal/kg. Plus la teneur en liant est élevée et ne dépassant pas 10%, plus le PCI est important. Par contre, pour la matière fine avec un pourcentage variant de 25% à 75%, sa teneur optimale est de 50% pour disposer d'un PCI meilleur avec un PCI minimum et maximum varie de 3704,73 kcal/kg à 5293,72 kcal/kg. L'utilisation de briquette de balle de riz à la place du charbon de bois pour un ménage de 5 personnes permettra de préserver respectivement tous les ans : 1,008 ha, 0,89 ha et 0,43 ha de forêt d'eucalyptus pour les briquettes de balle de riz à teneur en liant allant de 4%,5% à 10% de liant avec un PCI moyen(4%,5%,10%) respectif de 3452,415 kcal/kg, 3661,25 kcal/kg et 4789,24 kcal/kg.

Mots Clés : Balle de riz, efficacité énergétique, pouvoir calorifique, briquette combustible

1. INTRODUCTION

La région Atsimo-Andrefana, un des plus consommateurs en énergies à Madagascar, à cause des plats locaux énergétivores causant la forte déforestation dans cette zone, fait l'objet d'une étude sur son potentiel énergétique, vu que cette région a une superficie de 66 236 km² et compte jusqu'à 1 247 663 habitants en 2011.

De fortes pressions pèsent sur les forêts de Madagascar où moins de 10 % des forêts naturelles sont préservées. L'usage massif du charbon de bois et des combustibles ligneux en est la cause principale. En

effet, 98 % des ménages malagasy utilisent, exclusivement ou partiellement, le charbon de bois pour les besoins domestiques. Or, le déséquilibre entre la consommation de charbon de bois et le renouvellement des ressources ligneuses par le reboisement ne cesse de s'accroître. Le phénomène est particulièrement observé dans les régions Boeny et Atsimo-Andrefana où la consommation de charbon de bois dépasse de 50 % la moyenne nationale : 150 kg par an par personne dans l'Atsimo-Andrefana, contre 100 kg par an par personne au niveau national, alors que les activités de reboisement sont extrêmement rares. A terme, les ressources ligneuses disparaîtront : d'ici 2030, l'Atsimo-Andrefana aura épuisé les siennes.

La mise en valeur des ressources utilisées pour la production d'énergie contribue à la réalisation de plusieurs objectifs clés de cette étude. Ces objectifs comprennent notamment la sûreté de l'approvisionnement, le principal but recherché à cet égard étant de réduire la dépendance vis-à-vis des hydrocarbures importés (pétrole et gaz), ainsi que l'exposition aux risques économiques ; la protection de l'environnement par la limitation de la déforestation, étant donné que le développement des énergies renouvelables devrait propulser l'industrie de Madagascar dans le secteur, en expansion rapide, des technologies à faible émission de carbone.

Les objectifs scientifiques et techniques de cette étude consistent respectivement à déterminer : primo, l'efficacité et l'efficacité énergétique et écologique des briquettes par rapport à l'utilisation du bois énergie ; secundo, caractériser les facteurs qui ont de l'influence sur le PCI et le PCS des briquettes à base de balle de riz ; tertio, évaluer la superficie forestière épargnée dans la région Atsimo Andrefana par l'utilisation des briquettes de balles de riz, comme source d'énergie domestique, à la place du bois énergie.

2. METHODES

2.1. Zone d'étude : Région Atsimo-Andrefana, District Morombe :

Située au Sud-Ouest de Madagascar, la Région Atsimo Andrefana se trouve dans la Province de Toliara. S'étendant sur une côte de 800 km, Elle est composée de 9 districts et 105 communes. Son chef-lieu de région est Toliara I qui se trouve à 945 km environ de la capitale de Madagascar. Les autres districts qui la composent sont les suivants : Toliara II, Ampanihy Ouest, Ankazoambo, Benenitra, Beroroha, Betioky Sud, Morombe et Sakaraha. Elle est limitée par les coordonnées géographiques suivantes :

- latitude : entre 21°66' et 24°72' Sud ;
- longitude : entre 43°47' et 45°47' Est.

Elle couvre une superficie de 66 502 km² (Tableau 1), ce qui représente 11,4 % de la superficie totale de Madagascar.

Tableau 1 : Superficie du district de Morombe

District	Superficie en km ²
Ampanihy (Ouest)	13 253
Ankazoabo	8 834
Benenitra	4 741
Beroroha	6 723
Betioky (Sud)	10 079
Morombe	7 109
Sakaraha	8 160
Toliara I	282
Toliara II	7 321
Total région	66 502

Le district de Morombe est le grenier à riz de la région Atsimo Andrefana avec ses surfaces rizicoles de 15.675 ha et un rendement de production de 3t/ha.

2.1.1. La population :

La population est le principal acteur d'un développement soutenable et durable. Elle en sera aussi la première bénéficiaire. La connaissance de l'état de la population, de part son effectif, sa structure et ses conditions de vie, aide à mesurer les efforts à entreprendre pour réduire la pauvreté et soutenir le développement. De plus, cet état de la population décrit sa capacité en termes de ressource humaine et de potentialité d'activités économiques locales et régionales.

Les statistiques contenues de l'enquête monographique de 2009 montrent que 6,2 % de la population résident dans la Région Atsimo Andrefana (Tableau 2). Cette proportion est supérieure de 1,7 point par rapport à la moyenne nationale de 4,5 %. Selon les districts, Toliara II et Ampanihy abritent respectivement 24,2 % et 21,2 % de la population de la région. Betioky Atsimo détient la troisième place avec 15,5 % de la population. En tout, 3,8 % de la population nationale habitent dans ces 3 districts. Pour le Chef-lieu de Région Toliara I, sa part en termes de population est de 11,5 %. Et d'après l'INSTAT, en 2014, la population dans la région Atsimo-Andrefana est estimée à 1 350 000.

Tableau 2 : Structure de population dans la Région Atsimo Andrefana

District	Unité : %	
	Part dans la population totale	
	Part dans la Population de la Région Atsimo Andrefana	Madagascar
Ampanihy (Ouest)	21,2	1,3
Ankazoabo	5,8	0,4
Benenitra	2,2	0,1
Beroroaha	3,7	0,2
Betioky (Sud)	15,5	1,0
Morombe	8,4	0,5
Sakaraha	7,5	0,5
Toliara I	11,5	0,7
Toliara II	24,2	1,5
Total de la Région Atsimo Andrefana	100,0	6,2

Source : MEI/CREAM/Monographie 2013

Selon les résultats de l'Enquête Périodique auprès des Ménages de 2010 (EPM 2010), l'effectif moyen des personnes dans un ménage de la Région Atsimo Andrefana de 4,8 égalise celui au niveau national. A l'instar de la situation nationale, les ménages ruraux se composent de plus d'individus (4,8) que ceux urbains (4,6). Cet écart de 0,2 est moindre que celui de 0,4 observé au niveau national.

2.2. Approche Méthodologique

La méthodologie adoptée dans le cadre de ce travail de recherches est à la fois qualitative et quantitative. Sa concrétisation à termes nécessite à priori à passer à travers l'ordre chronologique des différentes activités suivantes : capitalisation des données relatives au thème de recherches, descente dans la zone d'études pour voir de visu la réalité locale sur la disponibilité de la ressource à exploiter, les enquêtes sur

les habitudes culinaires locales, la collecte de ressource (échantillon) pour les travaux de laboratoire permettant de fabriquer des briquettes à base de balle de riz et de déterminer les caractères physicochimiques. L'analyse et le traitement des données y afférentes, termine ce travail de recherches.

2.2.1. Capitalisation de données

Afin de mener dans de bonne condition ce travail de recherches, la capitalisation des diverses données correspondant au thème de recherches est une priorité. Plusieurs documents ont été consultés entre autre : le Plan Régional de Développement (PRD) de la Région Atsimo Andrefana), le Plan Communal de Développement (PCD) respectif de Toliara I, et de la ville de Morombe, les études et recherches sur les ressources énergétique, vivrière et forestière régionales et dudit district. Des contacts y ont été réalisés pour connaître les différentes activités culinaires, les modes de vie locales.

2.2.2. Travaux de laboratoire pour déterminer le Pouvoir calorifique (PCI/PCS) :

2.2.2.1. Fabrication de briquettes à base de balle de riz

Les briquettes fabriquées ont été basées sur deux facteurs principaux :

- la variation de la teneur en liant allant de 4%, 5% et 10% ;
 - la variation de la teneur en matières fines de 25%, 50% et de 75%. Il est à rappeler que la balle de riz a une forte teneur en Matière minérale et une faible teneur en Matière sèche.
- a) Le liant et le choix des liants

Les liants servent à agglomérer les matières premières afin de faciliter le compactage du combustible solide. Les liants jouent un rôle important sur la qualité du combustible. Ils peuvent le rendre plus ou moins cassant, ralentir la combustion, augmenter la fumée...

Généralement, les liants proviennent des déchets organiques comme :

- Déchet de papier et carton,
- Déchet de farine,
- Fécule de manioc,
- Amidon de maïs.

On peut utiliser aussi l'argile, et les liants synthétiques comme la paraffine, huile lourde, huile de vidange (sous-produit de l'industrie pétrolière). Mais nous choisissons les liants moins chers pour éviter l'élévation de coup de notre produit fini.

Les liants sont utilisés uniquement pour la fabrication des combustibles solides de grande taille comme les bûches ou plaquettes, briquettes.

- L'argile :

L'argile est constituée des minéraux et des oligoéléments comme : silice, silicate d'aluminium, magnésium, calcium, fer, phosphore, sodium, potassium, cuivre, zinc, sélénium, cobalt, manganèse..., qu'elle renferme dans des proportions variables selon le lieu d'origine.

Elle se présente des différentes couleurs : verte, rouge, bleue, jaune, grise, blanc, rose... sa couleur varie en fonction des oxydes de fer qu'elle renferme. Certains sont utilisés comme des médicaments naturels par exemple les argiles vertes. Et on peut l'avoir dans les rizières, dans le bord de la rivière....

Le prélèvement de l'argile dans la rizière ne pose pas un problème pour la fertilité de sol car la proportion de sa masse par rapport à la masse de biquette est très petite. La valeur du liant « argile » est de l'ordre de 10% dans une briquette. En plus, la cendre de briquette sera valorisée comme complément d'engrais pour un sol sableux.

La caractéristique chimique de l'argile : elle est un agent coagulant, et permettant évidemment de jouer le rôle de liant.

- Les papiers et carton :

Concernant les papiers et cartons, il est constitué aussi des celluloses et des lignines un liant naturel de bois. Alors elles se comportent comme liant quand on leur ajoute de l'eau pour former une pâte. Les cartons sont partout dans les déchets ménagers et déchets industriels, déchets de commune. A Madagascar, il existe des PME qui traitent les déchets de papiers et cartons, mais il reste encore inattendu car la population continue de les rejeter aux alentours.

L'utilisation de ce liant augmente le pouvoir calorifique mais elle rend plus ou moins aussi la présence de fumé dans un combustible carbonisé. En effet elles renferment des matières volatiles.

- Huile lourde, huile de vidange, autres sous-produits de raffinage de pétrole :

Les huiles, tels que l'huile lourde, l'huile de vidange et les autres sous-produits de raffinage de pétrole, peuvent être utilisés comme des liants ou additifs pour renforcer les pouvoirs calorifiques de la brique. Mais lors de son utilisation, elles peuvent provoquer des inconvénients. Comme tous les produits pétroliers, pendant la réaction de combustion, elles dégagent des gaz qui peuvent polluer l'environnement autre que le CO₂.

- Farine de blé, maïs, fécule de manioc :

C'est une poudre constituée d'amidons de 68 à 72%, d'eau, ensuite de gluten, du sucre, et de matières grasses, et une trace de cellulose. Grâce aux amidons, ce mélange a la capacité de jouer le rôle de liant quand on ajoute de l'eau. On vend la farine de blé à 2400 Ariary le kilo. Le fécule de manioc à 2300 Ariary le kilo et la farine de maïs 2600 Ariary le kilo. Comme ce type de liant n'est pas gratuit, on l'utilise seulement comme des additifs pour optimiser la qualité du combustible.

D'après l'expérience vécue, la présence de ce produit rend la brique de plus en plus incassable, même si elle est utilisée en faible proportion.

Dans notre cas, nous avons choisi la fécule de manioc comme liant pour notre brique combustible à cause de sa disponibilité et son prix abordable.

2.2.2.2. Détermination des caractères physicochimiques des briquettes fabriquées et à base de balle de riz

Pour déterminer les caractéristiques physico-chimiques d'un échantillon de briquettes, notre approche consiste à calculer respectivement :

- l'humidité (H) ;
- le taux de cendre (Ce) ;
- la teneur en matière de volatile (MV) ;
- et par déduction la teneur en Carbone fixe (C.F)
- la détermination du pouvoir calorifique Inférieur (PCI) et le PCS

Notre objectif est de connaître les caractéristiques physicochimiques de ces briquettes à base de balle de riz permettant de dicter sur la qualité des briquettes : un bon combustible ou non.

a) Humidité (H):

Sécher le récipient dans une étuve à 105°C et refroidir dans le dessiccateur, puis peser.

20g (pesés à 0.1 mg près) de charbon sont introduits dans une boîte à tare préalablement séchée à 105°C, refroidie et pesée. Répandre uniformément le charbon dans le récipient, et le placer dans l'étuve chauffée à 105°C pendant 1 h à 1h 30. Sortir et placer l'ensemble dans le dessiccateur pendant 30 min puis peser à 0.1 mg près

Calcul de l'humidité à partir de la perte de masse par rapport à la masse initiale.

b) Matière volatile (IMV) :

Déterminer l'indice de matières volatiles ou IMV qui est la perte de masse exprimée en pourcentage, obtenue dans des conditions normalisées, après pyrolyse chauffé à l'abri de l'air, abstraction faite de la perte de masse due à l'évaporation à 550°C.

c) Taux de cendre (C):

Combustion d'une prise d'essai dans un four à moufle à 850°C. Le taux de cendre correspond à la quantité de résidu, rapporté à la masse de la prise d'essai.

d) Taux de carbone fixe (TCF):

C'est le pourcentage du reste entre taux de cendre, humidité et indice de matière volatile

$$TCF= 100-(H+C+IMV)$$

e) Pouvoir calorifique inférieur (PCI):

Adoption de la formule empirique de CASSAN : $PCI= (100-C)* 80$ en kcal/kg

2.4. Efficacité et efficacité énergétique des briquettes de balle de riz de 4%,5% et 10% en liant par rapport au bois énergie (charbon, bois)

Pour déterminer l'efficacité et de l'efficacité énergétique des briquettes de balles, il faut passer à travers les différents tests suivants :

- *Drop test* : Ce test constitue une simulation des sollicitations subies par le combustible lors du transport et la manutention. C'est un test universellement reconnu pour apprécier la friabilité des combustibles. Ce test met en relief une nette corrélation entre la teneur en liant et l'aptitude du combustible à résister à l'effritement.
Le test consiste à laisser tomber à partir de plusieurs hauteurs tous les combustibles à tester et de déterminer le comportement de chaque combustible à partir de chaque hauteur de chute.
- *Test de tambour tournant* : Ce test constitue une simulation des chocs pouvant se produire au combustible quel que soit le mouvement de rotation subi par le combustible et le mode de conditionnement adopté avant l'écoulement du combustible depuis la production jusqu'aux consommateurs.
Ce test consiste à introduire le combustible dans un appareil tambour tournant en variant le nombre de tour de rotation de l'appareil tout en fixant la durée de test à 1 mn.
- *Test de sécabilité* : Le test de sécabilité est l'aptitude des briquettes à être fractionnée. C'est une commodité d'usage et un paramètre important non négligeable pour les consommateurs.
Ce test consiste à fractionner le combustible quel que soit la dimension voulue.
- *Test d'inflammabilité* : Le test d'inflammabilité consiste à apprécier l'inflammabilité des briquettes par rapport aux autres combustibles usuels. Le test d'inflammabilité est un paramètre technique permettant de juger d'avance le combustible sur son pouvoir calorifique. Plus le combustible brûle correctement et les flammes sont à majorité de couleur bleue montrant que le combustible est bien consommé et les imbrûlés et les pertes n'existent que très faibles. Par contre, si la flamme est jaunâtre et à faible proportion de couleur bleuâtre, ce qui montre que les imbrûlés sont importants et d'autres facteurs doivent être pris en compte pour éviter une telle situation.
C'est à partir du test d'ébullition d'eau qu'on peut apprécier la situation évoquée ci-haut.

- *Test d'ébullition d'eau (TEE)* : Pour évaluer la performance et l'efficacité énergétique des briquettes seules ou par rapport aux autres combustibles couramment utilisés comme le charbon de bois et le bois de chauffe il faut réaliser les tests d'ébullition d'eau à haute et à basse puissance (condition réelle d'utilisation des combustibles et des foyers par ménage) et apprécier à partir de ces tests le temps d'inflammabilité (temps de mise à feu) de chaque combustible, leur comportement vis-à-vis du feu et du foyer utilisé (foyer amélioré) ainsi que la possibilité d'utilisation des imbrulés (combustible restant lors d'un TEE) pour une nouvelle cuisson. Les combustibles (briquettes de déchets de bois, le charbon de bois et le bois de chauffe) ont été testés avec le foyer le plus utilisé à Madagascar : foyer amélioré (fatana mitsitsy moyen modèle). La performance des briquettes sera déduite du résultat des tests en tenant compte des différentes appréciations apportées relatives au temps d'inflammabilité, à leur comportement face au feu et au foyer ainsi qu'à leur aptitude à pouvoir réutiliser les imbrulés issus de chaque test d'ébullition d'eau.
- *Test de Cuisine contrôlée (TCC)* : C'est un test utilisé universellement pour déterminer la capacité des briquettes à cuire les différents plats culinaires les plus consommés dans le pays.

2.4.1. Approche adoptée pour l'évaluation de l'efficacité et de l'efficacité énergétique des briquettes de balle de riz par rapport à un foyer amélioré de rendement bien défini.

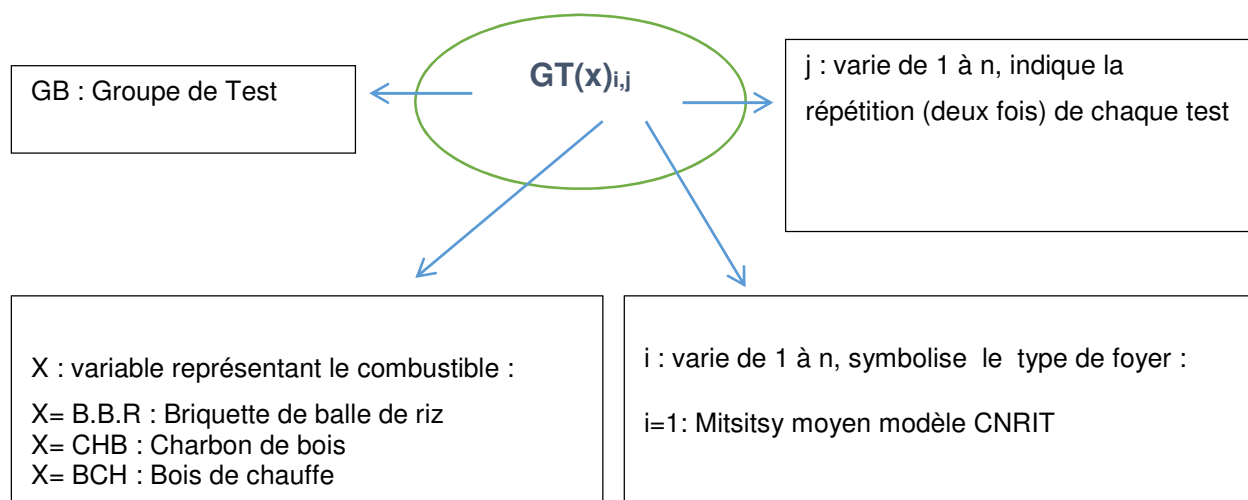
L'efficacité et l'efficacité énergétique de la briquette de balle de riz par rapport aux autres combustibles dépendent du résultat des Tests d'Ébullition d'Eau (TEE) permettant de déterminer la consommation en briquette et des autres combustibles usuels (charbon de bois et bois de chauffe) par l'utilisation du foyer le plus utilisé : le Fatana Mitsitsy (Foyer Amélioré) en utilisant la même bouilloire dans les mêmes conditions opératoires (même quantité de briquette et la même bouilloire pour chaque test).

De plus, c'est à partir de ce Test d'Ébullition d'Eau (TEE) qu'on peut procéder à l'évaluation des paramètres relatifs à chaque combustible :

- Test d'Inflammabilité ou temps de mise à feu ;
- Le comportement au feu ;
- La durée de l'ébullition d'eau ;
- La possibilité d'utilisation des imbrulés (combustible restant lors d'un TEE) pour une nouvelle cuisson

La méthodologie adoptée pour la concrétisation des Tests d'Ébullition d'Eau (TEE) par l'utilisation du foyer le plus utilisé (Fatana Mitsitsy) consiste à réaliser Tests d'Ébullition d'Eau. Ces TEE permettent d'évaluer la consommation en briquette de balle de coco et briquette des déchets de bois vis-à-vis des autres combustibles couramment utilisés (charbon de bois, bois de chauffe).

La réalisation de ces tests d'ébullition d'eau consiste à grouper les activités à entreprendre sous forme de Groupes de Test $[GT(x)_{i,j}]$ où :



Ces groupes de test [GT(x)_{i,j}] se répartissent comme suit :

- Le groupe de test utilisant la Briquette de balle de Riz [GT(B.B.R)_{i,j}] avec le foyer Mitsitsy comprenant les :_GT (B.B.R (4%))_{i,j} composés par les deux tests GT (B.B.C (4%))_{1,1} à GT (B.B.C (4%))_{1,2}
- Le groupe de test utilisant la Briquette de Balle de Riz [GT(B.B.R)_{i,j}] avec le foyer Mitsitsy comprenant les :_GT (B.B.R (5%))_{i,j} composés par les deux tests GT (B.B.R (5%))_{1,1} à GT (B.S.B (5%))_{1,2}
- Le groupe de test utilisant la Briquette de Balle de Riz [GT(B.b.R)_{i,j}] avec le foyer Mitsitsy comprenant les :_GT (B.B.R (10%))_{i,j} composés par les deux tests GT (B.B.R (10%))_{1,1} à GT (B.B.R (10%))_{1,2}
- Le groupe de test utilisant le charbon de bois [GT(CHB)_{i,j}] avec le foyer Mitsitsy comprenant les : GT(CHB)_{i,j} composés par les deux tests GT(CHB)_{1,1} à GT(CHB)_{1,2}
- Le groupe de test utilisant le bois de chauffe [GT(BCH)_{i,j}] comprenant les :GT(BCH)_{1,j} composés par les deux test GT(BCH)_{1,1} à GT(BCH)_{1,2}

Ces tests sont représentés sous forme de tableau matriciel No3 suivant :

Tableau 3: Représentation matricielle des 5 groupes de test, des combustibles et des foyers

Foyer Mitsitsy Moyen Model (CNRIT)	Combustible
GT (B.B.R (4%)) _{1,j}	B.B.R (4%)
GT (B.B.R (5%)) _{1,j}	B.B.R (5%)
GT (B.B.R (10%)) _{1,j}	B.B.R (10%)
GT(CHB) _{1,j}	CHB
GT(BCH) _{1,j}	BCH

D'après ce tableau matriciel, les tests sont faits pour 5 groupes de test avec deux répétitions chacun,

- a) *Méthode de calcul pour la détermination de la consommation de combustible (kg/h) de briquette de balle de riz de 4%, 5% et 10% de liant ainsi que du charbon de bois, et de bois de chauffe*

La consommation moyenne en combustible (kg/h) sera déterminée à partir des valeurs moyennes issues des groupes de tests d'ébullition d'eau [GT(x)_{i,j}]

La formule utilisée pour calculer la consommation moyenne en combustible (kg/h) sera la suivante :

$$\text{Combustible consommé} = \text{Combustible initial} - [\text{combustible (non utilisé + imbrulé)}]$$

$$\text{Durée de la combustion} = \text{Durée de l'ébullition de l'eau} + \frac{1}{4} \text{ d'heure}$$

La consommation moyenne en combustible (kg/h) est donc égale à la valeur du rapport entre la moyenne de la quantité du combustible consommé avec celle de la durée d'ébullition d'eau plus 15 minutes. Ainsi, chaque groupe de test aura sa propre consommation moyenne en combustible par unité de temps.

A chaque test, on essaiera de déterminer:

- La puissance de chaque foyer par l'utilisation des briquettes de composition en liant 4%, 5% et 10% ;
- L'efficacité ou rendement de chaque foyer par l'utilisation des Briquettes de balle de riz de composition en liant de 4%, 5% et 10%
- la consommation de combustible (en kg/h) des Briquettes de balle de riz et celle du charbon de bois, et du bois de chauffe.

La concrétisation de chaque activité dépendra respectivement des matériels d'étude, des matières premières (combustibles, eau) en disposition et des techniciens pour la concrétisation.

b) La puissance de chaque foyer par l'utilisation des briquettes de balle de riz à composition en liant de 4%, 5% et 10%:

La puissance est définie comme étant la dérivée de l'énergie par rapport au temps

$$P(t) = \frac{dE(t)}{dt}$$

Pour notre cas, il s'agit de déterminer une valeur de puissance calorifique constante. On peut donc écrire ;

$$P(t) = \frac{Q}{t}$$

Où : Q : représente l'énergie utile, c'est-à-dire l'énergie transmise par le foyer à la marmite, et « t » : le temps ou la durée totale du test

L'énergie utile est fonction de la quantité de chaleur accumulée par l'eau entre sa température initiale et sa température d'ébullition et de la chaleur latente de l'eau évaporée :

$$Q = C_{eau} \times M_{eau\ initial} \times (T_{ébullition} - T_{initiale}) + L_{eau} \times (M_{eau\ initial} - M_{restante})$$

Et par suite :

$$P = \frac{C_{eau} \times M_{eau\ initial} \times (T_{ébullition} - T_{initiale}) + L_{eau} \times (M_{eau\ initial} - M_{restante})}{t}$$

Où :

C_{eau}	Chaleur massique de l'eau	4180 J/kg. °C
L_{eau}	Chaleur latente de vaporisation de l'eau	2260000 J/kg
$M_{\text{eau initiale}}$	Masse initiale de l'eau	2,5kg
$M_{\text{eau restante}}$	Masse d'eau restante après le test	Kg
Q	Energie transmise par le foyer à la marmite	Joule
t	Temps total du test	Seconde
P	Puissance du foyer	Watt

c) L'efficience (rendement) de chaque foyer par l'utilisation des briquettes de balle de riz à composition en liant de 4%,5% et 10%.

L'évaluation de l'efficience du foyer s'effectue à partir du calcul du rendement.

Par définition, le rendement c'est le rapport entre l'énergie transmise par le foyer à la marmite et l'énergie contenue dans le combustible brûlé.

Soit :

$$\eta = \frac{Q}{PC_{\text{Combustible}} \times P_{\text{Combustible}}}$$

$$\eta = \frac{C_{\text{eau}} \times M_{\text{eau initiale}} \times (T_{\text{ébullition}} - T_{\text{initiale}}) + L_{\text{eau}} \times (M_{\text{eau initiale}} - M_{\text{restante}})}{PC_{\text{Combustible}} \times P_{\text{Combustible}}}$$

$PC_{\text{combustible}}$	Pouvoir calorifique du combustible ; soit : <ul style="list-style-type: none"> ▪ $PC_{\text{B.B.R}}(4\%)$ ----- ▪ $PC_{\text{B.B.R}}(5\%)$ ----- ▪ $PC_{\text{B.B.R}}(10\%)$ ----- 	kcal/kg
$P_{\text{combustible}}$	Poids du combustible consommé, soit : <ul style="list-style-type: none"> ▪ $PC_{\text{B.B.R}}(4\%)$ ----- ▪ $PC_{\text{B.B.R}}(5\%)$ ----- ▪ $PC_{\text{B.B.R}}(10\%)$ ----- 	kg
η	Rendement du foyer	Pourcent (%)

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Résultats

3.1.1. Pouvoir calorifique inférieur (PCI)

Selon les différentes teneurs en liant (4%,5%,10%) des briquettes de balle de riz, le PCI (min, max) par composition en liant est récapitulé dans le tableau 3 suivant.

Tableau 3 : PCI (min, max) des différentes compositions en liant des briquettes de balle de riz

Désignation	PCI min	PCI max	PCI min	PCI max	PCI min	PCI max
Teneur en liant	4%		5%		10%	
Teneur en cendre (%)	58%	55,72	57%	51,86	46%	33,82
PCI (min, max) kcal/kg)	3362,7	3542,13	3471,50	3851,00	4284,77	5293,72

Ce tableau 3 informe le PCI minimum et maximal des briquettes de balle de riz selon la teneur en cendre et en liant de chaque briquette. Il est à rappeler ici que la balle de riz dispose d'une teneur élevée en Matière Minérale, c'est pourquoi, les briquettes à teneur élevée en liant dispose d'un PCI élevé. C'est pourquoi le PCI (10%) est plus élevé que le PCI (5%) et le PCI (4%).

3.1.2. PCI moyen briquettes et rapport entre PCI charbon de bois et PCI des briquettes de balle de riz à (4%,5%,10%) en liant

Selon les essais d'expérimentation effectués au laboratoire du Département énergétique du Centre National de Recherches Industrielle et Technologique (CNRIT), la composition de chaque échantillon n'est pas pareille d'un essai à un autre, c'est pourquoi, deux valeurs (minimale, maximale) ont été obtenues pour le résultat de : PCI

Le tableau 4 suivant informe aussi la moyenne du PCI minimum et maximal.

Tableau 4 : PCI moyen briquettes et rapport entre PCI briquettes et PCI charbon de bois

Désignation	Charbon de bois	Briquette de balle de riz	Pourcentage du PCI briquette de balle de riz par rapport PCI charbon de bois	Rapport PCI briquettes/PCI charbon de bois
PCI (kcal/kg) min (4%)		3362,7	50,19	0,50
PCI (kcal/kg)max (4%)		3542,13	52,87	0,53
PCI moyen (4% en liant) (kcal/kg)	6700	3452,415	51,53	0,52
PCI (kcal/kg) min (5%)		3471,5	51,81	0,52
PCI (kcal/kg)max (5%)		3851	57,48	0,57
PCI moyen (5% en liant) (kcal/kg)		3661,25	54,65	0,55
PCI (kcal/kg) min (10%)		4284,77	63,95	0,64
PCI (kcal/kg)max (10%)		5293,72	79,01	0,79
PCI moyen (10% en liant) (kcal/kg)		4789,24	71,48	0,71
Moyenne				0,59

Ce tableau 5 montre aussi le rapport entre le PCI briquette et celui du charbon de bois moyen. Il est à préciser que la moyenne de ce rapport PCI briquette /PCI charbon est de : 0,59, c'est-à-dire que le PCI briquette est 0,59 fois le PCI charbon de bois.

3.1.3. Etude comparative du PCI et de la consommation en combustible (charbon de bois, briquettes de balle de riz)

a) Etat initial (état zéro) de la consommation en charbon de bois par ménage

A l'état initial (zéro), les ménages locaux du district de Morombe utilisent le charbon de bois comme source d'énergie domestique. En moyenne, une personne consomme 12,6 kg par mois en charbon de bois. Le tableau 5 suivant récapitule la consommation moyenne mensuelle et annuelle d'un ménage de taille égale à : 5 (moyenne nationale).

Tableau 5 : Consommation initiale en charbon de bois par personne et par ménage par mois et par an

Désignation	charbon de bois
Consommation mensuelle par personne (kg/pers/mois)	12,6
Consommation mensuelle par ménage (kg/men/mois)	63
Consommation annuelle par ménage (kg/an)	750
PCI moyen du charbon de bois (kcal/kg)	6700

b) Etat actuel : Remplacement du charbon de bois par des briquettes à base de balle de riz

A l'état actuel où le charbon est remplacé par les briquettes de balles de riz, la consommation par pers par jour, par mois et par an a changé selon la teneur en liant variant de 4% à 10%. Le tableau 6 suivant informe les consommations y afférentes.

Tableau 6 : Consommation en équivalent en charbon de bois d'un ménage de 5 personnes par remplacement du charbon de bois en briquettes de balle de riz à composition différente '4%,5% et 10%

Briquette à PCI (min, max)	PCI min	PCI max	PCI min	PCI max	PCI min	PCI max
Teneur en liant	4%		5%		10%	
Consommation mensuelle équivalente en charbon de bois par personne (kg/pers/mois)	25,10	23,83	24,32	21,92	19,70	15,95
Consommation mensuelle équivalente en charbon de bois par ménage (kg/men/mois)	125,52	119,17	121,59	109,61	98,512	79,74
Consommation annuelle équivalente en charbon de bois par ménage (kg/men/an)	1494,33	1418,64	1447,50	1304,86	1172,76	949,24

Ce tableau 6 montre que si une personne a utilisé les briquettes de balle de riz à 4% de teneur en liant et avec un PCI min comme combustible au lieu du charbon de bois, elle consomme 25,10 kg équivalent en charbon de bois au lieu de 12,6 kg (état initial), c'est-à-dire que la substitution du

charbon de bois 12,6 kg/mois par 25,10 kg permettra d'économiser tous les mois du bois correspondant à ces 12,6 kg, soit 126 kg si le rendement de carbonisation est de 10%.

3.1.4. Impact environnemental (préservation des ressources forestières) par l'utilisation de briquettes de balle de riz à la place du charbon de bois pour un ménage de 5 personnes résidant dans la zone d'étude

La substitution du charbon de bois au niveau des ménages présente plusieurs avantages dans plusieurs domaines :

- Au niveau des ménages, le budget alloué au combustible domestique sera réduit et cela les permettra d'améliorer leur source de revenu et leur condition de vie par la suppression des fumées émises par l'utilisation du bois énergie ;
- Au niveau de la zone d'étude, les ressources forestières encore disponibles au niveau de la zone d'études seront préservées ;
- Au niveau national, l'environnement en général est sain et écologique.

Le tableau 7 suivant essaie de fournir des informations relatives à la préservation des ressources forestières dues au remplacement du bois énergie par les briquettes de balle de riz pour un ménage de cinq personnes pour une durée d'une année, en tenant compte du rendement de carbonisation (10%) et de la productivité en bois d'eucalyptus (7000 kg/ha).

Tableau 7 : Forêt préservée annuelle par un ménage de 5 personnes utilisant les briquettes combustibles de balles de riz à la place du charbon de bois

Désignation	Superficie forestière (ha)	Productivité en bois d'eucalyptus (kg)
Forêt annuelle disparue par ménage utilisant le charbon de bois	1,071	7500
Forêt annuelle préservée par ménage utilisant briquette balle de riz à PCI moyen (4%) (ha)	1,008	7055,03
Forêt annuelle préservée par ménage utilisant briquette de balle de riz à PCI moyen (5%) (ha)	0,89	6224,82
Forêt annuelle préservée par ménage utilisant briquette de balle de riz à PCI moyen (10%) (ha)	0,43	2992,26

Ce tableau 7 montre que si le ménage de 5 personnes utilise seulement du charbon de bois, il détruit chaque année 1,071 ha de forêt d'eucalyptus. Par contre s'il substitue le charbon de bois par les briquettes à balle de riz à 4%,5% et 10% de liant, il préservera respectivement 1,008 ha, 0,89 ha et 0,43 ha de forêt d'eucalyptus tous les ans, en tenant compte que 1 ha de forêt d'eucalyptus renferme 7000 kg de bois et la consommation en équivalent en charbon de bois des briquettes à PCI moyen du tableau 8 suivant :

Tableau 8 : Récapitulatif

Désignation	charbon de bois	Briquelette de balle de riz à teneur en liant		
		à PCI moyen (4%)	A PCI moyen (5%)	A PCI moyen (10%)
consommation/pers/mois (kg)	12,6	24,45	23,06	17,63
consommation/ménage/mois (kg)	63	122,26	115,29	88,13
consommation/ménage/an (kg)	750	1455,50	1372,48	1049,23
PCI (kcal/kg) moyen	6700	3452,415	3661,25	4789,245
Superficie annuelle de forêt détruite (ha) par utilisation de charbon de bois/ménage	1,071			
Superficie annuelle de forêt préservée/ménage utilisant briquelette de balle de riz (ha)		10008	0,89	0,43

3.1.5. Facteurs influant sur le PCI des briquettes de balle de riz

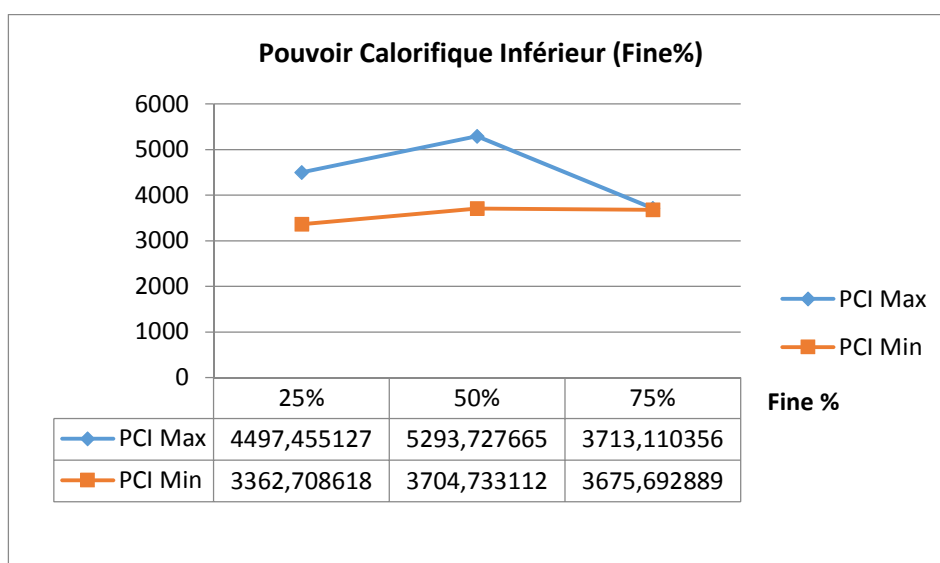
Trois facteurs différents ont été étudiés pour déterminer leur effet sur le PCI des briquettes de balle de riz. Il s'agit du liant, de la teneur en matière fine et de la teneur en matière volatile.

3.1.5.1. Teneur en matières fines

Comme la balle de riz contient une teneur en matière minérale importante, ce qui signifie la faible taux de lignine, de cellulose et d'hémicellulose. La teneur en Matière Sèche est très faible. C'est pourquoi, l'incorporation de matière fine avec les briquettes de balle de riz est très importante pour disposer d'une bonne qualité de briquelette de balle de riz. La question qui se pose est : y-a-t-il une limite d'incorporation de matière fine à ne pas dépasser pour une briquelette de balle de riz ?

Le résultat des essais a montré que : une teneur de 50% en matière fine est la limite maximale à ne pas dépasser. En deçà ou au-dessus de cette valeur (50%), le PCI des briquettes de balle de riz est faible. La figure 1 suivante informe sur cette situation ;

Figure 1 : Evolution du PCI des briquettes de balle de riz en fonction de matière fine



3.1.5.2. Teneur en liant

Trois essais d'expérimentation par variation de la teneur en liant ont été réalisés au laboratoire du CNRIT. Le résultat de ces essais a montré que plus la teneur en liant est élevée, plus le PCI des briquettes de balle de riz correspondant est important. Ce qui justifie la faible teneur en Matière Sèche de la balle de riz. En bref, si la matière première est à défaut de matière sèche, c'est la teneur en liant qui influe dans l'optique de disposer un combustible performant en qualité cohésive. La figure 2 justifie cette situation.

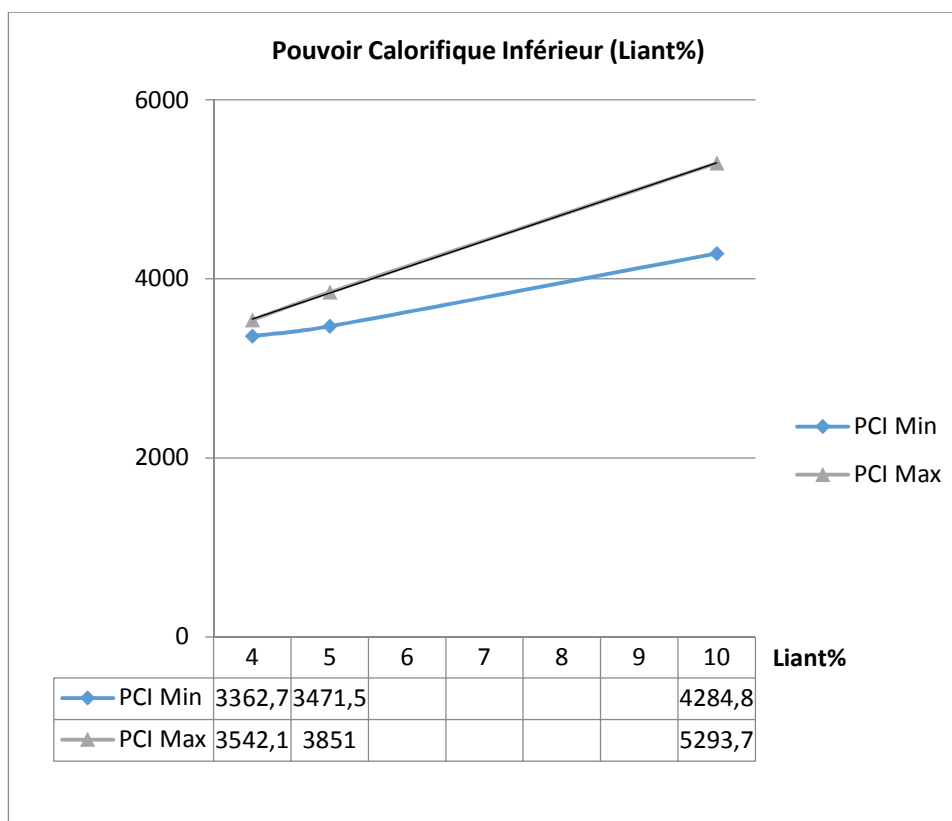


Figure 2: Evolution du PCI des briquettes de balle de riz en fonction de liant

3.1.5.3. Teneur en Matière Volatile

Sur le plan pratique, les matières volatiles, sont les produits qui polluent l'environnement. Plus la matière volatile est importante dans un combustible, plus ce combustible est nocif à l'environnement. C'est dans la matière volatile qu'on trouve tous les Gaz à effet de Serre (GES). La solution la plus efficace pour pouvoir l'utiliser c'est la réduction de cette teneur en Matière volatile. Le résultat issu de ce travail de recherches a montré que plus la teneur en liant est élevée, plus la teneur en Matière volatile est élevée. Le tableau 9 et la figure 3 informent cette situation.

Tableau 9 : Evolution de Matière Volatile en fonction du teneur en liant.

Liant (%)	Matière Volatile Max (%)	Matière Volatile Min (%)
4	9,9	7,95
5	11,28	8,19
10	30,83	10,76

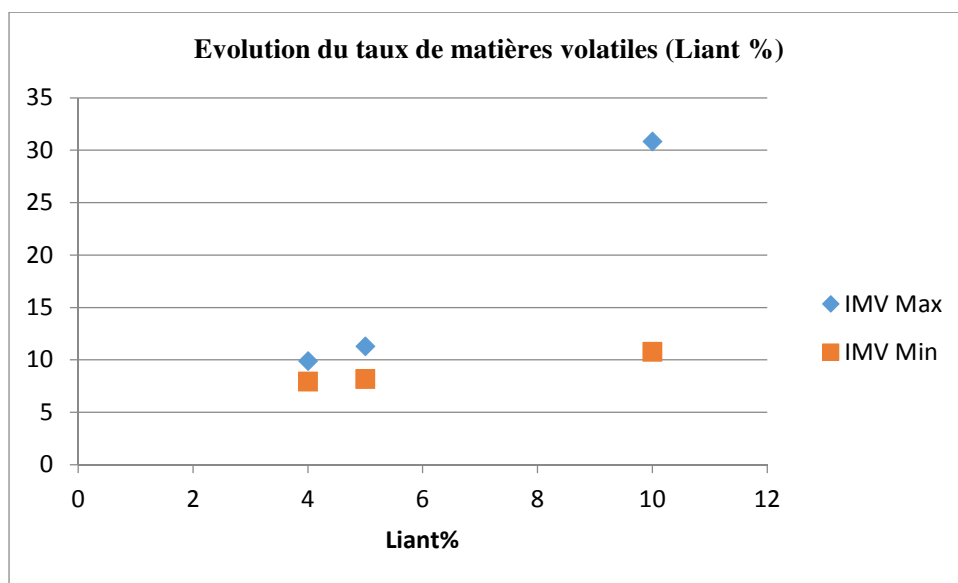


Figure 3 : Evolution du taux de matières volatiles (Liant %)

3.2. Pouvoir Calorifique Supérieur (PCS)

Par définition, le Pouvoir Calorifique Supérieur (PCS) est une grandeur qui représente la valeur absolue de la variation d'enthalpie (quantité de chaleur à pression constante) de la réaction de combustion totale (et à l'air) d'un composé hydrocarbonée avec formation d'eau vapeur.

Le Pouvoir Calorifique Supérieur (PCS), à volume constant, d'un combustible représente la quantité de chaleur dégagée par la combustion de l'unité de masse du combustible:

- Dans de l'oxygène saturé de vapeur d'eau,
- Les produits réagissant et les produits formés étant à la même température,
- Dans la même enceinte,
- L'eau formée étant liquide.

3.2.1. Approche adoptée pour le calcul du PCS de brique de riz

Il existe plusieurs méthodes permettant de déterminer le PCS, mais dans ce travail de recherches, nous allons appliquer dans ce travail de recherches le résultat de certains auteurs (Thipkhunthod et al., 2005; Chang et al., 1997) en tenant compte de la teneur en MS (Matière Sèche) des briquettes à 4% , 5%, et à 10% en liant. La corrélation entre la teneur en MS et le PCS, s'écrit comme suit :

$$PCS = 0,006 MS + 15,20 \text{ (MJ)}$$

a) *Calcul de la valeur de PCS (min, max) des briquettes selon la teneur en liant de : 4%, 5% et à 10% en liant*

Selon la teneur en liant (4%, 5%, et 10 %), les différentes valeurs des PCS (min, max) sont récapitulées dans le tableau 10 suivant.

Tableau 10: PCS (min, max) pour 4%, 5%, et 10% en liant des briquettes de balle de riz

Liants 4%	Liants 5%			Liant 10%	
4225,479	4223,792	4224,516	4223,702	4223,320	4225,150
4225,456	4224,243	4224,699	4223,724	4223,348	4225,444
4225,473	4224,309	4223,904	4223,628	4223,243	4225,499
4225,487	4224,247	4224,628	4223,812	4223,165	4225,005
4225,565	4223,732	4224,663	4223,861		4225,299

Ce tableau 10 montre les différentes valeurs de PCS pour chaque teneur en liant.

C'est à partir de ce tableau qu'on a pu tirer les valeurs respectives des PCS min et PCS max pour chaque teneur en liant de chaque combustible (Tableau 11).

Tableau 11 : Valeur des PCS min et PCS max pour chaque teneur en liant des briquettes de balle de riz
b)

% Liant	PCS Max	PCS Min
4	4225,565	4225,456
5	4224,699	4223,702
10	4225,499	4223,165

Ce tableau 11 montre la valeur minimale et maximale des PCS de brique de balle de riz pour des compositions en liant de 4%, 5% et 10%. On peut constater que quel que soit la teneur en liant, la valeur du PCS min et PCS max est presque pareille à quelque erreur près.

En bref, quel que soit la valeur de la teneur en liant des briquettes de balle de riz, cela n'a pas d'influence sur la valeur du PCS min ou du PCS max.

La figure 4 suivante montre la faible variation du PCS (min, max)

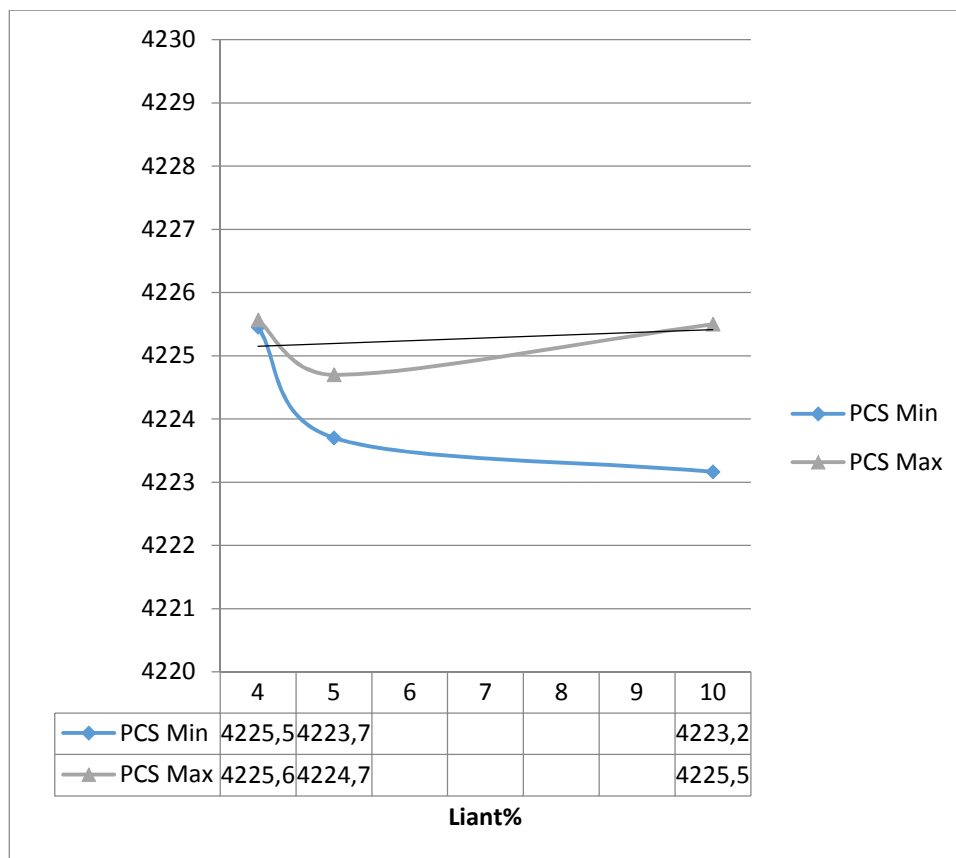


Figure 4: Evolution du PCS min et PCS max selon la teneur en liant des briquettes

b) Calcul de la valeur de PCS (min, max) des briquettes selon la teneur en particule fine de 25%, 50%, et de 75%

Pour des teneurs en particule fine composant les briquettes de balle de riz, les résultats des essais d'expérimentation au laboratoire sont récapitulés dans le tableau 11 suivant :

Tableau 11 : Valeur de PCS selon la teneur en particule fine : 25%, 50%, et 75%

Fine%	PCS Max	PCS Min
25%	4224,309	4223,165
50%	4225,499	4223,904
75%	4223,861	4223,628

Ce tableau 11 montre la faible différence de valeur du PCS min et PCS max pour une même teneur en particule fine. La figure 5 suivante montre la faible variation de PCS min et PCS max pour une même teneur en particule fine des briquettes.

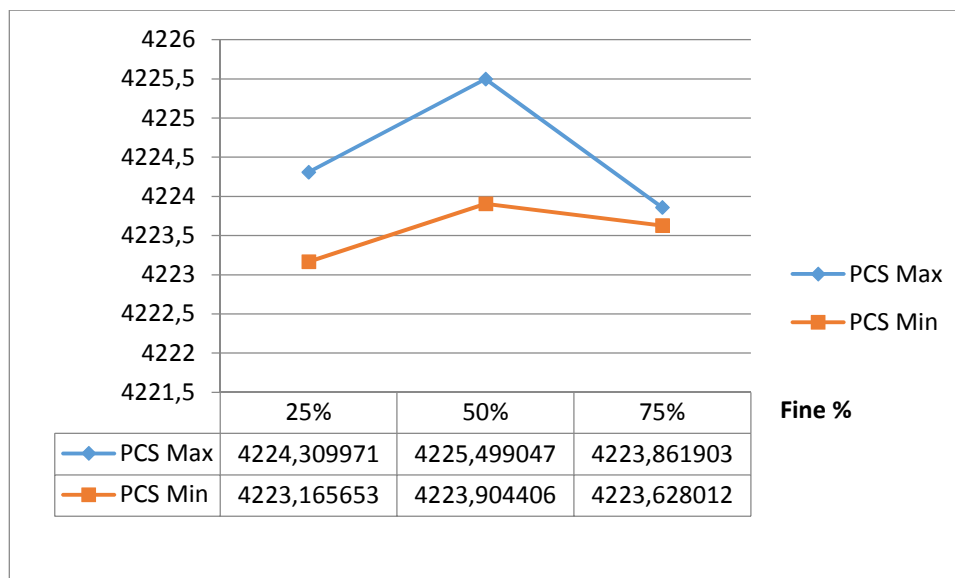


Figure 5: variation de PCS min et PCS max pour la teneur en particule fine des briquettes

4. EFFICIENCE ENERGETIQUE DES BRIQUETTES DE BALLE DE RIZ PAR RAPPORT AU CHARBON DE BOIS ET AU BOIS DE CHAUFFE

Cette partie essaie de montrer l'efficacité des briquettes de balle de riz à différente concentration par rapport au charbon de bois et au bois de chauffe. Pour arriver à cette fin, il faut passer à travers les différentes activités suivantes :

- faire un test de consommation en combustible (BBR 4%, 5% et 10%.) ;
- calculer la puissance de chaque foyer en utilisant les briquettes de balle de riz à 4%, 5% et 10%. ;
- Evaluer le rendement de chaque foyer en utilisant les briquettes de balle de riz à 4%, 5% et 10%.
- Faire une étude comparative des résultats obtenus permettant de classer chaque briquette de balle de riz de différentes compositions en liant (4%, 5%,10%) avec le bois énergie.

Le tableau 12 suivant essaie de récapituler les résultats issus du test de consommation en combustible (briquette de balle de riz, charbon de bois, bois de chauffe), la puissance du foyer par l'utilisation de chaque type de combustible ainsi que l'énergie transmise au foyer par le combustible ainsi que le rendement respectif.

Tableau 12: Récapitulatif des résultats des différents tests : consommation, puissance, rendement et énergie transmise

Combustibles	consommation moyenne (kg/h)	Durée ébullition (h)	Puissance (W)	Energie transmise par le foyer (j)	Rendement (%)
Briquette balle de riz 4%	0,38	0,79	660,99	1883835	22,07
Briquette balle de riz 5%	0,42	0,71	738,76	1883835	39,27
Briquette balle de riz 10%	0,36	0,75	697,72	1883835	31,53

Charbon de bois	0,34	0,85	636,23	1943824	23,74
Bois de chauffe	0,54	0,84	574,73	1744196	21,04

Ce tableau 12 présente respectivement :

- la consommation moyenne en combustible : Par rapport aux cinq combustibles, c'est le charbon de bois qui consomme le moins de combustible, suivi de la brique à balle de riz à 10% de liant, puis brique à balle de riz à 4% de liant et enfin le bois de chauffe. En bref, c'est le bois de chauffe qui est le grand consommateur de combustible. ;
- la durée d'ébullition qui informe le temps mis par chaque type de combustible pour bouillir les 2,5 kg d'eau. La brique 5% qui a la plus performante avec 0,71 h ;
- la puissance du feu émise par le combustible. C'est la brique balle de riz 5% de liant qui dispose la puissance la plus élevée avec 738,76 watt ; En tenant compte de la valeur élevée de la puissance du feu de la brique 5% liant, on peut dire que le fait de disposer cette puissance a permis à cette brique d'avoir la 1^{ère} place c'est-à-dire la durée d'ébullition la plus rapide ;
- l'énergie transmise par le foyer dont le charbon de bois qui dispose l'énergie la plus élevée par rapport aux autres combustibles ;
- le rendement du foyer dont la première place est pour la brique balle de riz 5%.

4.1. Rapport PCS/PCI

Le tableau 13 suivant récapitule le rapport entre le PCS ET le PCI.

Tableau 13: Rapport PCS/PCI

% Liant	PCS Max	PCS Min	PCI Max	PCI Min	PCSMaX/PCI Max	PCSMiN/PCI Min
4	4225,56	4225,45	3542,13	3362,70	1,192	1,256
5	4224,69	4223,70	3850,97	3471,47	1,097	1,216
10	4225,49	4223,16	5293,72	4284,77	0,986	0,985

Ce tableau 13 montre que le rapport PCS/PCI diminue au fur et à mesure que la teneur en liant augmente.

5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

En tenant compte des résultats issus de ce travail de recherches, la substitution du bois énergie en particulier le charbon de bois au niveau des ménages est bénéfique dans plusieurs domaines non seulement pour les ménages eux-mêmes mais aussi pour la zone d'études et le pays tout entier. Pour les ménages touchés par l'utilisation de briquettes de balle de riz, la substitution du charbon de bois par ce combustible est intéressante car elle permettra respectivement de préserver tous les ans et par ménage de 5 personnes: 1,008 ha, 0,89 ha et 0,4.3 ha de forêt d'eucalyptus selon la teneur en liant de chaque briquette balle de riz .

C'est un avantage significatif pour eux car c'est une épargne forcée influant sur leur condition de vie. pour la zone d'étude, la valorisation des balles de riz qui n'a aucune utilité antérieurement présente un avantage particulier car non seulement un combustible alternatif au bois énergie mais aussi une contribution à la réduction de gaz à effet de serre émis par la cuisson avec le bois énergie dans les ménages.

C'est donc un apport de la population résidant dans la zone d'étude à la réduction du potentiel de réchauffement global (PRG) d'une part et d'autre part à la préservation des ressources forestières pouvant amorcer l'abondance de la pluviométrie dans la zone d'étude.

Enfin, pour le pays, cette préservation de ressource forestière allant de 1,008 ha à 0,4.3 ha de réduction par ménage et par an selon la composition en liant, présente un intérêt particulier car l'environnement et l'énergie va de pair et en synergie . Le fait de préserver l'environnement est une des priorités pour le pays dans l'optique de redonner à Madagascar son image d'antan : « ile verte, ile au parfum ».

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. CREAM. 2013, Région Atsimo-Andrefana, centre de recherches, d'études et d'appui à l'analyse économique à Madagascar (CREAM), Antananarivo, Madagascar.
2. FAO. 2017, Evaluation de la sécurité alimentaire à Madagascar, Antananarivo, Madagascar.
3. INSTAT. 2014, Madagascar en chiffre, Antananarivo, Madagascar.
4. Ministère de l'hydrocarbure et de l'Energie. 2017, Bilan énergétique Madagascar, Antananarivo, Madagascar.
5. Ministère de l'environnement et des forêts. 2013, Tableau de bord environnementale de la région Atsimo-Andrefana, Antananarivo, Madagascar.
6. WWF, 2012, Réglementation de la filière bois-énergie dans la Région Atsimo-Andrefana, Antananarivo, Madagascar