

Le Charbon De Bambou, Source D'énergie Alternative Convaincante Et Appropriée Au Contexte Malgache: Efficiences Energétique Et Ecologique Par Rapport Au Bois Energie Et Aux Briquettes A Base De Sciures De Bois De Modèles Cylindrique Et Extrudé

ISSA Aziz¹, RASOANAIVO Jean Luc², RAKOTOSON Rijalalaina³, RAVONINJATOVO Achille⁴, ANDRIANAIVO Lala⁵

¹Enseignant chercheur, Mention sciences de la matière et de la structure, Faculté des Sciences, de Technologie et de l'Environnement, Université de Mahajanga.

^{2,4}chercheurs Enseignants, Centre National de Recherches Industrielle et Technologique, Antananarivo.

^{3,5}Enseignants chercheurs, Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo.



Résumé– Madagascar est classé parmi les pays les plus touchés par la déforestation avec un taux de déforestation de plus de 1%, soit une perte d'environ 40 000 ha par an. Aujourd'hui, moins de 21% de la superficie de l'île serait encore recouverte de forêts (World Bank, 2021). Le bois énergie constitue la principale source d'énergie à Madagascar, répondant au principal besoin en énergie des ménages malgasy, celui de cuisson. 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...) et participent grandement à l'augmentation des émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) du pays. Au niveau national, la demande en bois énergie (18,3 millions de 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.

Afin de faire face à cette réalité malgache, ce travail de recherches a pour objet de trouver un combustible solide, potentiel, apte à concurrencer le bois énergie, apprécié par les couches sociales et efficient sur le plan énergétique et écologique. Cinq combustibles ont été étudiés : le charbon de bois, le charbon de bambou, le bois de chauffe et enfin les briquettes à base de sciures de bois et de modèles cylindrique et extrudé. Partant de l'élaboration d'un prototype de presse jusqu'à la fabrication de briquettes combustibles à base de sciure de bois de modèle cylindrique, la détermination des caractères physico-chimiques et de l'efficacité énergétique de ces dernières s'est avérée satisfaisante. De même pour le cas des briquettes de sciure de bois de modèle extrudé et du charbon de bambou. Ainsi, l'évaluation du pouvoir calorifique des combustibles, la consommation moyenne, la puissance et le rendement du foyer utilisé seront les facteurs déterminants de la comparaison. Dès lors, les résultats mentionnés dans ce travail de recherches peuvent être fournis comme données de base pour les actions futures sur la valorisation de la biomasse par le biais de la fabrication de briquettes combustibles.

Mots-clés : *combustibles, bois énergie, sciure de bois, bambou, valorisation, efficacité.*

Abstract– Madagascar is ranked among the countries most affected by deforestation with a deforestation rate of over 1%, or a loss of around 40,000 ha per year. Today, less than 21% of the island's area is still covered with forests (World Bank, 2021). Fuel wood is the main source of energy in Madagascar, meeting the main energy needs of Malagasy households, that of cooking. Excessive and inefficient consumption of fuel wood, coupled with insufficient production and low-yield carbonization, as well as the search for new agricultural

land and mining contribute to the degradation of forest ecosystems (erosion, drying up of forest reserves). Water, decrease in biodiversity, etc.) and greatly contribute to the increase in the country's greenhouse gas (GHG) emissions. At the national level, the demand for wood energy (18.3 million m³ per year) greatly exceeds the potential for sustainable production (9.169 million m³ per year). Thus, more than 60% of consumption is covered by overexploitation of forest resources.

In order to face this Malagasy reality, this research work aims to find a solid fuel, potential, able to compete with wood energy, appreciated by the social layers and efficient in energy and ecological terms. Five fuels were studied: charcoal and bamboo charcoal, firewood and finally briquettes made from sawdust and cylindrical and extruded models. From the development of a prototype press to the manufacture of fuel briquettes based on sawdust of cylindrical model, the determination of the physicochemical characteristics and the energy efficiency of the latter has been found to be satisfactory. The same is true for the case of extruded model sawdust briquettes and bamboo charcoal. Thus, the evaluation of the calorific value of the fuels, the average consumption, the power and the efficiency of the stove used will be the determining factors of the comparison. Therefore, the results mentioned in this research work can be provided as basic data for future actions on the valorization of biomass through the manufacture of fuel briquettes.

Key words: fuels, fuel wood, sawdust, bamboo, recovery, efficiency.

I. INTRODUCTION

Acteur omniprésent dans les diverses activités humaines, l'énergie s'avère être quasiment indispensable au quotidien de l'Homme. Elle peut faire recours à certains besoins tels que : le chauffage, que ce soit dans le domaine industriel ou dans les ménages ; l'électricité, que ce soit en éclairage ou en appareillage ; ou encore le transport.

Longtemps éclipsées par les combustibles fossiles dans l'approvisionnement en énergie, les énergies renouvelables réapparaissent sur le devant de la scène et possèdent actuellement une part de moins de 20% dans la consommation énergétique mondiale [1] et une part de 29% dans la production d'électricité [1]. Cette réapparition s'est faite remarquée depuis la recrudescence des préoccupations liées au réchauffement climatique et la montée récente des cours du pétrole. Au niveau mondial, les énergies renouvelables sont principalement utilisées dans la production de chaleur, leur part dans les secteurs du transport et la production d'électricité étant faible. En Afrique, l'utilisation de la biomasse traditionnelle est prédominante, où elle est brûlée directement, soit à des fins de cuisson et d'éclairage dans le secteur résidentiel ou, dans une moindre mesure, dans le secteur industriel.

Face à la problématique mondiale du changement climatique, les énergies renouvelables ont un rôle majeur à jouer dans la transition énergétique et dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Madagascar, particulièrement concerné par cette problématique, est positionnée en troisième position des pays les plus exposés aux effets du changement climatique. De plus, l'offre énergétique à Madagascar est dominée à 92% par le bois-énergie [2], favorisant ainsi une diminution rapide de la couverture forestière de la Grande Ile. Une telle consommation est due essentiellement aux besoins des ménages (cuisson...), des commerçants (restaurateurs...) et des artisans (forgerons...).

Ainsi, au-delà d'une urgence environnementale et sociétale indéniable, nombreux sont les solutions qui ont été offertes dans le but d'offrir une alternative à la principale source d'énergie utilisée à Madagascar : le bois énergie. Le recours peu à peu vers l'utilisation du GPL (Gaz de Pétrole Liquéfié), la proposition de nouvelles filières exploitables telles que le biocarburant (bioéthanol) ou le biogaz, est signe de reconnaissances de l'état environnemental actuel. Une autre alternative au bois énergie est l'utilisation de combustibles à biomasse. Non seulement, elle fait recours à la réduction de la déforestation, mais aussi, elle prend part dans la valorisation des déchets organiques produits majoritairement par les activités agricoles (balle et paille de riz...), forestières (sciure et copeaux de bois...), industrielles (papiers et cartons...), ou humaines (déchets ménagers organiques).

Penché vers la valorisation de la sciure de bois, un déchet abondant à Madagascar et spécialement dans la région Alaotra Mangoro, ou encore vers une autre perspective comme le bambou, qui a connu depuis peu de temps un développement important à travers le monde grâce à ses qualités remarquables et à ses usages multiples. Le bambou est un végétal que l'on peut rencontrer partout sur la planète (Amériques, Asie, Afrique et Océanie) à l'exception de l'Europe (bien que certaines espèces puissent y pousser) et de l'Antarctique, et peut s'adapter à de nombreux climats tropicaux, subtropicaux, et tempérés. Madagascar est particulièrement riche en espèces de bambou comparé aux autres pays africains. Il possède 32 espèces endémiques réparties dans 10 genres. A lui seul, Madagascar compte beaucoup plus d'espèces que le continent africain réuni. A Madagascar, ils sont distribués essentiellement le long des massifs centraux de l'île et dans la forêt humide de l'Est.

Cette plante est considérée comme les meilleures ressources végétales et une plante d'une grande importance économique, avec une forte demande et de production, entraînant l'augmentation des superficies reboisées. C'est un emblème du développement durable dans le pays qui est l'une des sources d'énergie renouvelable, avec le charbon de bambou. Elle absorbe beaucoup de dioxyde de carbone dont une partie est stockée dans ses rhizomes etc...

Conscient des multiples avantages apportés par cette plante que ce soit sur le plan énergétique, environnemental voire économique qu'a été née l'idée d'entreprendre ce travail de recherches axé sur les sources d'énergies alternatives au bois énergie telles que le charbon de bambou et les briquettes combustibles à base de sciures de bois et de modèles cylindrique et extrudé.

Le but étant ainsi d'obtenir, à titre comparatif, des résultats appréciables à partir de ces combustibles pour faire face, de manière alternative, à l'utilisation excessive du bois énergie à Madagascar.

II. SITUATION ET PROBLEMATIQUE ENERGETIQUE A MADAGASCAR

II.1. Situation énergétique à Madagascar

Selon une étude menée par l'INSTAT de Madagascar en 2013 et le WWF en 2012, l'offre énergétique à Madagascar est dominée par le bois-énergie (92%) 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%). A Madagascar, seul 15% de la population (et 5% en milieu rural) a accès à l'électricité qui est majoritairement produite par des énergies fossiles et hydrauliques.

Tableau 1 : Mix énergétique à Madagascar

	Accès à l'électricité	Energies fossiles (pétrole, gaz, charbon) (+ autre)	Hydraulique	EnR (hors hydraulique)
Monde	78%	68% (+ 12% nucléaire)	16%	4%
Afrique Subsaharienne	29%	39%	60%	1%
Madagascar	15%	45%	54%	1%
Milieu Rural	5%	75% (pétrole) (+ 3,5% biomasse thermique)	18%	3,5%

Source : *Rappt_Capit_Biogaz&FA_Mada* [1]

D'après un bilan énergétique plus récent, celui du MEEH de Madagascar en décembre 2016, quatre types d'énergies primaires sont exploitées à Madagascar : le charbon minéral, le bois-énergie, la bagasse et la balle de riz.

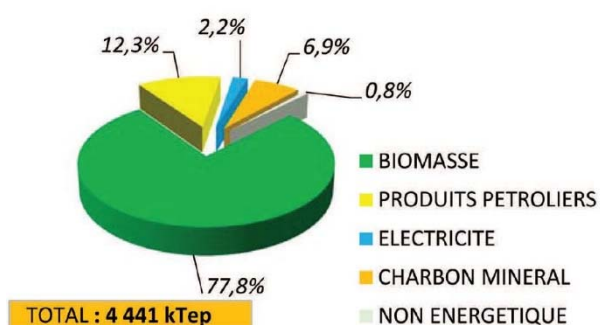


Figure 1 : Les sources d'énergies à Madagascar, 2015

Source : *MEEH/ORE*

En termes de consommation énergétique, la biomasse demeure la première source d'énergie utilisée par les Malagasy (78,6%) qui y recourent surtout à des fins de cuisson. Elle est suivie par les produits pétroliers (12%) utilisés pour l'éclairage, le transport et la production électrique, le charbon minéral (4,9%) surtout utilisé par les grandes industries, l'électricité (2%) dont le caractère de « produit de luxe » ressort clairement ici, et les produits à usage non-énergétique comme les solvants et le bitume (0,5%).

Par ailleurs, selon un rapport de Banjara Hills Consults et la NPE, les consommations moyennes en bois et charbon en milieu rural et urbain sont réparties comme présenté dans le tableau ci-contre. 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%).

Les rendements des foyers traditionnels ouverts sont d'environ 18%.

Tableau 2 : Consommation moyenne de bois et de charbon

	Milieu urbain	Milieu rural
Charbon de bois		
kg/personne/an	125	110
kg/personne/jour	0,350	0,300
Bois de feu		
kg/personne/an	270	513
kg/personne/jour	0,750	1,400

Source : Rappt_Capit_Biogaz&FA_Mada [3]

II.2. Problématique énergétique à Madagascar

La situation énergétique à Madagascar reste donc préoccupante. En dehors du transport, la principale consommation énergétique du pays est la cuisson des ménages pour près de 94%. Ainsi, l'utilisation massive du bois énergie en foyer ouvert est une problématique prioritaire et du gouvernement malagasy qui a souligné son intention de s'investir dans ce secteur au travers de sa Nouvelle Politique Énergétique.

Tableau 3 : Répartition de la consommation énergétique à Madagascar

	Energie utile consommée (TWh/an)	Part de l'énergie totale hors transport (%)
Electricité et éclairage	2,20	5%
Industries et commerces	0,42	1%
Cuisson	37,40	94%
Total	40,02	100%

Source : NPE [3]

En énergies renouvelables, Madagascar dispose de considérables ressources énergétiques réparties sur l'ensemble de son territoire, notamment dans l'hydroélectricité, le solaire et l'éolien, qui sont encore largement inexploitées. Le potentiel hydroélectrique a été estimé à environ 7 800 MW. Aujourd'hui, seulement 2% de ce potentiel est exploité. En énergie solaire, presque toutes les régions de Madagascar reçoivent plus de 2 800 heures de soleil par an, un des taux les plus élevés au monde, soit une énergie solaire incidente moyenne de l'ordre de 2 000 kWh/m²/an, sur un territoire où les contraintes spatiales sont moindres. En ressource éolienne, Madagascar figure parmi les 15 pays africains présentant de grands gisements éoliens, en particulier dans le

Nord et le Sud du pays. Dans la partie Nord, autour d'Antsiranana, les vents forts appelés *Varatraza* soufflent plus de la moitié de l'année, enregistrant une moyenne de 6 à 8 m/s à 50 m de hauteur, tandis qu'au Sud, autour de Taolagnaro, souffle le *Tsioka atsimo*, à une vitesse moyenne de 8 à 9 m/s. Au centre du pays, des vents constants ont été enregistrés à une vitesse de 6 à 6,5 m/s. La capacité potentielle est d'environ 2 000 MW pour la production d'électricité. Du point de vue potentiel géothermie et marémotrice, Madagascar possède un potentiel géothermique estimé à plus de 350 MW et présente un certain nombre de zones géothermiques intéressantes de basse à moyenne enthalpie. Des températures souterraines pouvant atteindre 250°C ont été relevées sur 8 zones du pays. Quant à l'énergie marémotrice, qui présente aussi l'avantage de fournir de l'eau potable, elle pourrait être produite dans les zones comme Ambovombe, dans le Sud, où le courant marin est très fort et où le littoral d'étend sur plus de 4,5 km. Pour la potentialité en biomasse, elle varie, selon les sites et les matières premières, de quelques kW à plus de 150 MW [18].

III. METHODOLOGIES

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 par le passage à travers l'ordre chronologique des différentes activités suivantes :

Phase 1 : Etudes bibliographique et webographique ;

Phase 2 : Etude, conception et réalisation d'un prototype de presse à briquettes ;

Phase 3 : Essais d'ajustage et de mise au point du prototype de presse fabriquée ;

Phase 4 : Collecte de matières premières (sciure de bois et charbon de bois) en vue des essais de production de briquettes à base de sciure de bois de modèle cylindrique ;

Phase 5 : Prise d'échantillons de briquettes à base de sciure de bois de modèle extrudé, et de charbon de bambou ;

Phase 6 : Travaux de laboratoire proprement dits, en vue de :

- produire des sciures de bois carbonisées par pyrolyse et par carbonisation partielle ;
- produire des échantillons de briquettes à base de sciure de bois de modèle cylindrique à partir de la presse de compactage fabriquée ;
- effectuer des essais de séchage sur les échantillons de briquettes à base de sciure de bois de modèle cylindrique confectionnées ;
- déterminer les caractères physico-chimiques des briquettes à base de sciure de bois de modèles cylindrique et extrudé, et du charbon de bambou ;
- réaliser différents tests permettant de caractériser l'efficacité et l'efficacité énergétique des briquettes à base de sciure de bois de modèles cylindrique et extrudé, par rapport au charbon de bambou et au bois énergie (charbon de bois et bois de chauffe), dont :
 - le drop test ;
 - le Test d'Ebullition d'Eau (TEE) ;
 - le Test de Cuisine Contrôlée (TCC) ;

Phase 7 : Rédaction du présent document.

III.1. : Etudes bibliographique et webographique

III.1.1. Le bambou : Particularités et caractéristiques du bambou [21]

Le bambou fait partie des plantes à fleurs et plus particulièrement des monocotylédones. Il appartient à la sous-famille des bambusoïdées (*Bambusiadeae*). C'est une graminée, au même titre que le blé, le riz, les palmiers ou le roseau, d'où son appellation d'« herbe géante ». Il est classifié parmi les produits forestiers non ligneux, bien que sur le plan technologique il possède des caractéristiques très proches de celles du bois.

a. Classification du bambou en fonction de la taille et du calibre [21]

La longueur et le calibre des tiges varient fortement d'une espèce à l'autre. Il existe quatre catégories de bambou :

- les bambous géants (9 à 40 m de haut) ;
- les bambous moyens (3 à 9 m) ;
- les petits bambous (1,5 à 3 m) ;
- les bambous nains (< 1,5 m).



Photo 1 : Touffe de bambou géant

a. Croissance

Une des caractéristiques majeures du bambou est la vitesse de croissance de ses tiges. Selon les espèces, celles-ci gagnent en moyenne entre 10 et 50 cm de hauteur par jour pendant la période de forte croissance, qui dure environ deux mois sur la totalité du cycle, et atteignent leur taille définitive au bout de 2 à 4 mois. Au plus fort de leur croissance, certains bambous s'allongent de près d'un mètre en une journée. Cette croissance se fait par élongation successive des entre-nœuds, dont la longueur varie selon les espèces. En revanche, le bambou ne se développe pas en largeur car, comme les autres monocotylédones, il ne possède pas de réserve pour croître en épaisseur.

Une fois qu'il a atteint sa hauteur maximale, le bambou cesse de pousser, bien qu'il ne soit pas encore pleinement mature, et reste en constante évolution : les cellules de la paroi se modifient, ses fibres s'épaississent. Au bout de 3 à 5 ans, il atteint ses propriétés mécaniques optimales.

b. Transformation du bambou en charbon [23]

Le charbon de bambou est le produit du processus de pyrolyse ou décomposition thermique de la biomasse de bambou, qui est effectué à haute température sans air ou approvisionnement limité d'air (oxygène). Il est semblable au charbon de bois et à d'autres matériaux lignocellulosiques qui possèdent d'excellent pouvoir calorifique, aussi bien riches en carbone que faciles à brûler. Il a aussi une excellente structure poreuse, une surface spécifique plus grande et une capacité d'adsorption beaucoup plus élevées que celles du charbon de bois.

Toutes espèces ou variétés de bambou conviennent à la production de charbon. À des finalités purement énergétiques, les poteaux entiers, les rhizomes, les branches coupées, les tronçons, les morceaux coupés et les déchets épais provenant de la transformation du bambou peuvent être utilisés pour la production de charbon de bambou. À l'exception des déchets en particules ou en poudre qui peuvent être valorisés sous forme de briquettes combustibles.

Mais pour produire un charbon de bonne qualité, il est à noter que :

- il est préférable d'utiliser des bambous matures (3 à 5 ans) car les niveaux d'amidon et le taux d'humidité sont plus bas ;
- la teneur en eau devrait être aussi basse que 20-25% : pendant les pluies, le bambou doit être récolté et laissé sécher à l'air pendant quelques jours ;
- les différentes formes de matières premières ne doivent pas être mélangées pour un empilage facile à l'intérieur du four et une bonne carbonisation.



Photo 2 : Charbon de bambou issu d'un four à charbon de bois à dôme

III.1.2. Les briquettes combustibles

La majorité de la population malagasy, tel est le cas même des africains, dépendent généralement du bois pour la cuisson des ménages en raison de son prix abordable, de son accessibilité et de sa polyvalence pour répondre à leurs besoins. Toutefois, s'il constitue un moyen peu coûteux pour cuisiner, chauffer les habitats et alimenter les activités industrielles, une part importante du bois est obtenue de manière non durable, contribuant ainsi à la déforestation et la dégradation des sols. De plus, le bois est souvent brûlé dans des appareils inefficaces, dégageant des émanations nocives pour la santé et pour l'environnement.

Les briquettes combustibles pourraient contribuer à lutter contre ces problèmes.

III.1.2. 1. Production de briquettes combustibles

Alors que les populations dépendantes du bois augmentent dans la région et que l'accès au bois diminue, les briquettes de biomasse offrent une solution pratique pour compléter l'utilisation du bois comme combustible. Ces briquettes sont produites en compactant en un seul bloc solide des résidus de biomasse (tels que de la poussière de charbon de bois, de la sciure, des restes de bois ou des résidus agricoles) avant d'être utilisé comme du charbon de bois ou du bois de chauffage. Si les matériaux de base ne tiennent pas ensemble, une substance liante est ajoutée, comme de la terre, de l'argile ou de l'amidon. Pour un usage domestique, les briquettes fabriquées à partir de biomasse carbonisée sont à privilégier, car les briquettes non carbonisées sont surtout utilisées à des fins industrielles.

III.1.2. 2. Caractéristiques des briquettes combustibles

Les briquettes sont compactées et extrudées fermement à différentes formes requises avec une densité haute d'environ 700 à 1100 kg/cm³ causée par la différence de caractéristiques des matériaux. Elles peuvent être appliquées au niveau des ménages ou dans les industries comme source de chauffage ou de production d'électricité. Avec leur facilité de stockage et de transport, les briquettes peuvent être produites par l'adaptation de procédure de traitement familial.



Photo 3: Briquettes écologiques de modèle cylindrique à partir de résidus de scierie



Photo 4: Briquettes combustibles de modèle extrudé

III.1.3. : Etude, conception et réalisation d'un prototype de presse de compactage pour la production de briquettes de modèle cylindrique

Pour la production de briquettes à base de sciure de bois de modèle cylindrique, un prototype de presse à briquettes manuelle (cf. photo 43) a été utilisé. Le modèle du prototype conçu s'inspire de celui d'une presse à briques manuelle et de certains types de presse à brique de charbon.



Photo5: Prototype de presse à briquettes manuelle, à 4 moules

III.1.3.1. Elaboration du prototype de presse

L'élaboration d'un plan (à 2 dimensions) s'avère indispensable pour faciliter la conception et la réalisation du prototype de presse.

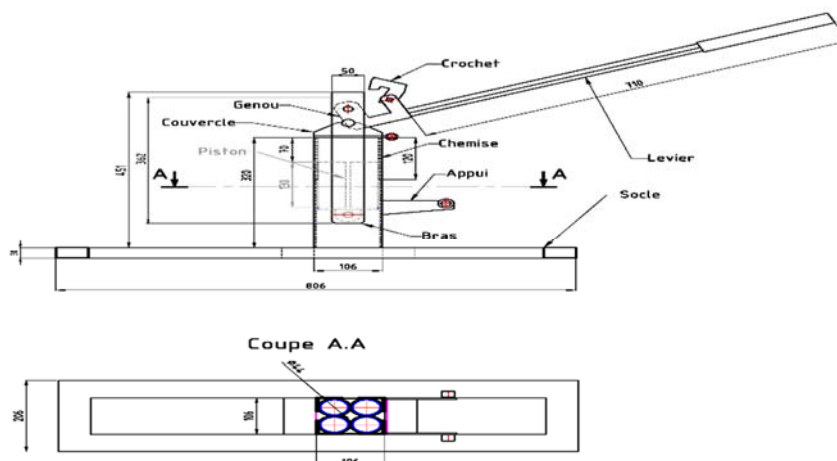


Figure 2 : Plan à 2 dimensions du prototype de presse

III.1.3.2. Caractéristiques du prototype de presse

Le prototype comporte de nombreuses pièces, mais les plus importantes sont celles qui définissent les dimensions des briquettes obtenues et la pression exercée par la presse.

Tableau 4 : Caractéristiques des pièces essentielles du prototype de presse

Pièces	Nombre	Forme	Diamètre extérieur	Diamètre intérieur	Hauteur	Longueur
Moules (chemises)	4	cylindrique	50 mm	44 mm	120 mm	
Pistons	4	cylindrique	40 mm		130 mm	
Levier						710 mm
Bras						362 mm

Le matériau utilisé étant généralement de l'acier ordinaire, sauf pour quelques pièces comme le couvercle et les tiges rotatives qui sont composées d'acier galvanisé. Par contre, le levier a été conçu à la fois avec de l'acier ordinaire et de l'acier galvanisé pour obtenir une dureté supérieure et ainsi éviter toute forme de déformation durant la pression.

III.1.3.3. Principe de fonctionnement

Un levier transmet son mouvement de rotation au bras (ou bras du levier) de la presse via un système d'articulation (genou). Le bras est fixé aux pistons qui exercent une pression élévatrice dans des moules (chemises) qui sont fermées à l'ouverture par l'intermédiaire d'un couvercle fermé et soutenu par le genou. Une fois la pression transmise, et après ouverture du couvercle, les pistons sont remontés à travers un autre mouvement du bras (vers le bas) sur un point d'appui ; mais cette fois ci, le bras et le levier sont fixés par l'intermédiaire d'un crochet.

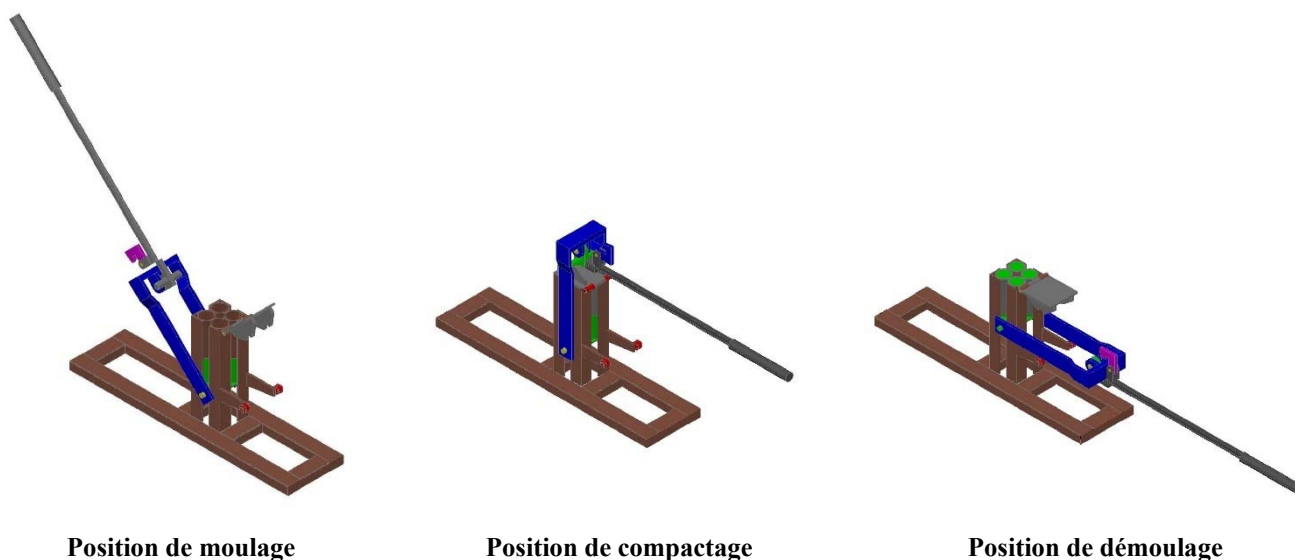


Figure 3 : Principe de fonctionnement du prototype de presse, schématisé à 3 dimensions

III.1.4. Travaux de laboratoire

III.1.4.1. Production de briquettes à base de sciure de bois de modèle cylindrique

a. Essais de séchage des échantillons de briquettes à base de sciure de bois de modèle cylindrique

Après compactage, chaque échantillon de brique se doit d'être séché afin d'obtenir un matériau sec et résistant, soit un combustible proprement dit. Dans le cas des briquettes de sciure de bois cylindriques, le séchage des échantillons s'est fait à deux temps : d'abord à l'ombre puis au soleil, d'une durée d'environ une semaine chacun. Ce temps de séchage à l'ombre est nécessaire pour éviter toute présence de fissures externes sur l'échantillon de brique en raison de la diminution brusque de l'humidité dans cette dernière si elle est tout de suite exposée au soleil.



Photo 6 : Modes de séchage des briquettes de sciure de bois cylindriques

Séchage à l'ombre (à gauche) et séchage au soleil (à droite)

Source : auteur

III.1.4.2. Détermination des caractères physico-chimiques des briquettes à base de sciure de bois de modèle cylindrique confectionnées et de modèle extrudé, et du charbon de bambou

L'analyse des caractères physico-chimiques d'un combustible permettra de disposer la spécificité technique voire énergétique de celui-ci par rapport aux combustibles usuels. Parmi ces spécificités, il y a :

- le taux d'humidité ;
- la teneur en matières volatiles ;
- la teneur en cendres ;
- la teneur en carbone fixe ;
- le Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI).

a. Calcul du taux d'humidité

Selon la norme européenne EN14774, le taux d'humidité est obtenu par la formule suivante :

$$H = \frac{M_{\text{humide}} - M_{\text{sèche}}}{M_{\text{humide}}} \times 100 \quad (1)$$

Avec M_{humide} : Masse initiale de l'échantillon [g]

$M_{\text{sèche}}$: Masse de l'échantillon après étuvage à 105°C [g]

H : Taux d'humidité [%]

b. Teneur en matières volatiles (MV)

Les matières volatiles sont composées de gaz combustibles, de vapeurs condensables, de vapeurs et de quelques produits calcinés et déshydratés. Les gaz combustibles sont constitués d'hydrogène, de monoxyde de carbone et de méthane ; les vapeurs condensables sont des goudrons avec des petites quantités de gaz combustibles ; et les vapeurs sont du gaz carbonique et de l'eau formée par la dégradation thermique des substances charbonneuses. La teneur en matières volatiles cautionne l'inflammabilité de la matière combustible.

Calcul de la teneur en matières volatiles

Sa détermination suit la norme française NF1985, et a été obtenue par la formule suivante :

$$MV = \frac{M_{105} - M_{550}}{M_{\text{sèche}}} \times 100 \quad (2)$$

Avec $M_{105} = M_{\text{sèche}}$: Masse obtenue après étuvage à 105°C [g]

M_{550} : Masse obtenue après chauffage à 550°C [g]

MV : Teneur en matières volatiles [%]

c. Teneur en cendres (C)

Les cendres sont constituées de diverses matières minérales telles que le SiO_2 , le Al_2O_3 , le Fe_2O_3 et le CaO . La teneur en cendres représente la qualité de matières minérales contenue dans le combustible. Il est important pour l'appréciabilité du combustible du fait que, quand il est très élevé, ces cendres deviennent des obstacles à la combustion.

Calcul de la teneur en cendres

Sa détermination suit la norme européenne EN14775, et est obtenue par la formule suivante :

$$C = \frac{M_{850}}{M_{sèche}} \times 100 \quad (3)$$

Avec M_{850} : Masse obtenue après chauffage à 850°C [g]

$M_{sèche} = M_{105}$: Masse obtenue après étuvage à 105°C [g]

C : Teneur en cendres [%]

d. Teneur en carbone fixe (CF)

Le carbone fixe a un grand potentiel énergétique. C'est la quantité du carbone restante après élimination des matières volatiles, des cendres et de l'humidité. Il est différent du carbone total qui est la somme du carbone fixe et le carbone contenu dans la partie volatilisée.

Calcul de la teneur en carbone fixe

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

$$CF = 100 - (H + MV + C) \quad (4)$$

Avec H : Taux d'humidité [%]

e. Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI)

Le Pouvoir Calorifique Inférieur ou PCI indique la quantité de chaleur effectivement utile dans la pratique. Autrement dit, c'est la quantité de chaleur dégagée par kilogramme d'un combustible solide lorsque les produits de la combustion sont refroidis à la température initiale et que la vapeur d'eau n'est pas condensée.

Calcul du Pouvoir Calorifique Inférieur

Il existe deux méthodes de détermination du PCI :

- la méthode expérimentale par bombe calorimétrique ;
- la méthode par composition chimique.

Dans le cas ici présent, la seconde méthode ou la méthode à partir de l'utilisation des formules empiriques a été prise en compte, c'est-à-dire l'utilisation de la formule de CASSAN :

$$PCI = 80 \times (100 - C) \quad (5)$$

Avec C : Teneur en cendres [%]

PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur [Kcal/kg]

III.1.4.3. Tests d'efficacité et d'efficacité énergétique des briquettes à base de sciure de bois de modèles cylindrique et extrudé par rapport au charbon de bambou et au bois énergie

Afin d'apprécier l'efficacité/efficacité énergétique des deux modèles de briquettes à base de sciure de bois (cylindrique et extrudé), plusieurs tests ont été réalisés pour pouvoir évaluer leur performance vis-à-vis du charbon de bambou et des combustibles usuels tels que le charbon de bois et le bois de chauffe. Respectivement, ces tests sont :

- le drop test ;
- le Test d'Ebullition d'Eau (TEE) et le Test de Cuisine Contrôlée (TCC) moyennant un foyer amélioré bien défini. Le foyer amélioré utilisé dans ce cadre est le Foyer « Mitsitsy » du CNRIT.

De plus, l'efficacité/efficience énergétique de chacune des deux modèles de briquettes à base de sciure bois exige respectivement :

- la détermination de la consommation en combustible (en kg/h) des deux modèles de briquettes à base de sciure de bois en utilisant le même foyer amélioré et dans les mêmes conditions (même lieu de combustion, même équipement de cuisson utilisé...)
- l'évaluation de la puissance, du rendement du foyer amélioré employé en utilisant respectivement et dans les mêmes conditions les briquettes à base de sciure de bois de modèles cylindrique et extrudé ;
- l'évaluation de la quantité d'énergie émise lors de la combustion des deux modèles de briquettes à base de sciure de bois par l'utilisation du même foyer et dans les mêmes conditions qu'auparavant.

III.1.4.4. Détermination de la consommation en combustible ; évaluations de la puissance et de l'efficience énergétique du foyer pour chaque type de combustibles

a. *Détermination de la consommation en combustible (en kg/h)*

La consommation moyenne en combustible sera déterminée à partir des valeurs moyennes issues des tests d'ébullition d'eau effectués à haute puissance.

La formule utilisée pour calculer la consommation moyenne en combustible sera la suivante :

$$\text{Consommation moyenne en combustible} = \frac{\text{Combustible consommé}}{\text{Durée de la combustion}} \quad (6)$$

Où

$$\text{Combustible consommé} = \text{Combustible initial} - \text{Imbrûlé} \quad (7)$$

$$\text{Durée de la combustion} = \text{Durée d'ébullition de l'eau} + \frac{1}{4} \text{ heure} \quad (8)$$

La consommation moyenne en combustible [kg/h] est donc égale à la valeur du rapport entre la moyenne de la quantité du combustible consommé [kg] avec celle de la durée d'ébullition d'eau plus ¼ heure [h].

a. *Evaluation de la puissance*

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

$$P(t) = \frac{dE(t)}{dt} \quad (9)$$

Pour notre cas, il s'agit de déterminer une valeur de puissance calorifique constante, qui peut donc s'écrire :

$$P = \frac{Q}{t} \quad (10)$$

Où Q : Energie utile, c'est-à-dire l'énergie transmise par le foyer à la marmite

t : Temps ou durée totale du test

P : Puissance calorifique constante

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.

$$Q = C_{\text{eau}} \times M_{\text{eau initiale}} \times (T_{\text{ébullition}} - T_{\text{initiale}}) + L_{\text{eau}} \times (M_{\text{eau initiale}} - M_{\text{eau restante}}) \quad (11)$$

Et par suite :

$$P = \frac{C_{\text{eau}} \times (T_{\text{ébullition}} - T_{\text{initiale}}) + L_{\text{eau}} \times (M_{\text{eau initiale}} - M_{\text{eau restante}})}{t} \quad (12)$$

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 [kg]

$M_{\text{eau restante}}$: Masse d'eau restante après le test [kg]

$T_{\text{ébullition}}$: Température d'ébullition [°C]

T_{finale} : Température finale [°C]

Q : Energie transmise par le foyer à la marmite [J]

t : Temps total du test [s]

P : Puissance du foyer [W]

b. Evaluation de l'efficacité énergétique

L'évaluation de l'efficacité 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 :

$$\eta = \frac{Q}{PC_{\text{combustible}} \times P_{\text{combustible}}} \quad (13)$$

Ou bien :

$$\eta = \frac{C_{\text{eau}} \times M_{\text{eau initiale}} \times (T_{\text{ébullition}} - T_{\text{initiale}}) + L_{\text{eau}} \times (M_{\text{eau initiale}} - M_{\text{eau restante}})}{PC_{\text{combustible}} \times P_{\text{combustible}}} \quad (14)$$

Avec $PC_{\text{combustible}}$: Pouvoir calorifique du combustible (Charbon de bois), soit : PC CHB [Kcal/kg]

$P_{\text{combustible}}$: Poids du combustible consommé (Charbon de bois), soit : P CHB [kg]

η : Rendement du foyer [%]

IV. MATERIELS ET MATIERES

IV.1.Matières

Les matières premières ayant servi à la réalisation des essais d'expérimentation sont récapitulées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 5 : Les matières premières pour les essais d'expérimentation

Matières	Définitions et utilisations	Illustrations
Sciure de bois	Elle désigne l'ensemble des petites particules et fins copeaux issus du sciage de bois. Dans notre étude, elle est utilisée comme matière première à carboniser et à compacter pour produire des briquettes combustibles.	 Photo 7: Sciure de bois
Charbon de bois	Le charbon de bois et le produit de la carbonisation du bois en l'absence d'oxygène. Ici, il est utilisé comme combustible dans la carbonisation partielle ou autres tests de laboratoire.	 Photo 8 : Charbon de bois

IV.2. Matériels utilisés durant les de travaux de laboratoire

IV.2.1. Matériels de carbonisation

a. Matériels de carbonisation à partir du pyrolyseur de laboratoire

Tableau 6 : Matériels de carbonisation à partir du pyrolyseur de laboratoire

Matériels	Utilisations	Illustrations
Pyrolyseur	Carbonisation et extraction de la teneur en eau contenue dans la sciure de bois. Les sciures de bois se carbonisent au-delà de 250 jusqu'à 350°C en dégageant de la chaleur. Si les sciures sont totalement carbonisées ils ne fournissent plus de la chaleur.	 Photo 9 : Pyrolyseur électrique

Collecte des jus pyroligneux sur les différents tests effectués avec le pyrolyseur.

Flacons en verre



Photo 10 : Flacons en verre

b. Matériels de carbonisation par combustion partielle

Tableau 7 : Matériels de carbonisation par combustion partielle

Matériels	Utilisations	Illustrations
Seau métallique	Utilisé comme four métallique pour la carbonisation à combustion partielle de la sciure de bois. L'emploi de couvercle adapté est nécessaire pour éviter une combustion totale de la matière première.	
Pelle métallique	Employée dans le mélange de la matière première durant toute la combustion.	

Photo 11 : Seau métallique avec couvercle adapté

Photo 12 : Pelle métallique

c. *Matériels de production de briquettes*

Tableau 8 : Matériels de production de briquettes

Matériels	Utilisations	Illustrations
Presse à briquettes	Compactage du mélange malaxé afin de donner aux briquettes une forme cylindrique.	
Photo 13 : Presse à briquettes manuelle		
d. Matériels de laboratoire pour les analyses physico-chimiques		
Tableau 9 : Matériels de laboratoire pour les analyses physico chimiques		
Matériels	Rôles	Illustrations
Mortier et pilon	Broyage manuel de l'échantillon de brique à analyser.	
Photo 14 : Mortier en bois et pilon en granite		
Creusets en porcelaine	Employés comme récipients permettant à la capsule une répartition de l'échantillon de l'ordre de 0,33g/cm ² .	
Photo 15 : Creusets en porcelaine bas de 3 cm de diamètre		
Etuve	Maintien d'une zone uniforme de 105 à 110°C afin d'obtenir le taux d'humidité de l'échantillon.	

Traitement thermique de l'échantillon séché, à haute température, afin de déterminer la teneur en matières volatiles et la teneur en cendres de celle-ci.

Four à moufle électrique

Photo 16 : Etuve de laboratoire



Photo 17 : Four à moufle électrique équipé d'un contrôleur de température programmable

Refroidissement de l'échantillon sorti de l'étuve tout en le protégeant contre l'humidité.

Dessiccateur en verre



Photo 18 : Dessiccateur en verre avec déshydratant de gel de silice

V. RESULTATS

V.1. Résultats de la carbonisation de la sciure de bois à partir du pyrolyseur de laboratoire

D'un réglage de température allant de 100 à 250°C avec un intervalle de 50°C réglée toutes les 30mn, une masse de sciure de bois de 500 g se carbonise à l'aide d'un pyrolyseur en donnant une masse totale de jus pyroligneux de 107 g et une masse de sciure carbonisée de 159 g. De la même manière mais à des intervalles de 40 et 45mn, il y a augmentation de la masse de jus pyroligneux au fur et à mesure que le temps de la carbonisation soit prolongé. Par contre, il y a diminution de la masse de sciure de bois carbonisée dans les essais à intervalles de 40 et 45mn par rapport au premier essai de 30mn.

Tableau 10 : Rendement et produits de la carbonisation de la sciure de bois à partir du pyrolyseur de laboratoire

Désignation		Essai n°1 : 30 mn	Essai n°2 : 40mn	Essai n°3 : 45mn
Masse de jus pyroligneux après 100°C	(g)	12	20	15
Masse de jus pyroligneux après 150°C	(g)	24	32	32
Masse de jus pyroligneux après 200°C	(g)	29	36	48
Masse de jus pyroligneux après 250°C	(g)	42	25	24
Masse totale de jus pyroligneux	(g)	107	113	119
Masse initiale de sciure de bois	(g)	500	500	500

Masse de sciure de bois carbonisée	(g)	159	134	146
Masse de vapeur	(g)	234	253	235
Rendement (sciure carbonisée)	(%)	31,8	26,8	29,2

Ainsi, voici la répartition en pourcentage des masses des produits de la carbonisation de la sciure de bois (jus pyroligneux, sciure carbonisée et autres produits par évaporation) à partir du pyrolyseur de laboratoire par rapport à la masse initiale de sciure de bois (500g).

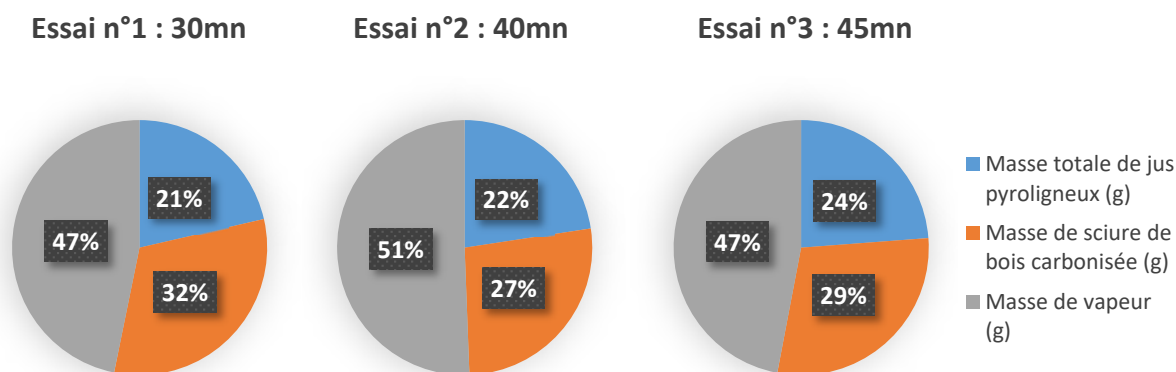


Figure 4 : Répartition (en %) des masses des produits de la carbonisation de la sciure de bois à partir du pyrolyseur

V.2. Résultats de la carbonisation de la sciure de bois par combustion partielle

La carbonisation de 2 kg de sciure de bois nécessite environ 400g de consommation de combustible (charbon de bois) pour ainsi obtenir environ 460g de sciure de bois carbonisée.

Tableau 11 : Rendement de la carbonisation de la sciure de bois par combustion partielle

Désignation		Essai n°1	Essai n°2	Valeur moyenne
Masse initiale de combustible	(g)	500	500	500
Masse de combustible imbrulé	(g)	102	90	96
Masse de combustible consommé	(g)	398	410	404
Masse initiale de sciure de bois	(g)	2 000	2 000	2 000
Masse de sciure de bois carbonisée	(g)	440	477	458,5
Rendement	(%)	22,0	23,9	22,9

V.3. Caractères physico-chimiques des briquettes à base de sciure de bois de modèle cylindrique

Tableau 12 : Caractères physico-chimiques des briquettes de sciure de bois cylindriques

Désignation			Essai n°1	Essai n°2	Essai n°3	Valeur moyenne
M _{humide}	Masse humide	(g)	15,011	15,010	15,009	15,010
M ₁₀₅	Masse sèche à 105°C	(g)	14,048	14,198	14,238	14,161
H	Taux d'humidité	(%)	6,416	5,407	5,140	5,654

M ₅₅₀	Masse à 550°C	(g)	10,395	10,956	10,647	10,666
MV	Teneur en matières volatiles	(%)	26,001	22,832	25,221	24,685
M ₈₅₀	Masse à 850°C	(g)	4,503	4,718	4,608	4,610
C	Teneur en cendres	(%)	32,056	33,231	32,366	32,551
CF	Teneur en carbone fixe	(%)	35,527	38,530	37,273	37,110
PCI	Pouvoir Calorifique Inférieur	(Kcal/kg)	5 435,501	5 341,522	5 410,742	5 395,922
		(J/kg)				22 554 952,422

Suite aux résultats des tests de laboratoire, les briquettes de sciure de bois de modèle cylindrique conçues ont pour caractères physico-chimiques, en moyenne :

- un taux d'humidité de 5,654% ;
- une teneur en matières volatiles de 24,685% ;
- une teneur en cendres de 32,551% ;
- une teneur en carbone fixe de 37,110% ;
- un Pouvoir Calorifique Inférieur d'une valeur de 5 395,922 Kcal/kg, soit 22 554 952,422 J/kg.

V.4. Efficience et efficacité énergétique des briquettes à base de sciure de bois de modèles cylindrique et extrudé par rapport au charbon de bambou et au bois énergie

V.4.1. Test d'Ebullition d'Eau (TEE)

Tableau 13 : Détermination de la consommation moyenne en combustible (en kg/h) dans le cas des briquettes de sciure de bois cylindriques

Désignation			Test n°1	Test n°2	Test n°3	Valeur moyenne
T _{ambiante}	Température ambiante	(°C)	15,7	16,1	19,0	16,933
T _{initiale eau}	Température initiale de l'eau	(°C)	14,6	15,5	17,0	15,7
M _{initiale eau}	Masse initiale de l'eau	(kg)	2,5	2,5	2,5	2,5
M _{initiale (eau+M)}	Masse initiale de l'eau + Marmite	(kg)	3,616	3,616	3,616	3,616
M _{APEB (eau+M)}	Masse après ébullition de l'eau + Marmite	(kg)	3,288	3,338	3,310	3,312
M_{eau volatilisé}	Masse d'eau volatilisée	(kg)	0,328	0,278	0,306	0,304
P _{initiale CHB}	Masse initiale charbon de bois	(kg)	0,5	0,5	0,5	0,5
P _{CHB imbrulé}	Masse de charbon de bois imbrulé	(kg)	0,218	0,262	0,254	0,245
P_{CHB consommé}	Masse de charbon de bois consommé	(kg)	0,282	0,238	0,246	0,255

t _{ébullition}	Temps d'ébullition	(mn)	24	23	20	22,333
t _{final}	Temps final	(mn)	39	38	35	37,333
		(s)	2 340	2 280	2 100	2 240
		(h)	0,650	0,633	0,583	0,622
	Consommation moyenne	(kg/h)				0,410

Après plusieurs Tests d'Ebullition d'Eau réalisés au laboratoire, avec une masse consommée de 0,255 kg en moyenne pour chaque test, la consommation moyenne (par heure) en briquettes de sciure de bois cylindriques est de 0,410 kg/h.

La masse moyenne d'eau volatilisée est de 0,304 kg pour 2,5 kg d'eau à bouillir.

Avec une masse moyenne d'un échantillon de briquette comprise entre 38 et 40 g, le nombre de briquettes ayant été testées est de 13 briquettes correspondant à une masse de 0,5 kg. Dont, 10 d'entre eux ayant été utilisées pour un effectuer un Test d'Ebullition d'Eau dans le foyer amélioré de modèle cylindrique.

Tableau 14 : Détermination de la puissance et de l'efficacité énergétique du foyer amélioré par l'utilisation de briquettes de sciure de bois cylindriques comme combustibles

C_{eau}	Chaleur massique de l'eau	(J/kg.°C)	4 180
L_{eau}	Chaleur latente de vaporisation de l'eau	(J/kg)	2 260 000
$M_{\text{initiale eau}}$	Masse initiale de l'eau	(kg)	2,5
$M_{\text{eau restante}}$	Masse d'eau restante	(kg)	2,196
$M_{\text{eau volatilisée}}$	Masse d'eau volatilisée	(kg)	0,304
$T_{\text{ébullition}} - T_{\text{finale}}$	Température d'ébullition - température initiale	(°C)	79,3
t_{final}	Temps total du test	(s)	2 240
$P_{\text{CHB consommé}}$	Masse de charbon de bois consommé	(kg)	0,255
PC_{CHB}	Pouvoir calorifique de la briquette	(J/kg)	22 554 952,422
$PC_{\text{CHB}} \times P_{\text{CHB consommé}}$	Pouvoir calorifique CHB X masse CHB consommé	(J)	5 759 031,185
Q	Energie transmise par le foyer à la marmite	(J)	1 515 725
P	Puissance du foyer	(W)	676,663
η	Rendement du foyer	(%)	26,319

Avec un pouvoir calorifique de 22 554 952,422 J/kg, les briquettes à base de sciure de bois de modèle cylindrique procurent :

- une quantité d'énergie transmise par le foyer à la marmite d'une valeur de 1 515 725 J ;
- une puissance du foyer de 676,663 W ;
- un rendement du foyer de 26,319%.

V.5. Etude comparative des briquettes à base de sciure de bois de modèles cylindrique et extrudé par rapport au charbon de bambou et au bois énergie

V.5.1. Efficacité énergétique

Tableau 15 : Résultat récapitulatif de l'efficacité énergétique

Désignation		Bois de chauffe	Charbon de bois	Charbon de bambou	Brique de sciure de bois cylindrique	Brique de sciure de bois extrudée
C _{eau}	(J/kg.°C)	4 180	4 180	4 180	4 180	4 180
L _{eau}	(J/kg)	2 260 000	2 260 000	2 260 000	2 260 000	2 260 000
M _{initiale eau}	(kg)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
M _{eau restante}	(kg)	2,070	1,978	2,202	2,196	2,243
M _{eau volatilisée}	(kg)	0,430	0,522	0,298	0,304	0,257
T _{ébullition}	(°C)	95	95	95	95	95
T _{ébullition} - T _{initiale}	(°C)	74,0	73,1	78,5	79,3	79,1
t _{final}	(s)	3 035	3 055	2 100	2 240	1 560
P _{CHB consommé}	(kg)	0,456	0,292	0,238	0,255	0,443
PC _{CHB}	(J/Kg)	18 183 000	28 006 000	27 994 178	22 554 952	21 350 729
PC _{CHB} X P _{CHB consommé}	(J)	8 291 448	8 188 954	6 671 946	5 759 031	9 447 698
Q	(J)	1 744 196	1 943 824	1 494 907	1 515 725	1 407 415
P	(W)	574,730	636,230	711,860	676,663	902,189
η	(%)	21,040	23,740	22,406	26,319	14,897

Ce tableau récapitule le résultat de l'étude comparative de l'efficacité énergétique des cinq combustibles solides étudiés et met en exergue le Pouvoir calorifique inférieur du charbon de bambou (27994178 (J/kg) qui diffère peu de celui du charbon de bois. Dans ce cadre, c'est le charbon de bambou qui est le combustible capable de concurrencer voire substituer le bois énergie.

V.6. DISCUSSIONS

Les pays en voie de développement ou les pays qui n'ont pas de pétrole comme le cas de Madagascar, pour sortir de la classe de pays en voie de développement vers la classe des pays développés, la meilleure solution est d'axer la politique énergétique vers la diversification des sources d'énergie. Actuellement, le pays a opté dans cette voie par le développement des sources d'énergie alternative telles que la filière agro carburant, les énergies renouvelables dont le biocombustible à travers les briquettes combustibles et le charbon de bambou, objets de ce travail de recherches.

Pour le moment, apporter un jugement sur la meilleure ou la mauvaise solution, dépendra des résultats issus de l'utilisation de ces biocombustibles par le biais de leur utilisateur respectif. Par contre, les essais expérimentaux ont montré des résultats probants y correspondants. En se référant au problème énergétique et environnemental dans le pays, l'utilisation de ces biocombustibles au

niveau des ménages que ce soit les briquettes cylindriques ou extrudées ou bien le charbon de bambou, est considérée comme une des solutions appropriée pour le moment.

Ainsi, parmi les combustibles étudiés, lequel d'entre-eux : briquette cylindrique ou extrudée et charbon de bambou est le plus efficient énergétiquement et écologiquement par rapport au bois énergie ?

Les briquettes de sciures de bois ou le charbon de bambou sont parmi les sources d'énergie alternative entrant dans le cadre de la diversification des sources d'énergie dans le pays.

Les tests d'efficacité énergétique du charbon de bambou et des briquettes cylindrique et extrudée ont permis de disposer les caractéristiques physico chimiques de chaque biocombustible telles que : le PCI, la puissance, la consommation en combustible, le rendement et la quantité d'énergie émise lors de la combustion des biocombustibles.

Le tableau 16 récapitule le résultat comparatif des caractères physico chimiques de ces trois combustibles par rapport au bois énergie.

Tableau 16 : Etude comparative de l'efficacité énergétique du charbon de bambou, des briquettes cylindriques et extrudées par rapport au bois de chauffe et au charbon de bois,.

caractéristiques physico chimiques	Bois de chauffe	charbon de bois	charbon de bambou	Briquette cylindrique	Briquette extrudée
PCI (kcal/kg)	4350	6700	6697,17	5395,92	5107,82
Quantité d'énergie émise (J)	1744196	1 943 824	1 494 907	1 515 725	1 407 415
Puissance (W)	574,73	636,23	711,86	676,66	902,189
Rendement (%)	21,04	23,74	22,4	26,31	14,89
consommation en combustible (kg/h)	0,541	0,345	0,40	0,41	1,02

Ce tableau montre que le PCI du charbon de bois et celui du charbon de bambou diffère de peu, ce qui montre que le charbon de bambou est considéré comme le combustible alternatif au bois énergie et capable de substituer le bois énergie au niveau des ménages.

De plus, au niveau de la puissance du feu, c'est la briquette extrudée qui tient la première place avec une puissance de 902,189 W par rapport à celle du charbon de bois qui est de 636,23 W c'est-à-dire le feu émis par les briquettes extrudées est très puissant face à celui du charbon de bois. Au niveau du rendement du foyer relatif à l'utilisation de ces combustibles, c'est la briquette cylindrique qui détient le meilleur rendement de l'ordre de 26,31% face à celui du charbon de bois avec seulement 23,74%.

VI. CONCLUSION

Au terme de ce travail de recherches, force est d'admettre que l'objectif initialement fixé est atteint. Le charbon de bambou est un combustible solide apte à concurrencer le bois énergie. L'étude comparative de l'efficacité énergétique des combustibles a montré que: Le charbon de bois qui consomme le moins de combustible avec 0,345 kg/h que celui bambou avec 0,40 kg/h et celui bois de chauffe avec 0,541 kg/h. Ainsi, c'est le plus économique. Le bois de chauffe ne peut pas concurrencer ni le charbon de bambou ni le charbon de bois à cause de son faible pouvoir calorifique inférieur. Dans ce cadre, Le pouvoir calorifique du charbon de bois (6700 kcal/kg) et celui du charbon de bambou (6697,17 kcal/kg) diffère de peu, ce qui signifie que le charbon de bambou est apte à substituer le charbon de bois.

L'étude comparative de l'efficacité écologique de ces combustibles a été mise en évidence par la combustion de ces combustibles avec le foyer amélioré. Le résultat de ces tests de combustion a montré que le charbon de bambou qui est le plus efficace écologiquement par rapport aux autres. La combustion du charbon de bois avec du foyer amélioré émet 1,4 fois de gaz carbonique

dans l'atmosphère, alors que le charbon de bambou absorbe quatre à cinq fois plus importante de gaz à effet de serre (GES) dont le CO₂ et produire 35 % d'oxygène en plus qu'un volume équivalent d'arbres. De plus, en combustion, le bambou émet moins de dioxyde de carbone (CO₂) qu'il n'en a emmagasiné, car une partie du CO₂ est stockée dans ses rhizomes. Ainsi, en tenant compte des avantages apportés non seulement par l'utilisation du charbon de bambou comme combustible mais aussi la capacité des feuilles de bambou à absorber quatre à cinq fois plus importante du GES dont le CO₂, le fait d'utiliser le charbon de bambou comme combustible n'aura pas d'impact sur l'environnement car les CO₂ émis par sa combustion sont absorbés par ses propres feuilles.

RÉFÉRENCES

- [1] T. Alleau, « Situation mondiale de l'énergie », chez Mémento de l'hydrogène, Fiche 1.2, AFHYPAC, 2020.
- [2] M.V. Ravaoarimalala, Production d'éthanol combustible à partir de la canne à sucre : efficacité énergétique et écologique dans la commune rurale de Fanandrana, Toamasina II, Université d'Antananarivo, ESPA, Ingénierie Minière, Géo énergie, 108 pages, 2016.
- [3] M. Ferrer, capitalisation des secteurs biogaz et foyers améliorés à Madagascar, Antananarivo : Etc Terra Madagascar, 2018.
- [4] K. Rafitson, La lente marche vers la transition énergétique à Madagascar : Etats des lieux et perspectives, FES Madagascar, 2017.
- [5] FAO, « Evaluation des ressources forestières mondiales : Rapport Madagascar », Rome, 2020.
- [6] MEFT, USAID et CI, Evolution de la couverture de forêts naturelles à Madagascar 1990-2000-2005-2009
- [7] MEFT, USAID et CI, Evolution de la couverture de forêts naturelles à Madagascar 2005-2010, 2015.
- [8] A. Georgelin, Le secteur de l'énergie à Madagascar : Enjeux et opportunités d'affaire, Antananarivo, service Economique : Ambassade de France à Madagascar, 2016.
- [9] N. M. Soatahiniavo, Contribution à l'élaboration de combustibles solides à partir des sciures et copeaux de bois, Université d'Antananarivo, ESPA, Génie des Procédés chimiques et industriels, 73 pages, 2019.
- [10] D. Meyers, B. Ramamonjisoa, J. Sève, M. Razafindramanga et C. Burren, Etude sur la consommation et la production en produits forestiers ligneux à Madagascar, USAID, IRG, 93 p, 2006.
- [11] EDBM, « Madagascar, l'île aux réserves d'énergie », Antananarivo, 2017.
- [12] P. Lamballe et A. Vogel, Transformation du bambou, Saint Etienne : Gret, 2016
- [13] INBAR, EU, IFAD, « Fabrication du charbon dans le Dôme Four à charbon : Ethiopie, Madagascar, Tanzanie » Bulletin Technique 11, p.2.