

BRIQUETTE D'HERBE DE SAVANE, UNE VRAIE ALTERNATIVE AU BOIS ENERGIE. CAS DES REALITES DE LA REGION IHOROMBE A MADAGASCAR

A.O.RAVONINJATOVO¹, L. ANDRIANAIVO², J. L. RASOANAIVO¹

¹ Département Énergétique, Centre National de Recherches Industrielle et Technologique (CNRIT), BP 6294 Antananarivo 101 Madagascar

² Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Petroleum Engineering Department, Equipe d'Accueil Exergie et Géoingénierie, Université d'Antananarivo, BP 1500 Antananarivo 101 Madagascar
e-mail : achillegc@yahoo.fr

Résumé

Ihorombe, une des 22 régions de Madagascar, située dans la partie sud du pays. Elle est classée parmi les localités les plus pauvres de l'île, avec 80,7 % de la population, soit un peu plus que la proportion des pauvres au niveau national : 76,5 %. Par ailleurs, c'est une zone possédant des ressources de taille comme : l'écosystème, l'élevage, l'agriculture et les végétations particulières. Pour l'écosystème, elle a un écosystème riche, abritant une biodiversité floristique et faunistique importante, mais elle subit diverses pressions, toutes d'origine anthropique, notamment sous formes de feux de brousse, feux sauvages, coupes massives pour le bois de chauffe et le charbonnage. Elle possède 369 472 ha de forêts naturelles, dont 49 959 ha sont protégées : la réserve spéciale du Pic Ivohibe, la réserve naturelle de Kalambatritra, une partie du parc national d'Andringitra et une partie de la forêt de Midongy. Les savanes des plateaux occupent les 2/3 de toute la superficie de la région et sont peuplées essentiellement d'espèces herbeuses : les andropogons (*haidambo*) et l'*Aristida (horona)*.

Sur le plan énergie domestique, la majorité des ménages ont encore un mode de vie traditionnel : plus de 7 ménages sur 10 utilisent encore le bois de chauffe ramassé comme principal combustible pour la cuisson. Le charbon y est utilisé par 16,1 % des ménages où les bois précieux comme le *varongy*, le *rotra* sont utilisés pour le charbonnage.

Les résultats des différents tests effectués au laboratoire du département énergétique du Centre National de Recherches Industrielle et Technologique (CNRIT) sis à Fiadanana Antananarivo, ont montré que : primo, la fécule de manioc est le liant le plus intéressant pour agglomérer l'herbe de savane; secundo, l'herbe de savane a une potentialité en biomasse de l'ordre de 10 à 15 t MS/ha/an ; tertio, les briquettes d'herbe de savane à 10% de liant peuvent concurrencer le charbon de bois car elles disposent respectivement d'un PCI moyen de 5552,43 kcal/kg, d'une consommation en combustible de 0,35 kg/h (0,36 kg/h pour le charbon de bois) moindre, d'une durée d'ébullition de 2,5 l d'eau plus rapide de 0,83 h (0,85 h pour charbon) et d'un rendement de 29,84% élevé par rapport à celui du charbon (23,74%). 60,5% des ménages, répartis dans trois catégories socio professionnelles différentes (ménage aisé, moyen, modéré) qui ont participé au test d'acceptabilité des briquettes d'herbe de savane, sont satisfaits de l'utilisation de ces briquettes d'herbe de savane sur sa capacité à cuire et à la commodité d'usage.

La substitution de la consommation annuelle en charbon de bois au niveau d'un ménage urbain du district d'Ihoso, région Ihorombe par la briquette d'herbe de savane peut préserver 0,1 ha de forêt d'eucalyptus, soit 908,8 ha/an pour les 9088 ménages urbains de la région Ihorombe et 611 562,30 ha/an pour l'ensemble des 6115623 ménages urbains de Madagascar, ce qui dépasse largement la superficie de forêt détruite en 2017 selon Global Forest Watch de l'ordre de 510 000 ha/an, soit la disparition de 3,8% des forêts à Madagascar.

Mots clés : herbe de savane, région Ihorombe, valorisation énergétique, briquette combustible, efficacité énergétique, bois énergie.

1. INTRODUCTION

Dans les pays en voie de développement, les principales sources d'énergies à l'usage domestique sont le charbon de bois et le bois de chauffe. Le bois énergie occupe une part importante à l'énergie consommée dans le ménage. Pour Madagascar, (92%) de l'offre énergétique est dominée par le bois-énergie (Instat, 2013), (WWF, 2012) et les produits pétroliers importés en totalité (7%) qui satisfont aux trois besoins que sont la cuisson (94%) de l'énergie consommée à Madagascar, l'éclairage et l'électricité (5%) et l'industrie et le commerce (1%). De plus, seul 15 % de la population (5 % en milieu rural) a accès à l'électricité qui est majoritairement produite par des énergies fossile et hydraulique.

Par ailleurs, selon un rapport de Banjara Hills Consults et la Nouvelle Politique Énergétique (NPE), les consommations moyennes en bois et charbon de bois en milieu rural et urbain ne sont pas pareilles : en milieu

urbain, la consommation annuelle en charbon de bois est de 125 kg/pers/an, soit 0,350 kg/pers/j tandis qu'en milieu rural, cette consommation est de 110 kg/pers/an, soit 0,300 kg/pers/j. Pour le bois, la consommation par capita par an est évaluée à : 270 kg/pers/an en milieu urbain et 513 kg/pers/an en milieu rural. Ces estimations permettent alors d'en déduire une consommation annuelle de près de 18,3 millions de m³ de bois en 2015 partagés entre

- 56 % de bois de chauffe ramassés dans les forêts naturelles ;
- 44 % transformés en charbon de bois à travers un processus de carbonisation à faible rendement massique (estimé entre 12 et 15 %).

Au niveau national, la demande en bois énergie (18,3 millions m³ par an) dépasse largement la potentialité en production durable (9,169 millions de m³ par an). Ainsi, plus de 60% de la consommation est couverte par une surexploitation des ressources forestières. Selon le consortium PERR-FH7 du REDD+ (Projet Eco-régional du Programme de Réduction des Emissions issues de la Déforestation et de la Dégradation des forêts) entre 2005 et 2013, Madagascar aurait connu un taux annuel de déforestation de plus de 1 % (soit une perte d'environ 40 000 ha de forêt par an), ce qui classe le pays parmi les plus touchés par la déforestation. Aujourd'hui, moins de 21 % de la superficie de l'île serait encore recouverte de forêts (World Bank, en ligne).

La consommation excessive et inefficace de bois-énergie, couplée avec une production insuffisante et une carbonisation à faible rendement, ainsi que la recherche de nouvelles terres agricoles et l'exploitation minière contribuent à la dégradation des écosystèmes forestiers (érosion, tarissement des réserves d'eau, diminution de la biodiversité, etc.) et participent grandement à l'augmentation des émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) du pays.

Face à la gravité de la situation à Madagascar sur la problématique énergétique d'une part et d'autre part sur la disparition en un temps record des ressources forestières, le présent travail de recherches s'est focalisé sur les herbes de savanes de par non seulement sur sa potentialité atteignant 10 à 12 t MS/ha/an mais aussi de son caractère envahissant qui occupe les 2/3 de la superficie de la région Ihorombe.

Ihorombe est une des 22 régions de Madagascar, située dans la partie sud du pays. C'est une région pauvre où la pauvreté touche 80,7 % de la population. Elle dispose pourtant des ressources de taille qui la diffèrent des autres régions de la grande île dont : l'écosystème, l'élevage, l'agriculture et les végétations particulières.

Sur le plan énergie domestique, la majorité des ménages de la Région Ihorombe ont encore un mode de vie traditionnel. Ainsi, plus de 7 ménages sur 10 utilisent encore le bois de chauffe ramassé comme principal combustible pour la cuisson. Pour le charbonnage, des bois précieux sont utilisés comme le *varongy*, le *rotra* etc. Le charbon y est utilisé par 16,1 % des ménages. Les herbes de savane sont brûlés tous les ans pour assurer la nourriture des bétails, la culture d'autres cultures vivrières comme le manioc et enfin faire disparaître les traces des voleurs de zébus après avoir commis les actes. Des questions se posent entre autres :

- les herbes de savane disposent d'un taux élevé en Matière sèche par hectare et par an, sa valorisation énergétique sous-forme de briquelette combustible n'est-elle pas possible pour la satisfaction des besoins domestiques locaux?
- Quelle est la technologie appropriée pour disposer de briquelette combustible, écologique, apte à substituer le bois énergie et acceptée par toutes les couches sociales ?
- Quel est le liant approprié pour agglomérer les herbes de savane et quelle est la teneur en liant la plus significative ?
- La nouvelle source d'énergie issue de la valorisation énergétique des herbes de savanes peut-elle concurrencer le bois énergie ?
- Quels sont les divers avantages apportés par la pénétration de cette briquelette combustible, nouvelle source d'énergie au niveau des ménages de la région d'Ihorombe et ceux du pays tout entier?

Ce travail de recherches essaie d'apporter des explications à ces questions posées.

2. METHODOLOGIE

2.1. Zone d'études : district d'Ihosy, région Ihorombe

2.1.1. Localisation

La Région Ihorombe se situe dans le Centre-Sud de Madagascar et fait partie de la province de Fianarantsoa. Elle est délimitée au Nord par la Région Haute Matsiatra, au Sud par la Région Anosy, à l'Est par la Région Atsimo Atsinanana, et à l'Ouest par la Région Atsimo Andrefana. Elle s'étend géographiquement entre les longitudes

44°98' et 46°62' et la latitude 21°61' et 23°10', sur une longueur allant de 100 km à 120 km, d'une largeur d'environ 200 km et une superficie de 26 930 km².

La Région Ihorombe est constituée de trois districts : Iakora, Ihosy et Ivohibe ; de superficies respectives : 4 258 km², 18 372 km² et 4 300 km². Elle a comme chef-lieu la ville d'Ihosy, laquelle est située à 602 km au Sud de la Capitale Antananarivo, en empruntant la RN 7.

La figure 1 suivante illustre la localisation de la région Ihorombe

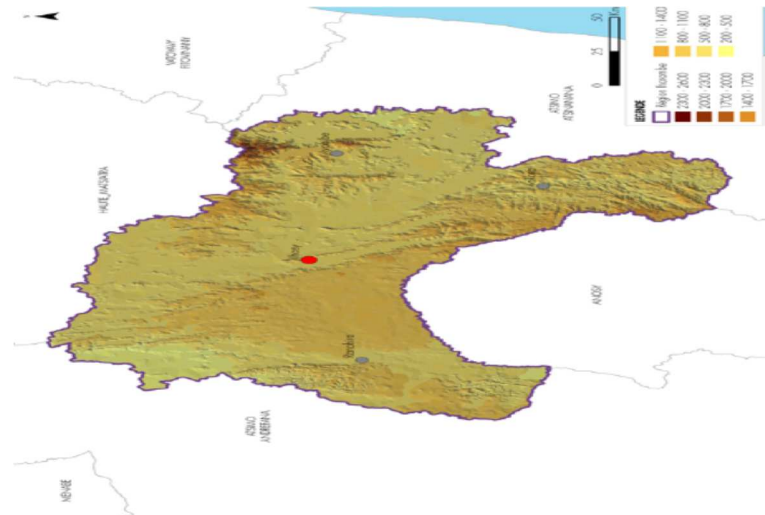


Figure 1 : Localisation de la Région Ihorombe

2.1.2. Population

La Région Ihorombe est la région la moins peuplée de Madagascar (PRD 2005). La densité moyenne de la population de la région est comprise entre 8,4 hab/km² et 9,3 hab/ km², comparée à une densité nationale de 34 hab/km². C'est aussi la région la moins densément peuplée de Madagascar.

L'effectif de la population de la Région Ihorombe pourrait se situer entre 225 000 et 250 000, sur la période 2009-2011. Ce qui représente environ 1,4/100 de la population totale de Madagascar.

2.1.3. Le climat

On distingue, dans la Région Ihorombe, trois types de climat :

- un climat tropical humide toute l'année, sur sa partie orientale (districts d'Iakora et d'Ivohibe)
- un climat tropical semi-humide (tendant vers le semi-aride) sur sa partie occidentale ;
- un climat tropical humide à faible précipitation dans la partie centrale c'est-à-dire dans le district d'Ihosy.
-

2.1.4. Les formations végétales

Trois types de végétations se rencontrent dans la région : des forêts naturelles, des savanes et des végétations spécifiques des massifs rocailloux.

a) Les forêts naturelles

Les forêts naturelles se rencontrent dans les secteurs Nord-Est et Sud-Est de la région, dans les districts d'Ivohibe et d'Iakora. Il s'agit de bandes de forêts rattachées aux corridors forestiers de l'Est (corridor forestier de Vondrozo et forêt de Midongy-Sud). Mais, ces forêts, qui sont confinées à l'extrême Est de la région, n'occupent qu'une petite partie du territoire. Ces bandes de forêts sont peuplées en majorité de bryophytes, de lichens, de fougères ou de grands arbres selon l'altitude et le relief.

b) Les savanes

Les savanes occupent la grande partie du territoire de la région, du pied des montagnes de Vohibory à l'Est jusqu'au plateau de l'Isalo à l'Ouest. Les savanes des plateaux sont peuplées essentiellement d'espèces herbeuses : les andropogons (*haidambo*) et l'*Aristida (horona)*. Les lits de rivières et les zones humides sont peuplés principalement de bambous phragmites (*bararata*) et de cyperacées.

c) Les végétations particulières

Les massifs de l'Isalo sont peuplés par une végétation un peu particulière constituée principalement d'Uapaca Bojeri (*tapia*). D'autres types de végétations particulières se rencontrent sur les forêts galeries qui bordent les lits des rivières et dans les zones marécageuses.

2.1.5. Type de combustibles

La majorité des ménages de la Région Ihorombe ont encore un mode de vie traditionnel. Ainsi, plus de 7 ménages sur 10 utilisent encore le bois de chauffe ramassé comme principal combustible pour la cuisson (tableau 1). Le charbon y est utilisé par 16,1 % des ménages. Les autres types de combustibles plus modernes comme le gaz, l'électricité ou le pétrole, y sont encore très rarement utilisés.

Tableau 1 : Répartition des ménages selon le type de combustible utilisé pour la cuisson

	Ihorombe (%)	Madagascar (%)
Bois ramassé	77,9	77,7
Bois acheté	2,0	4,5
Charbon	16,1	17,1
Gaz	n.s	0,2
Electricité	n.s	0,2
Pétrole	0,1	0,1
Autres	3,9	0,2
Total	100,0	100,0

Source : INSTAT/DSM/EPM 2010 ; note : n.s = non significatif

2.2. Travaux de laboratoire

2.2.1. Le choix de liant

Par définition, un liant est une substance servant à agglomérer plusieurs composants d'une matière. La masse du liant ne devra pas dépasser 10% de la masse totale de la matière agglomérée.

Ce travail de recherches a permis d'étudier sept variétés de liant pouvant être utilisés pour la confection de brique combustible, à savoir : le papier et carton, la farine de manioc, la fécule de manioc, l'argile, l'huile lourde, l'huile de vidange et l'amidon de maïs. Huit paramètres ont été étudiés pour déterminer le liant le mieux placé pour l'utiliser à la confection de brique combustible. Après le test effectué au laboratoire énergétique du CNRIT, trois liants parmi les sept types de liants sont les mieux placés pour être employés, ce sont : la farine de manioc, la fécule de manioc et l'argile. Les résultats de ces tests et analyses sont résumés dans le tableau 2 ci-dessous.

Tableau 2 : Résultat étude comparatif sur les liants

Paramètres	Farine de manioc	Fécule de manioc	Argile
Mode d'obtention	Moyen	Moyen	Facile
Disponibilité	National	Régional	National
Facilité d'utilisation à chaud et à froid	Moyenne	Facile	Moyenne
Coût du produit fini (Ar/kg)	60	258	40
Concurrence alimentaire	Oui	Oui	Non
Echelle d'efficience	80	100	70
Point fort	Prix relativement abordable	Pouvoir adhésif élevé	Largement disponible
Faiblesse	Pouvoir adhésif médiocre	Coût élevé	Résistance à la compression faible
Résistance aux	3,8	6,0	2,9

sollicitations (MPa)			
----------------------	--	--	--

Source : Essai au labo du CNRIT, Avril 2019

Le résultat des tests récapitulés dans le tableau ci-dessus montre que la fécule de manioc est en bonne place par rapport aux autres liants. La fécule est alors transformée en empois avant d'être utilisée.

2.2.2. Les proportions en liant et en matière fine

Les proportions en liant et en matière fine pour la production de briquette à base d'herbe de savane se présentent comme suit :

- En liant : 5%, 7%, 8% et 10%
- En matière fine : 25%, 36%, 50%, 73% et 80%.

2.2.3. Le mélange

Une fois la proportion est terminée, on mélange toutes les compositions. L'ensemble est alors placé manuellement dans la matrice, le piston comprime les matières jusqu' à ressentir un contre mouvement. Le démoulage est par la suite effectué grâce à un dispositif de démoulage.

2.2.4. Les caractères physico chimiques des briquettes combustibles

L'efficacité d'une briquette dépend de ses caractéristiques physico-chimiques telles que : l'humidité, la teneur en cendre, la teneur en matières volatiles, la teneur en carbone fixe et le pouvoir calorifique Inférieur (PCI). L'objectif est de pouvoir comparer les résultats avec ceux du charbon de bois.

2.2.4.1. Taux d'humidité

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

Principe de mesure : L'échantillon est chauffé dans une étuve CARBOLITE R38 à 105°C et on effectue une pesée après 24 h. Sa détermination suit la norme européenne EN 14774. Le taux d'humidité est obtenu par la formule suivante :

$$TH = \frac{M_{\text{humide}} - M_{\text{seche}}}{M_{\text{humide}}} \times 100$$

Avec TH: taux d'humidité exprimer en (%)

M_{humide} : masse de l'échantillon

M_{seche} : masse obtenu apres chauffage a 105°C

2.2.4.2. Taux de Matières Volatiles (MOV)

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

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

$$MOV = \frac{M_{105} - M_{505}}{M_{\text{seche}}} \times 100$$

Avec :

MOV : Taux de matières volatiles,

M_{105} : Masse obtenu après chauffage à 105°C,

M_{505} : Masse obtenu après chauffage 550°C.

M_{seche} : Masse de l'échantillon

2.2.4.3. Taux de cendres (TC)

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

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

$$TC = \frac{M_{850}}{M_{seche}} \times 100$$

Avec :

TC : Taux de Cendre

M_{850} : Masse obtenue après chauffage à 850°C

M_{seche} : Masse de l'échantillon

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

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

$$TC = \frac{M_{850}}{M_{seche}} \times 100$$

Avec :

TC : Taux de Cendre

M_{850} : Masse obtenue après chauffage à 850°C

M_{seche} : Masse de l'échantillon

2.2.4.4. Taux de carbone fixe (CF)

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

Le taux de carbone fixe peut être déterminé soit :

- en suivant la norme ASTM et il est calculé avec la formule suivante :

$$CF = \frac{M_{550} - M_{850}}{M_{550}}$$

- en appliquant la formule suivante : $TCF = 100 - (TH + Ce + MOV)$

Avec : TH : Humidité ; CF : Taux de Carbone Fixe ; MOV : Taux de Matière Volatile.

2.2.4.5. Pouvoir Calorifique

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

On parle de « Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) », lorsque la combustion s'effectue à une pression constante c'est-à-dire à l'air libre. C'est-à-dire que la chaleur latente (qui est difficilement récupérable) de la vapeur d'eau n'est pas récupérée à ce moment [23]. C'est cette valeur du PCI qui est récupérable comme énergie par l'utilisateur.

Principe de mesure : Le PCI peut être déterminé de deux façons différentes :

- à l'aide d'une bombe calorimétrique (PHYWE B1245) en présence d'oxygène et un suivi de température à chaque 30 sec doit être assuré jusqu'à la stabilisation. Sa détermination suit la norme française NF ISO 1928, 2004 ;
- à partir de la formule de CASSAN suivante : $PCI = (100 - TC) * 80$ en kcal/kg
où : TC : Taux de cendre

2.2.5. Tests d'efficacité et d'efficacité énergétique des briquettes fabriquées à bases d'herbe de savane par rapport au charbon de bois et bois de chauffe et pour une teneur en liant de 5%,7%, 8% et 10% selon la matière première à agglomérer.

Pour déterminer l'efficacité et de l'efficacité énergétique des briquettes à bases d'herbe de savane, il faut passer à travers :

- les différents tests suivants : drop test, tambour tournant, test de sécabilité, test d'inflammabilité, test de cuisine contrôlée et test d'ébullition d'eau ;
- la détermination de la consommation en briquette à base d'herbe de savane, en charbon de bois et en bois de chauffe par l'utilisation d'un foyer amélioré à rendement bien défini ;
- la détermination de la puissance du foyer amélioré par l'utilisation de chaque briquette à base d'herbe de savane à teneur en liant de 5%,7%,8% et 10% ;
- l'efficacité (rendement) du foyer amélioré par l'utilisation de chaque briquette à base d'herbe de savane à teneur en liant de 5%,7%,8% et 10% .

2.2.5.1. Les tests d'efficacité et d'efficacité énergétique des briquettes à base d'herbe de savane pour les teneurs en liant de 5%,7%, 8% et 10%.

- *Le 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.

- *Le 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.

- *Le 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.

- *Le 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.

- *Le 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 imbrûlés (combustible restant lors d'un TEE) pour une nouvelle cuisson.

Les briquettes à bases d'herbe de savane, 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 de chaque briquette sera déduite du résultat des tests effectués 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 réutilisé les imbrûlés issus de chaque test d'ébullition d'eau.

- *Le 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.

2.2.5.2. Approche adoptée pour l'évaluation de l'efficacité et de l'efficacité énergétique des briquettes à base d'herbe de savane et à teneur en liant de 5%, 7%, 8% et 10% par rapport à un foyer amélioré de rendement bien défini.

L'efficacité et l'efficacité énergétique de chaque briquette à base d'herbe de savane par rapport au charbon de bois et bois de chauffe dépendent du résultat des Tests d'Ébullition d'Eau (TEE) permettant de déterminer la consommation de chaque briquette à base d'herbe de savane et du 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 les Tests d'Ébullition d'Eau. Ces TEE permettent d'évaluer la consommation en briquette à base d'herbe de savane vis-à-vis des autres combustibles couramment utilisés (charbon de bois, bois de chauffe).

a) Test d'Ébullition d'Eau de Briquette à base d'herbe de Savane (B.H.S)

La réalisation de ces tests d'ébullition d'eau (Figure 1) consiste à grouper les activités à entreprendre sous forme de Groupes de Test $[GT(x)_{i,j}]$ où :

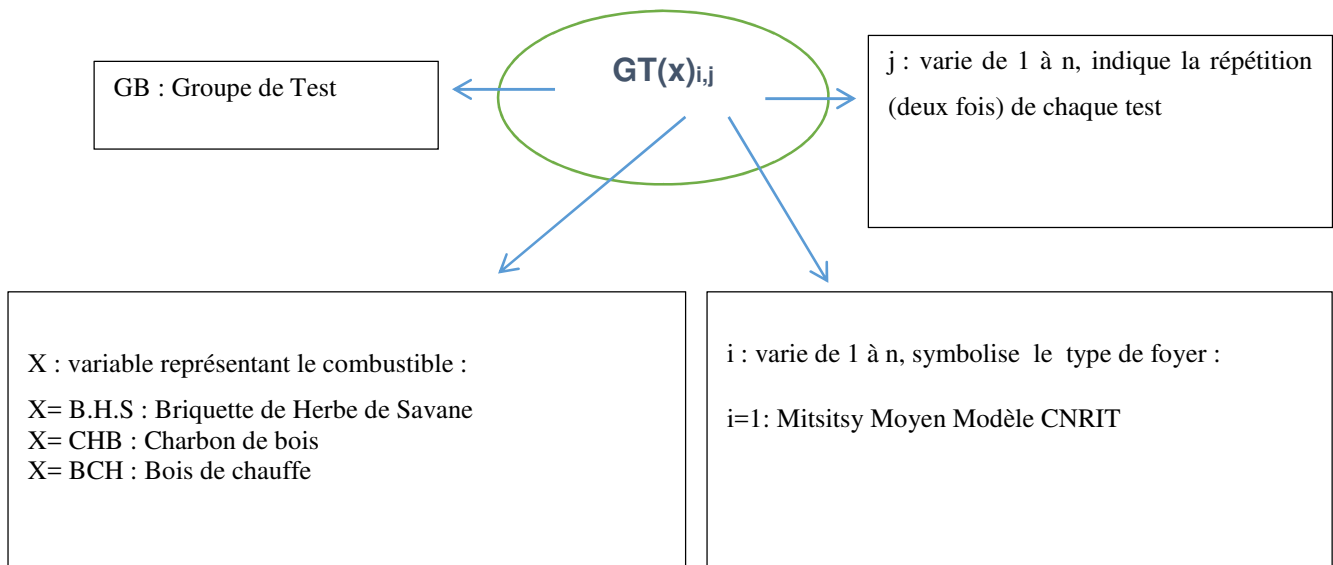


Figure 1 : Groupe de test pour les briquettes à base de herbe de savane

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

- Le groupe de test utilisant la Briquette d'Herbe de Savane $[GT(B.H.S)_{i,j}]$ avec le foyer Mitsitsy comprenant les : $GT(B.H.S(5\%))_{i,j}$ composés par les deux tests $GT(B.H.S(5\%))_{i,1}$ à $GT(B.H.S(5\%))_{i,2}$;
- Le groupe de test utilisant la Briquette d'Herbe de Savane $[GT(B.H.S)_{i,j}]$ avec le foyer Mitsitsy comprenant les : $GT(B.H.S(7\%))_{i,j}$ composés par les deux tests $GT(B.H.S(7\%))_{i,1}$ à $GT(B.H.S(7\%))_{i,2}$;

- Le groupe de test utilisant la Briquette d’Herbe de Savane [GT(B.H.S) _{i, j}] avec le foyer Mitsitsy comprenant les :_GT (B.H.S (8%))_{1, j} composés par les deux tests GT (B.H.S (8%))_{1,1} à GT (B.H.S (8%))_{1,2};
- Le groupe de test utilisant la Briquette d’Herbe de Savane [GT(B.H.S) _{i, j}] avec le foyer Mitsitsy comprenant les :_GT (B.H.S (10%))_{1, j} composés par les deux tests GT (B.H.S (10%))_{1,1} à GT (B.H.S (10%))_{1,2}
- Le groupe de test utilisant le charbon de bois [GT(CHB) _{i, j}] avec le foyer Mitsitsy comprenant les : GT(CHB)_{1, 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 3 matriciel suivant

Tableau 3: Représentation matricielle des 7 groupes de test, des combustibles et du foyer Mitsitsy

Combustible \ Foyer	Mitsitsy Moyen Modèle (CNRIT)
B.H.S (5%)	GT (B.H.S (5%)) _{1, j}
B.H.S (7%)	GT (B.H.S (7%)) _{1, j}
B.H.S (8%)	GT (B.H.S (8%)) _{1, j}
B.H.S (10%)	GT (B.H.S (10%)) _{1, j}
CHB	GT(CHB) _{1, j}
BCH	GT(BCH) _{1, j}

D’après ce tableau matriciel, les tests sont faits pour 7 groupes de test avec deux répétitions chacun.

2.2.6. Méthode de calcul pour la détermination de la consommation (kg/h) en charbon de bois, bois de chauffe et en briquette à base d’herbe de savane à 5%, 7%, 8% et 10% en liant.

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 de chaque briquette à base d’herbe de savane de composition en liant 5%, 7%, 8% et 10% ;
- L’efficacité ou rendement de chaque foyer par l’utilisation de chaque briquette à base d’herbe de savane de composition en liant de 5%, 7%, 8% et 10% ;
- la consommation de combustible (en kg/h) de chaque briquette à base d’herbe de savane 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.

2.2.7. Méthode de calcul pour la détermination de la Puissance (Watt) du foyer amélioré par l'utilisation comme combustible le charbon de bois, le bois de chauffe et chaque brique à base d'herbe de savane pour les teneurs en liant de 5%, 7%, 8% 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 :

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

Et par suite :

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

Le tableau 4 représente la valeur des paramètres de détermination de la puissance

Tableau 4 : valeur des paramètres de détermination de la puissance

C _{eau}	Chaleur massique de l'eau	4180 J/kg. °C
L _{eau}	Chaleur latente de vaporisation de l'eau	2260000 J/kg
M _{eau initiale}	Masse initiale de l'eau	2,5kg
M _{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

2.2.8. Evaluation de l'efficience (rendement) du foyer amélioré par l'utilisation comme combustible le charbon de bois, le bois de chauffe et chaque briquette à base d'herbe de savane à teneurs respectives en liant de : 5%, 7%, 8% et 10% .

L'évaluation de l'efficience du foyer amélioré 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 :

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

En remplaçant Q, par sa valeur ci-dessus, et on a le résultat suivant :

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

Pour la briquette à base d'herbe de savane, on aura le tableau 5 suivant :

Tableau 5 : valeur des paramètres pour la briquette à base d'herbe de savane

PC combustible	Pouvoir calorifique du combustible ; soit : <ul style="list-style-type: none"> ▪ PC_{B.H.S} (5%) ----- ▪ PC_{B.H.S} (7%) ----- ▪ PC_{B.H.S} (8%) ----- ▪ PC_{B.H.S} (10%) ----- 	kcal/kg
P combustible	Poids du combustible consommé, soit : <ul style="list-style-type: none"> ▪ PC_{B.H.S} (5%) ----- ▪ PC_{B.H.S} (7%) ----- ▪ PC_{B.H.S} (8%) ----- ▪ PC_{B.H.S} (10%) ----- 	kg
η	Rendement du foyer	Pourcent (%)

2.2.9. Méthode de détermination du 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.

2.2.9.1. Approche adoptée pour le calcul du PCS de briquette d'herbe de savane

Il existe plusieurs méthodes permettant de déterminer le PCS, mais dans ce travail de recherches, nous allons utiliser les méthodes de prédiction de PCS développés par Thipkhunthod et al., 2005; Chang et al., 1997, en tenant compte de la teneur en MS des briquettes à 4% , 5%, et à 10% en liant. La corrélation entre la teneur en MS et le PCS, s'écrit comme suit :

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

3. RESULTATS

3.1. BRIQUETTE A BASE D'HERBE DE SAVANE

a) *Selon les teneurs en liant : 5%, 7%, 8% et 10%*

3.1.1. Le PCI (min, max) de briquette de Herbe de Savane selon la composition en liant de 5%, 7%, 8% et 10%

Pour voir l'influence du liant sur le PCI, quatre compositions en liant ont testées au laboratoire du CNRIT. Les résultats de ces essais de laboratoire sont récapitulés dans le tableau suivant.

Tableau 6 : PCI (min, max) des différentes compositions en liant des briquettes d'herbe de savane

Liant (%)	PCI Min	PCI Max
5	5009,20	5997,67
7	5210,74	5754,31
8	5118,75	5882,75
10	5400,78	5704,07

3.1.2. PCI moyen briquettes de Herbe de Savane à 5%, 7%, 8% et 10% en liant

Le tableau 7 suivant donne la valeur du PCI Moyen de la briquette à 5%, 7%, 8% et 10% en liant.

Tableau 7 : PCI moyen des différentes compositions en liant des briquettes d'herbe de savane

Liant (%)	PCI Min	PCI Max	PCI Moyen
5	5009,2	5997,67	5503,44
7	5210,74	5754,31	5482,53
8	5118,75	5882,75	5500,75
10	5400,78	5704,07	5552,43

Ce tableau montre que *plus la teneur en liant est élevée, plus le PCI Moyen est intéressant.*

b) *Selon les teneurs en matière fine*

3.1.3. Le PCI (min, max) de briquette de Herbe de Savane selon la teneur en matière fine de 25%, 36%, 50%, 73% et 80%.

Pour voir l'influence des matières fines sur le PCI des briquettes d'herbe de savane, des échantillons de briquette d'herbe avec cinq compositions en matières fines ont été réalisées. Le tableau 8 suivant récapitule les résultats issus des travaux de laboratoire.

Tableau 8 : PCI min/max des cinq valeurs de teneur en matière fine

Matière Fine (%)	PCI Min	PCI Max
25	5009,18	5701,28
36	5210,74	5754,31
50	5327,74	5704,07
73	5118,75	5882,75
80	5380,21	5997,67

Ce tableau informe la valeur du PCI Min, Max pour les cinq valeurs de matière fine.

3.1.4. Le PCI moyen de briquette d'Herbe de Savane selon la teneur en matière fine de 25%, 36%, 50%, 73% et 80%.

Le tableau 9 suivant donne la valeur du PCI Moyen de la briquette à 25%, 36%, 73%, 8% et 10%) en matière fine.

Tableau 9 : PCI moyen des différentes compositions en matière fine des briquettes d’herbe de savane

Matière Fine (%)	PCI Min	PCI Max	PCI Moyen
25	5009,18	5701,28	5355,23
36	5210,74	5754,31	5482,53
50	5327,74	5704,07	5515,91
73	5118,75	5882,75	5500,75
80	5380,21	5997,67	5688,94

Ce tableau montre que *plus la teneur en liant est élevée, plus le PCI Moyen est important.*

3.1.5. Les courbes de variations du PCI minimum et maximum de briquettes d’Herbe de Savane selon la composition en liant et en matière fine.

a) Influence du liant sur le PCI (Figure 2)

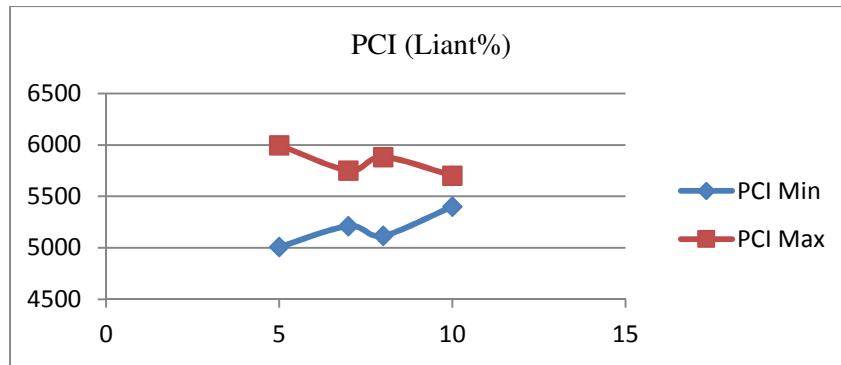


Figure 2 : Influence du liant sur le PCI

b) Influence de la matière fine sur le PCI

La figure 3 suivante informe l’influence des matières fines sur le PCI des briquettes d’herbe de savane.

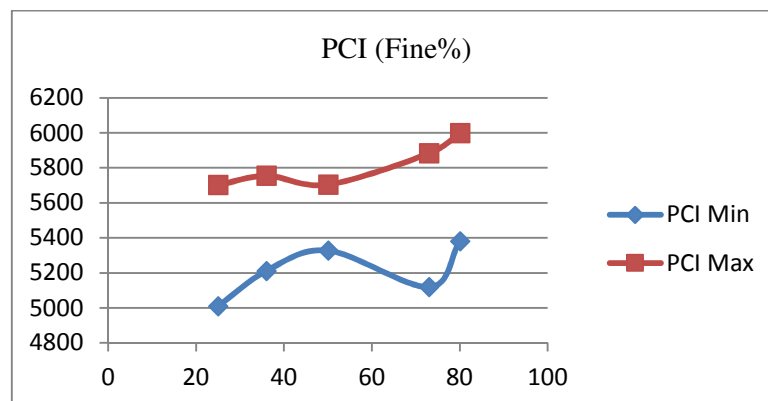


Figure 3 : Influence de la matière fine sur le PCI

Cette figure informe que ce soit le PCI Min ou le PCI Max, *plus la teneur en matière fine est élevée, plus le PCI est important.*

c) *Influence des teneurs en liant sur la Matière Volatile et le carbone fixe*

Les teneurs en liant ont une influence sur la Matière volatile et le carbone fixe. Le tableau 10 suivant informe cette influence.

Tableau 10 : Influence des teneurs en liant des briquettes d’herbe de savane sur la Matière volatile et le carbone fixe.

Liant (%)	CF Max	CF Min	IMV Max	IMV Min
5	52,17	41,28	26,10	19,01
7	48,08	41,20	31,53	25,82
8	43,09	39,81	27,18	22,72
10	51,58	47,39	21,95	18,76

La figure 4 suivante informe l’influence des liants sur la matière volatile et le carbone fixe.

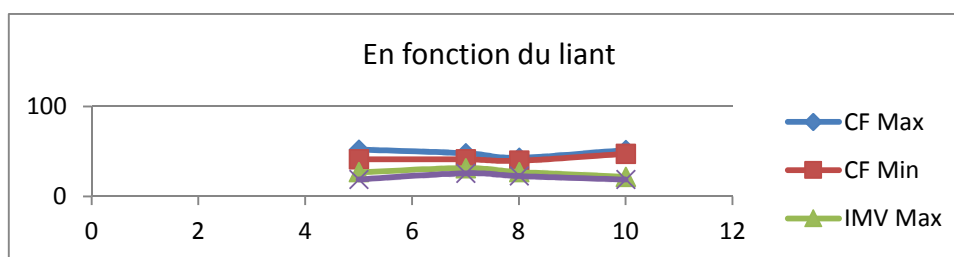


Figure 4 : Influence de la matière fine sur le PCI

Cette figure 4 montre que la variation de la teneur en liant a une influence sur le carbone fixe et la matière volatile. Une teneur en liant oscillant autour de 8% est la plus mauvaise valeur du carbone fixe. Par contre, une teneur de 7% en liant donne un mauvais combustible avec une teneur élevée en matière volatile.

d) *Influence des teneurs en matière fine sur la Matière Volatile et le carbone fixe*

Les teneurs en matière fine ont une influence sur la Matière volatile et le carbone fixe. Le tableau 11 suivant informe cette influence.

Tableau 11 : Influence des teneurs en matière fine des briquettes d’herbe de savane sur la Matière volatile et le carbone fixe.

Matière fine (%)	CF Max	CF Min	IMV Max	IMV Min
25	49,06	41,28	24,29	20,38
36	48,08	41,20	31,53	25,83
50	51,58	43,67	23,45	18,76
73	43,09	39,81	27,18	22,72
80	52,17	47,78	25,99	20,53

La figure 5 suivante informe l’influence des matières fines sur la matière volatile et le carbone fixe.

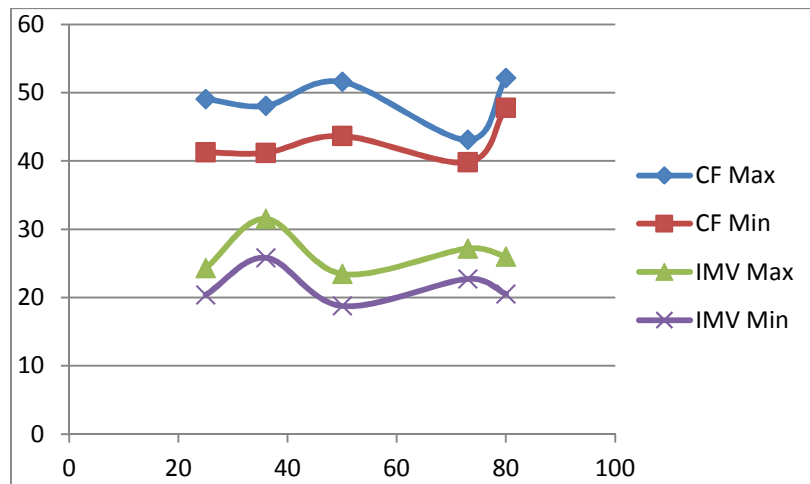


Figure 5 : Influence des matières fines sur la matière volatile et le carbone fixe.

3.1.6. Les courbes de variations du PCS minimum et maximum de briquettes d'Herbe de Savane selon la composition en liant et en matière fine.

a) Variation du PCS pour 5%, 7%, 8% et 10 % en liant

La variation des liants ont des influences sur le PCS. Le tableau 12 suivant informe cette influence.

Tableau 12 : Influence des liants sur le PCS

Liant (%)	PCI Min	PCS Max	PCS Moyen
5	6001,59	6914,41	6458,00
7	6500,80	6522,55	6511,68
8	6104,46	6169,12	6136,79
10	6680,33	6884,64	6782,49

La figure 6 suivante informe l'influence des liants sur le PCS.

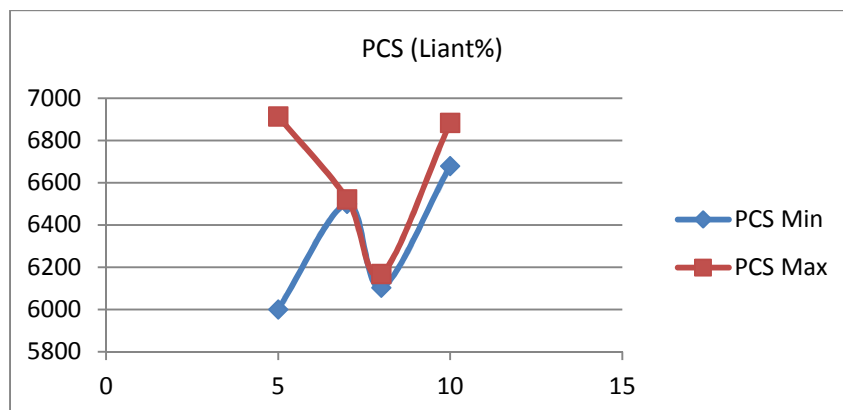


Figure 6 : Influence du liant sur le PCS

b) Variation du PCS pour 25%, 36%, 50%, 73 % et 80% en Matière fine

La matière fine a des influences sur le PCS. Le tableau 13 suivant informe ces influences.

Tableau 13 : Influence de la composition de la matière fine sur le PCS

Matière Fine (%)	PCS Min	PCS Max
25	6001,59	6057,56
36	6500,80	6522,55
50	6680,33	6884,64
73	6104,46	6169,12
80	6832,18	6914,41

La figure 7 suivante informe l'influence des matières fines sur le PCS

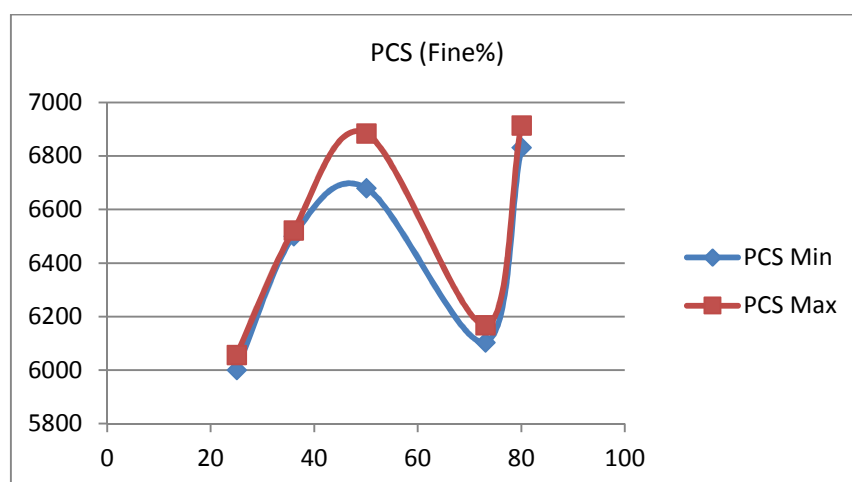


Figure 7 : Influence des matières fines sur le PCS

3.1.7. Rapport PCS/PCI Moyen

Le tableau 14 suivant récapitule le rapport PCS/PCI selon la teneur en liant.

Tableau 14 : Rapport PCS/PCI en liant

Liant (%)	PCI Min	PCI Max	PCI Moyen	PCS Moyen	PCS/PCI Moyen
5	5009,2	5997,67	5503,44	6458,00	1,17
7	5210,74	5754,31	5482,53	6511,68	1,19
8	5118,75	5882,75	5500,75	6136,79	1,12
10	5400,78	5704,07	5552,43	6782,49	1,22

Ce tableau 14 montre que le rapport PCS/PCI Moyen oscille autour de 1,12 à 1,19.

3.1.8. Efficacité énergétique des briquettes de Herbe de Savane à 5%, 7%, 8% et 10 % en liant par rapport au charbon de bois et au bois de chauffe.

Cette partie informe les résultats des différents tests et d'efficacité énergétique des briquettes d'herbe de savane par rapport au charbon de bois et du bois de chauffe. Le tableau suivant récapitule le résultat respectif :

- du test de consommation en combustible des briquettes d'herbe de savane à teneur en liant de 5%, 7%, 8% et 10% ;
- de la puissance de chaque foyer en utilisant les briquettes d'herbe de savane à teneur en liant de 5%, 7%, 8% et 10% ;
- du rendement de chaque foyer en utilisant les briquettes d'herbe de savane à teneur en liant de 5%, 7%, 8% et 10% .

De plus, le tableau 15 met en exergue la comparaison de la performance de chaque combustible dont les briquettes à base d'herbe de savane ainsi que le charbon de bois et le bois de chauffe.

Tableau 15 : Récapitulatif des résultats des différents tests d'efficacité énergétique des briquettes d'herbe de savane avec le charbon de bois et le bois de chauffe.

Combustibles	PCI (kcal/kg)	PCS (kcal/kg)	consommation moyenne (kg/h)	Durée ébullition (h)	Puissance (W)	Energie transmise par le foyer (j)	Rendement (%)
Herbe de savane							
-Teneur en liant							
5%	5503,44	6458,00	0,35	1,08	627,95	1883835	58,49
7%	5482,53	6511,68	0,37	1	523,29	1883835	51,38
8%	5500,75	6136,79	0,365	0,92	570,86	1883835	45,52
10%	5552,43	6782,49	0,35	0,83	627,95	1883835	29,84
Charbon de bois	6700		0,36	0,85	636,23	1943824	23,74
Bois de chauffe	4350		0,54	0,84	574,73	1744196	21,04

En tenant compte de ce tableau récapitulatif et en analysant un à un ces paramètres, on peut dire que :

- Primo, du point de vue PCI, c'est le charbon de bois qui a le PCI plus élevé que celui de la briquette d'herbe de savane et le bois de chauffe quel que soit la teneur en liant;
- Secundo, du point de vue consommation en combustible, c'est la briquette d'herbe de savane à 5% et 10% en liant qui est la plus intéressante (0,35 kg/h) par rapport au charbon de bois (0,36 kg/h) ;
- Tertio, la durée d'ébullition des briquettes d'herbe de savane à 10% en liant est plus rapide (0,83 h) et très performante par rapport aux briquettes d'herbe de savane à 5% en liant (1,08 h). Cette situation place la briquette d'herbe de savane à 10% en liant à la 1^{ère} place même si la briquette d'herbe de savane à 5% dispose d'un PCI élevé.
- Quarto, du point de vue rendement, c'est la briquette d'herbe de savane à 10% en liant qui est le plus intéressant par rapport au charbon de bois et au bois de chauffe.

En bref, les briquettes d'herbe de savane à 10% en liant sont les mieux placées pour pouvoir concurrencer le charbon de bois et le bois de chauffe car elles disposent respectivement une durée d'ébullition rapide, une faible consommation en combustible et un rendement élevé par rapport au charbon de bois et au bois de chauffe. Dans ce cadre, c'est la briquette d'herbe de savane à 10% en liant est le combustible qui peut concurrencer le charbon de bois.

4. AVANTAGES APPORTES PAR LA PENETRATION DES BRIQUETTES D'HERBE DE SAVANE DANS LES MENAGES URBAINS DU district d'Ihosal, région Ihorombe

Les avantages peuvent se présenter sous-forme quantifiable et non quantifiable. Du point de vue quantifiable, l'évaluation respective de l'équivalent en poids de la consommation annuelle en charbon de bois pour un seul ménage et la superficie de forêt préservée par cette substitution permettra de disposer les avantages quantifiables. Dans cette partie, nous allons essayer d'évaluer l'équivalent en poids de charbon de bois substitué par l'ensemble des ménages de la région Ihorombe ainsi que la forêt préservée en une année par ces ménages.

4.1. Equivalent en poids de la consommation annuelle en charbon de bois par ménage substituée par la briquette d'herbe de savane

En tenant compte respectivement que :

- la consommation moyenne par habitant au niveau national est estimée à 100 kg/an de charbon de bois, soit en moyenne 600 kg/ménage/an ;
- le Pouvoir calorifique Inférieur (PCI) moyen du charbon de bois d'eucalyptus est de 6700 kcal/kg ;
- le Pouvoir calorifique Inférieur (PCI) moyen de la briquette d'herbe de savane est de 5552,43 Kcal/kg ;
- la relation suivante : $m_1 \cdot PCI_1 = m_2 \cdot PCI_2$, où :
 - o m_1 = masse de charbon de bois d'eucalyptus consommée/an par 1 ménage et ;
 - o m_2 = masse équivalente en charbon de bois d'eucalyptus consommée/an par 1 ménage et substituée par la briquette d'herbe de savane ;
 - o PCI_1 = Pouvoir calorifique Inférieur (PCI) moyen du charbon de bois d'eucalyptus ;
 - o PCI_2 = Pouvoir calorifique Inférieur (PCI) moyen de la briquette d'herbe de savane.

Ainsi, après calcul, on a trouvé que : $m_2 = 6700 \cdot 600 / 5552,43 = 724,01$ kg/an/ménage.

Ce qui signifie que la masse équivalente en charbon de bois est de : 724,01 kg/an/ménage. Cela signifie que si un ménage utilise la briquelette d'herbe de savane au lieu du charbon de bois, ce ménage a besoin de 724,01 kg/an de briquelette d'herbe de savane pour ses besoins énergétiques annuels.

4.2. Superficie de forêt préservée correspondant à l'équivalent en poids de la consommation annuelle en charbon de bois par ménage substituée par la briquelette d'herbe de savane

En tenant compte :

- des données du Centre Forestier de Taolagnaro (CFT) en 2005 où : « 1 ha de forêt d'eucalyptus produit 200 sacs de charbon de 35 kg » soit : $200 \text{ kg} \cdot 35 \text{ kg} = 7000 \text{ kg}$ de charbon de bois ;
- que le rendement de carbonisation à meule traditionnelle est de 10%, c'est à dire que pour 100 kg de bois vert, on aura 10 kg de charbon de bois.

Ainsi, compte tenu de ces données, on peut tirer que :

- o pour 1ha de forêt d'eucalyptus, on aura 70000 kg de bois vert

En se référant du résultat obtenu antérieurement que la masse équivalente en charbon de bois d'eucalyptus consommée/an par 1 ménage et substituée par la briquelette d'herbe de savane est de 724,01 kg/an/ménage, on peut évaluer à partir de ces données susmentionnées la superficie de forêt préservée. Après calcul, on a trouvé : 0,10 ha/an/ménage.

En bref, la substitution par un ménage de sa consommation en charbon de bois de 600 kg/an par 724,01 kg/an peut préserver 0,10 ha de forêt d'eucalyptus/an.

4.3. Les avantages apportés par la pénétration de cette briquelette à base d'herbe de savane au niveau respectif des ménages, de la commune touchée par le projet et au niveau de la nation tout entière ?

Dans un premier temps, ce sont les ménages de la région Ihorombe qui obtiennent les premiers les briquelettes d'herbe de savane, car ce sont chez eux que ces ressources en herbe de savane sont en abondance, car 2/3 de la superficie sont couvertes par cette biomasse.

a) Au niveau des ménages

Les avantages peuvent se présenter sous-forme quantifiable et non quantifiable. Du point de vue quantifiable, nous avons déjà évalué l'équivalent en poids de la consommation annuelle en charbon de bois pour un seul ménage et la superficie de forêt préservée par cette substitution. Dans cette partie, nous allons essayer d'évaluer l'équivalent en poids de charbon de bois substitué par l'ensemble des ménages de la région Ihorombe ainsi que la forêt préservée en une année par ces ménages.

- o *Equivalent en poids du charbon de bois consommé par l'ensemble des ménages du district d'Ihoso de la région Ihorombe*

L'Institut national de la Statistique (Instat) de Madagascar a donné la répartition des ménages par région à Madagascar pour l'année 2018, selon le tableau 16 suivant :

Tableau 16 : Effectif et taille moyen des ménages

Région	Nombre de ménage			Taille moyenne ménage		
	Milieu de Résidence			Milieu de Résidence		
	Urbain	Rural	Ensemble	Urbain	Rural	Ensemble
Ihorombe	9 088	83 410	92 498	4,3	4,6	4,5
Total Région	1 309 912	4 805 711	6 115 623	3,8	4,3	4,2

Source : Résultats Provisoire RGPH-3, INSTAT- CCE, 2018

Ce tableau 16 montre que la région Ihorombe comprend 9088 ménages en milieu urbain. Ces ménages utilisent le charbon de bois pour ses besoins énergétiques quotidiens. Selon le résultat trouvé précédemment, un ménage consomme 724,01 kg/an en brique de d'herbe de savane au lieu de 600 kg/an en charbon de bois. En milieu rural, c'est le bois de chauffe qui est le plus consommé dans ladite région. Le tableau 17 suivant récapitule le gain environnemental par la substitution du charbon de bois par la brique de d'herbe de savane.

Tableau 17 : Gain environnemental par substitution du charbon de bois par la brique de d'herbe de savane par l'ensemble des ménages urbains de la région Ihorombe

Combustible		charbon de bois	Brique de d'herbe de savane
Consommation/an/ménage (kg/an)		600	724,01
Effectif ménage urbain région Ihorombe	9 088		
consommation/an/total ménage urbain (kg/an)		5 452 800,00	6 579 802,88
Forêt détruite par consommation charbon/ménage/an (ha)	0,086		
Forêt détruite par consommation charbon/tout ménage urbain/an (ha)		781,57	
Forêt préservée/ménage/an (ha)	0,1		
<i>Gain environnemental</i> : Forêt préservée par utilisation brique de d'herbe de savane/total ménage urbain/an (ha)			908,8

Ce tableau 17 montre qu'un ménage urbain de la région Ihorombe détruit 0,086 ha de forêt pour assurer ses besoins annuels de 600 kg de charbon de bois, si on tient compte du rendement de carbonisation de 10%. Ainsi, pour les 9088 ménages urbains de ladite région, la forêt détruite est de 781,57 ha/an. Par contre, le fait de substituer le charbon de bois par la brique de d'herbe de savane permettra de préserver 0,10 ha pour un seul ménage. Ainsi, si les 9088 ménages de la région n'utilisent plus le charbon de bois, la forêt préservée sera de 908,8 ha.

En bref, le volume de forêt préservé dépend du taux de pénétration de la brique de d'herbe de savane au niveau de chaque ménage d'une part et d'autre part du niveau de sensibilisation reçue par chaque ménage sur l'importance de l'environnement qui joue un rôle important sur la vie de la population.

b) Au niveau des ménages urbains de Madagascar

A Madagascar, les ménages sont parmi les grands consommateurs d'énergie et sont parmi la source de déforestation des ressources forestières pour la production de charbon de bois à faible rendement de carbonisation. Selon Vieilledent et al, 2018, Madagascar a connu ces 60 dernières années, une importante disparition et fragmentation de ses forêts, avec une diminution de près de 44% de sa couverture forestière. L'année 2017, selon Global Forest Watch, Madagascar se classe 4^{ème} pays en terme de déforestation avec 510 000 ha détruits en une année, soit la disparition de 3,8% des forêts à Madagascar.

Face à cette disparition rapide de la forêt dans le pays et en tenant compte des résultats issus de ce travail de recherches montrant qu'un seul ménage pourra préserver 0,1 ha/an s'il utilise comme source d'énergie la brique de d'herbe de savane au lieu du charbon de bois. Quelle est donc la superficie préservée par la totalité des ménages urbains à travers le pays si ces ménages utilisent la brique de d'herbe de savane au lieu de charbon de bois ?

Les résultats provisoires RGPH-3 de l'Instat ont donné que le nombre total des ménages urbains est de 6 115 623 en 2018, avec une taille moyenne de ménage égale à 4,3. Le tableau 18 suivant récapitule le gain environnemental enregistré par l'utilisation des briques de d'herbe de savane par tous les ménages urbains du pays.

Tableau 18 : Gain environnemental enregistré par les ménages urbains par utilisation des briques de d'herbe de savane.

Combustible		charbon de bois	Brique de d'herbe de savane
Consommation/an/ménage (kg/an)		600	724,01
Effectif ménage urbain national	6 115 623		

consommation/an/total ménage urbain à Madagascar (kg/an)		3 669 373 800,00	4 427 772 208,23
Forêt détruite par consommation charbon/ménage/an (ha)	0,086		
Forêt détruite par consommation charbon/tout ménage urbain à Madagascar/an (ha)		525 943,58	
Forêt préservée/ménage/an (ha)	0,1		
Forêt préservée par utilisation briquelette herbe de savane/total ménage urbain à Madagascar/an (ha)			611 562,30

Ce tableau 18 montre que si la totalité des ménages urbains utilisent la briquelette d'herbe de savane au lieu du charbon de bois, le pays enregistrera tous les ans 611 562,30 ha, ce qui dépasse largement la superficie de forêt détruite en 2017 selon Global Forest Watch.

5. CONCLUSION

Il faut dire que l'objectif initial fixé a été atteint. Les herbes de savane à forte teneur en matière sèche de l'ordre de 10 à 15 tMS/ha/an peuvent être valorisées sous forme de briquettes d'herbes de savane et peuvent être utilisées au niveau des ménages comme substitut au bois énergie. La technologie appropriée pour éliminer les briquettes d'herbe de savane est la densification avec l'incorporation d'un liant à base d'amidon de manioc. La plus populaire est la briquelette d'herbe de savane à 10% en liant, de forme cylindrique, avec un diamètre de 42 mm, une hauteur de 60 mm et une masse de 80 g. 60,5% des couches sociales du district d'Ihoso sont satisfaites de son utilisation pour leurs habitudes culinaires quotidiennes. La briquelette d'herbe de savane est adaptée pour remplacer le bois-énergie car elle présente les performances énergétiques suivantes : un PCI moyen de 5552,43 kcal/kg, une consommation de combustible inférieure de 0,35 kg/h (0,36 kg/h pour le charbon de bois), un temps d'ébullition de 2,5 l d'eau supérieur à 0,83 h (0,85 h pour le charbon de bois) et un rendement supérieur de 29,84 % à celui du charbon (23,74 %).

Le remplacement du charbon de bois par ces briquettes d'herbe de savane à 10 % en liant à un ménage urbain du district d'Ihoso peut préserver 0,1 ha/an de forêt d'eucalyptus, soit 908,8 ha/an pour les 9088 ménages urbains de la région d'Ihorombe. Les questions qui se posent :

- Premièrement, comment cette technologie peut-elle être diffusée au niveau des ménages dans toute la région à court et moyen terme, et dans tout le pays à long terme ?
- Deuxièmement, tous les ménages de l'île sont-ils d'accord pour utiliser cette briquelette ? Quelles stratégies peuvent être adoptées car plus le taux de pénétration de ce combustible est élevé, plus les bénéfices sont tangibles.

REFERENCES

- [1]. Andry Fenosoa R, (2004), contribution à la valorisation énergétique de la biomasse à Madagascar- application de la gazéification sur les résidus de noix de coco. DEA en Génie Minéral. ESPA Vontovorona
- [2] Briquettes à base de déchets végétaux, co-éditions entre le Centre de Développement Industriel et le Centre de Recherches Agronomiques de Gembloux
- [3]. Consults Banjara Hills. Les possibilités de l'utilisation du biogaz à Madagascar. 2008.
- [4].CREAM, Monographie Région Ihorombe, février 2013
- [5]. Euei, Ministère de l'Energie et des Hydrocarbures. Assistance pour le Développement d'une Nouvelle Politique de l'Energie à Madagascar – Phases 2 et 3. 2015.
- [6]. Ibanez E.F. 2002, thèse de Doctorat, « Etude de la carbonisation et l'activation de précurseurs végétaux durs et mous »
- [7]. Huchard Paul Berthin R, (2014), La pyrolyse des sous-produits agricoles et forestiers de faible granulométrie de Madagascar: influence des paramètres de pyrolyse sur les caractéristiques des produits combustibles. Thèse de doctorat en physique énergétique. Antananarivo.
- [8]. Hydrocarbures, Ministère de l'Energie et des Mines. Assistance Technique pour l'Elaboration de la Stratégie Nationale Bois-Energie. 2015.
- [9]. INSTAT. Enquête Nationale sur le Suivi des OMD à Madagascar - Préserver l'environnement. 2013
- [10].Kalyan N., Morey, R.V 2009; Biomass and Bioenergy : Factors affecting strength and durability of densified products

- [11] Lequeux P, Carre J, Hebert J ; 1991Energie et Biomasse : La densification
- [12].Madagascar résultats provisoires du RGPH-3de Madagascar, INSTAT-
- [13] MINISTERE D' ENERGIE ET MINES– Bilan énergétique .1999-2002
- [14]. Mondiale Banque. Données de Madagascar. [En ligne] <https://donnees.banquemondiale.org/pays/mada>
- [15] PATRICK D.E MFOUPAN. 2007, « Etude de faisabilité d'une unité de production de charbon vert »
- [16].Tchouate P et Jeanmart H, 2005 ; La densification de la biomasse, Formation et sensibilisation à la biomasse énergie.
- [17].Thomas M., van Zuilichem D.J and van der Poel, A.F.B 1997; Physical quality of pelleted animal feed, Contribution of processes and its conditions, Animal Feed Science and Technology.
- [18] Van der PLAS, R.J, 2003.Composante énergie domestique, Banque Mondiale Antananarivo Madagascar, document non publie
- [19]. WWF. Diagnostic du Secteur de l'Energie à Madagascar. 2012.