



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE



MENTION : SCIENCE ET INGENIERIE DES MATERIAUX

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du
DIPLOME DE LICENCE EN SCIENCE ET INGENIERIE DES MATERIAUX

INTITULE

**VALORISATION DES SCIURES DE BAMBOU EN BRIQUETTE DE
CHARBON COMBUSTIBLE**

Espèce étudiée : Dendrocalamus giganteus

Présenté par :

RANDRIAMBELOSON Ombana Tsiresy

Soutenu le **10 Mai 2016**

Année : 2015



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE



MENTION : SCIENCE ET INGENIERIE DES MATERIAUX

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du
DIPLOME DE LICENCE EN SCIENCE ET INGENIERIE DES MATERIAUX

INTITULE

**VALORISATION DES SCIURES DE BAMBOU EN BRIQUETTE DE
CHARBON COMBUSTIBLE**

Espèce étudiée : *Dendrocalamus giganteus*

Présenté et soutenu par : RANDRIAMBELOSON Ombana Tsiresy

Président du jury :

☞ Docteur RANDRIANARIVELO Frédéric

Directeur de mémoire :

☞ Monsieur RAKOTOMANANA Niandry Maminirina

Rapporteur de mémoire :

☞ Monsieur RAZAFINJATOVO Charles

Membres du jury :

☞ Professeur Titulaire, RANAIVONIARIVO Velomanantsoa Gabriely

☞ Docteur RATSIMBAZAFY Hery Mikaela

Soutenu le **10 Mai 2016**

Année : 2015

REMERCIEMENTS

Notre gratitude s'adresse en premier à DIEU Tout Puissant, sans qui nous n'avons pas eu la santé, la force et le courage de réaliser ce mémoire de fin d'étude. Ce travail a pu être réalisé avec la collaboration de plusieurs personnes. C'est avec un grand plaisir que nous adressons nos vifs remerciements à tous ceux qui ont contribué, de loin ou de près à l'élaboration de ce présent travail.

Ainsi nous tenons à remercier toutes les personnes suivantes :

- Au Professeur ANDRIANAHARISON Yvon, Professeur titulaire, Directeur de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo qui a bien voulu nous permettre de soutenir notre mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme de License Académique en science et ingénierie des matériaux.

- Au Docteur RANDRIANARIVELO Frédéric, Maître de conférences, Chef de la mention Science et Ingénierie des Matériaux qui a coordonné le déroulement de l'enseignement au sein de notre mention et qui a accepté de présider ce mémoire.

-A Monsieur RAZAFINJATOVO Charles, Enseignant Chercheur à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, qui a accepté de rapporter ce travail.

- A Monsieur RAKOTOMANANA Niandry Maminirina , Enseignant à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Encadreur de ce travail , pour ses conseils judicieux, ses suggestions pertinentes, son support constant qui nous ont énormément aidé à la réalisation de ce travail.

- Au Professeur RANAIVONIARIVO Velomanantsoa Gabriely Professeur titulaire

- et au Docteur RATSIMBAZAFY Hery Mikaela qui ont accepté de juger ce travail.

Et c'est dans la plus grande joie que j'adresse toutes mes reconnaissances et milles merci à ma famille ainsi que mes ami(e)s qui m'ont appuyé financièrement et moralement.

SOMMAIRE

Pages

REMERCIEMENTS

SOMMAIRE

TABLE DES ILLUSTRATIONS

TABLES DES ANNEXES

SIGLES ET ABREVIATIONS

INTRODUCTION 1

CHAPITRE I: MATERIELS

I-1 LE BAMBOU 3

I-2 Les matériels utilisés pour la calcination et la densification
des sciures de bambou 12

CHAPITRE II: METHODOLOGIE

II-1 Descente sur terrain 19

II-2 Analyse au laboratoire 19

II-3 Production de briquelette 25

CHAPITRE III: RESULTATS ET DISCUSSIONS

III-1 Les analyses aux laboratoires 38

III-2 Tests physico-chimiques des briquettes combustibles 43

III-3 Tests de combustion 48

CONCLUSION 50

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNEXES

LISTE DES TABLEAUX

	Pages
<u>Tableau 1:</u> Superficie reboisée par an,	4
<u>Tableau 2:</u> Masse volumique apparente des sciures.....	38
<u>Tableau 3:</u> Résultats du séchage des sciures de bambou.....	39
<u>Tableau 4:</u> Résultats de l'analyse granulométrique lors du criblage de la sciure	40
<u>Tableau 5:</u> Résultats de la teneur en cendres de sciures de bambou	41
<u>Tableau 6:</u> Résultats de la teneur en matières volatiles des sciures de bambou.....	41
<u>Tableau 7:</u> Résultats de la teneur en carbone fixe des sciures de bambou.....	41
<u>Tableau 8:</u> Perte au feu de l'échantillon.....	42
<u>Tableau 9:</u> Tableau regroupant la composition massique des échantillons.....	43
<u>Tableau 10:</u> Représentation de la variation de masse des échantillons en fonction du temps.....	44
<u>Tableau 11:</u> Résultat de la matière volatile des briquettes de charbon	45
<u>Tableau 12:</u> Mesure du temps de cuisson, des quantités d'eau et des charbons de bois	48
<u>Tableau 13:</u> Mesure du temps de cuisson, des quantités d'eau et des briquettes de charbon consommés.....	49
<u>Tableau 14:</u> Coefficients d'équivalence des briquettes de charbon de bois et de sciures de bois	50

LISTE DES FIGURES

	Pages
<u>Figure 1:</u> Distribution mondiale des bambous.....	3
<u>Figure 2:</u> Morphologie du bambou.....	6
<u>Figure 3:</u> Coupe transversale d'un entre-nœud.....	8
<u>Figure 4 :</u> Plan de détail d'un nœud.....	8
<u>Figure 5:</u> Section de tissus de parenchyme.....	9
<u>Figure 6:</u> Coupe de vaisseau vasculaire du <i>Phyllostachys area</i>	10
<u>Figure 7:</u> Exemple de production de charbon de bois par méthode à la meule	14
<u>Figure 8:</u> Procédé de fabrication des briquettes de charbons	27
<u>Figure 9:</u> Procédé de fabrication des briquettes de sciures de bambou	34
<u>Figure 10:</u> Histogramme montrant la variation de densité apparente en fonction de dimension de l'échantillon	38
<u>Figure 11:</u> Courbe de variation du refus partiel de l'échantillon en fonction du diamètre de tamis.....	40
<u>Figure 12:</u> Taux d'humidité des briquettes charbons et des charbons de bambou et de bois	44
<u>Figure 13:</u> Taux de MOV, A, Cf des briquettes de charbon de bambou, des charbons de bambou, et charbon de bois	46
<u>Figure 14:</u> Pouvoir calorifique des briquettes de charbon de bambou, des charbons de bambou, et charbon de bois	47

LISTE DES PHOTOS

Photo 1 : *Dendrocalamus Giganteus*

Photo 2 : Méthode au four pour la production du charbon en bambou

Photo 3 : Four moderne

Photo 4 : Sciure de bambou

Photo 5 : Un pycnomètre

Photo 6 : Mesure du taux d'humidité

Photo 7 : Tamis vibrant

Photo 8 : Four à moufle

Photo 9 : Procédé de calcination des sciures de bambou à partir d'un four à dôme

Photo 10 : Charbons en sciure de bambou

Photo 11 : Fabrication de la pâte de charbon de bambou

Photo 12 : Presse hydraulique TESTWELL multifonctionnelle

Photo 13 : Briquette de charbon de bambou

Photo 14 : Méthode d'obtention des tiges de charbon en bambou

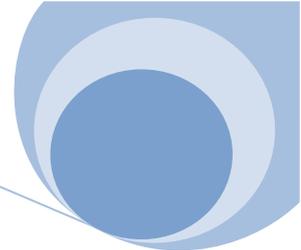
LISTE DES ANNEXES

Annexe I : Principe de la carbonisation

Annexe II : Soude ou hydroxyde de sodium

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

A	: teneur en cendre
AFNOR	: Association Française de la Normalisation
cm	: centimètre
cm³	: centimètre cube
°C	: degré Celsius
Cf	: carbone fixe
DC	: Déchets Cellulosiques
e	: Coefficient d'équivalence
EN	: Norme Européenne
NF	: Norme Française
°C	: degré Celsius
C1, C2	: consommation spécifique
F	: Féculés de manioc
kg/dm³	: kilogramme par décimètre cube
kg	: kilogramme
Kcal/kg	: Kilocalorie par kilogramme
mm	: millimètre
MOV	: Matière volatile
MPa	: Méga Pascal
MJ /kg	: Mégajoule par kilogramme
Kg/dm³	: kilogramme par décimètre cube
PCI	: Pouvoir calorifique inférieur
Th	: Taux d'humidité
g	: gramme
DG	: Briquette de Charbon de bambou
d	: densité apparente
t	: temps



INTRODUCTION

INTRODUCTION

Madagascar, autrefois appelé « île verte » a perdu sa verdure. En 1927, une surface de 53 millions d'hectares était couverte de forêt (1). Une soixandizaine d'année plus tard (en 2000), il n'en restait plus que 12 millions d'hectares, soit une perte de plus de 76% de ces ressources. Les principaux facteurs contribuant à cette perte de couverture forestière sont les défrichements agricoles, les feux et les exploitations forestières pour l'approvisionnement en bois en particulier la production de bois pour la carbonisation.

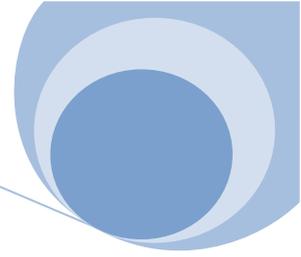
En effet, les combustibles ligneux constituent les principales sources d'énergie de la grande île. Le bois et le charbon de bois représentent la majeure partie de la consommation énergétique du pays, et couvrent presque tous les besoins domestiques. En 2005, plus de 80% des 10.3 millions de m³ soit 48% de la consommation naturelle en produits ligneux est consommée en milieu urbain sous forme de charbon de bois (2). Cette importante consommation urbaine en charbon de bois est engendrée d'une part par le phénomène de l'exode rural, et d'autre part, par l'augmentation continue des prix des énergies non renouvelables (électricité, pétrole, gaz). D'ailleurs, la consommation en charbon de bois à Madagascar entraîne chaque année une diminution non négligeable du couvert forestier.

Face à ce contexte, notre but est d'utiliser le bambou comme source d'énergie car sur le plan environnemental, le bambou peut se substituer aux bois de la forêt. De plus, Madagascar possède la plus grande diversité de bambou, avec 11 genres et 33 espèces. Et grâce à sa croissance rapide, les tiges de bambou peuvent être exploitées à partir de la troisième année.

L'espèce de bambou « *dendrocalamus giganteus* », appelée aussi « Volobe Mavo », possède la meilleure fibre, et la plus utilisée, pour les fabrications des meubles, des bancs scolaires, des lamellés collés, dans la construction et l'architecture. De plus, le recyclage des sciures, des résidus et des déchets provenant de la scierie devrait faire l'objet d'une attention particulière et mérite d'être exploité. Ce sont les raisons pour lesquelles on a proposé ce travail de mémoire de fin d'études qui s'intitule : « Valorisation des sciures du bambou en brique de charbon combustible ».

L'objectif global de cette étude sera d'étudier les caractéristiques physico-énergétiques des sciures de bambou pour la fabrication des briquettes de charbon combustibles.

Ainsi, pour bien mener notre étude, nous avons adopté le plan suivant : d'abord une généralité sur le bambou ainsi que son utilisation et aussi les matériels qui feront l'objet de l'étude, ensuite, nous présenterons les méthodes utilisés suivis par les résultats obtenus avec les interprétations, et les discussions, enfin nous terminerons par la conclusion.



Chapitre I : Matériels

Dans ce chapitre, nous allons voir les matériels nécessaires pour la fabrication des briquettes de charbon combustible.

I-1 LE BAMBOU

I-1-1 Définition et généralité

Le bambou est classé comme une espèce non-arboricole du règne végétal appartenant à la famille des graminées et de la sous-famille des Bambusoidees. Il n'est donc pas un arbre mais une herbe géante avec environ 60 à 90 genres et plus d'un millier d'espèces dans le monde (3).

Actuellement la plus grande biodiversité de bambou est située sur le continent asiatique, américain et africain. (4)

« Les bambous poussent naturellement dans tous les continents sauf l'Europe, et 62% des espèces sont originaires d'Asie, 34% d'Amérique et 4% d'Afrique et d'Océanie » (5). La figure ci-dessous illustre la répartition géographique du bambou dans le monde.

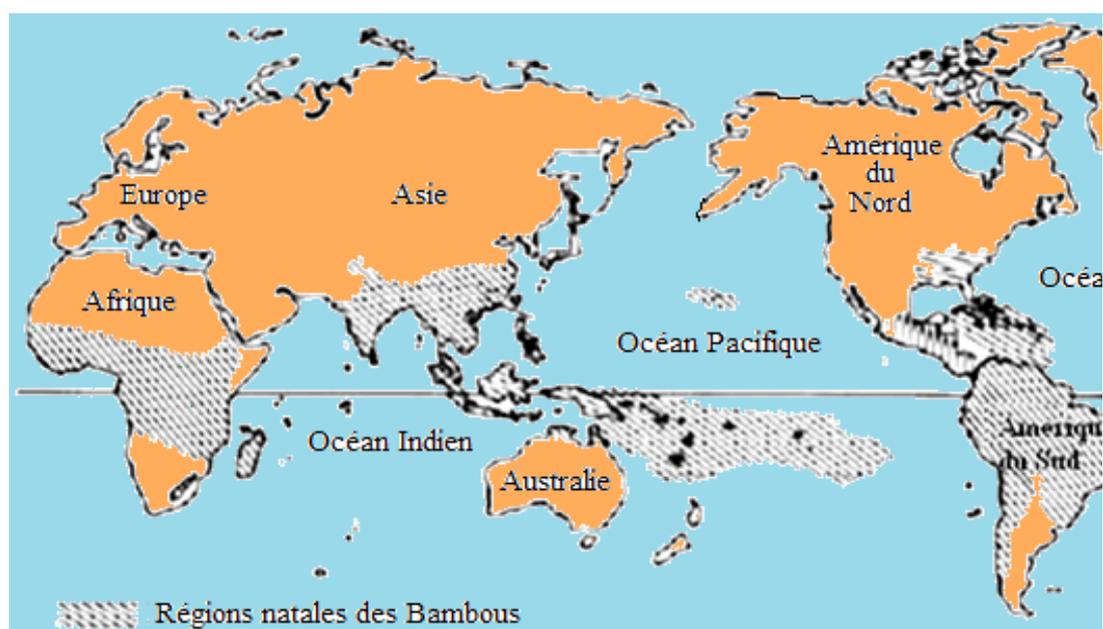


Figure 1: Distribution mondiale des bambous

(Source : Modifié de Lindholm et Palm, 2007)

Dans le monde, il existe environ 20 millions d'hectares de terres reboisés avec du bambou, dont la Chine et l'Inde sont les plus grandes régions avec 14.5 millions d'hectares.

En Chine et en Inde, le bambou est considéré comme une plante d'une grande importance économique, avec une forte demande et de production, entraînant l'augmentation des superficies reboisées (6)

Tableau 1: Superficie reboisée par an,

Pays	zones reboisées (ha)	Source / an
Dans le monde	20.000.000 (total)	Maoyi (2005)
Inde	7.500.000 (total)	Varmah et Pant (1980)
Chine	7.000.000 (total)	Fu Barnik (1995)
Brésil	136000	Beraldo et al. (2004)

Source : Adapté de Ostapiv (2007)

Le mot bambou est tiré du bruit causé par l'éclatement des tiges lorsqu'elles sont soumises au feu, "bam-boo" (7).

A Madagascar, la répartition phytogéographique des bambous n'a pas encore été étudiée. Mais on sait que quelques bambous se trouvent en abondance dans les forêts sclérophylles de montagne de Marojejy, Tsaratanàna et Andringitra (8). Dans certaines forêts secondaires ou « *savoka* » de l'Est de Madagascar, les bambous comme *Ochlandra capitata* sont aussi très abondants et envahissants (8). D'après WELCHIN (1970) (9), les provinces de Toamasina et de Fianarantsoa sont particulièrement riches en bambou.

Le Bambou pousse bien dans presque tous les types de sols (10). Il est une plante tropicale, vivace, et qui donne naissance à de nouvelles pousses sans besoin de replantation (11).

I-1- 2 Morphologie du bambou

Le bambou présente différentes parties caractéristiques (Figure 1) : la tige généralement de grande taille qui sont des chaumes, les feuilles et les branches et les racines qui comprennent les racines et les rhizomes (12).

La tige principale du bambou est un « chaume » ou canne, lignifié, fistuleux (c'est-à-dire en tube), et formé par des sections creuses, ou « entre-nœuds », séparés par des diaphragmes formant ainsi les nœuds (13). Les différentes espèces de bambou se différencient

par les caractéristiques de ces chaumes à savoir leur taille, leur forme et leur couleur. Les bambous possèdent deux types de rhizomes ou aussi tiges souterraines qui sont distingués selon leur mode de croissance.

Le premier est dit rhizome leptomorphe vu que les entre-nœuds sont longs et minces, et dont la croissance se fait, presque exclusivement, à l'horizontale, ou monopodiale. Les bambous pourvus de ces rhizomes leptomorphes sont dits traçants car ils ont tendance à s'étendre en surface. La deuxième est le rhizome pachymorphe qui comporte des entre-nœuds courts et plus ou moins épais. La croissance n'est horizontale que sur quelques centimètres et dite sympodiale. Les bambous pourvus de ces rhizomes pachymorphes restent contenus en touffe serrée, ils ne s'étendent pas en surface comme les traçants.

On dit qu'ils sont "cespiteux" à partir des nœuds se développent les ramifications qui portent les feuilles et parfois les fleurs. Chaque année, de nouvelles ramifications poussent à partir des nœuds des dernières ramifications, ainsi le nombre de ramifications à chaque nœud peut, parfois, permettre l'identification de l'âge des espèces. Puis, les feuilles s'insèrent aux ramifications via un fourreau engainant qui est relié au limbe par un pétiole très court. Ces feuilles de bambou ont une nervure principale très marquée et des nervures secondaires parallèles ; elles sont de différentes formes et couleurs selon l'espèce (14) (15) (16).

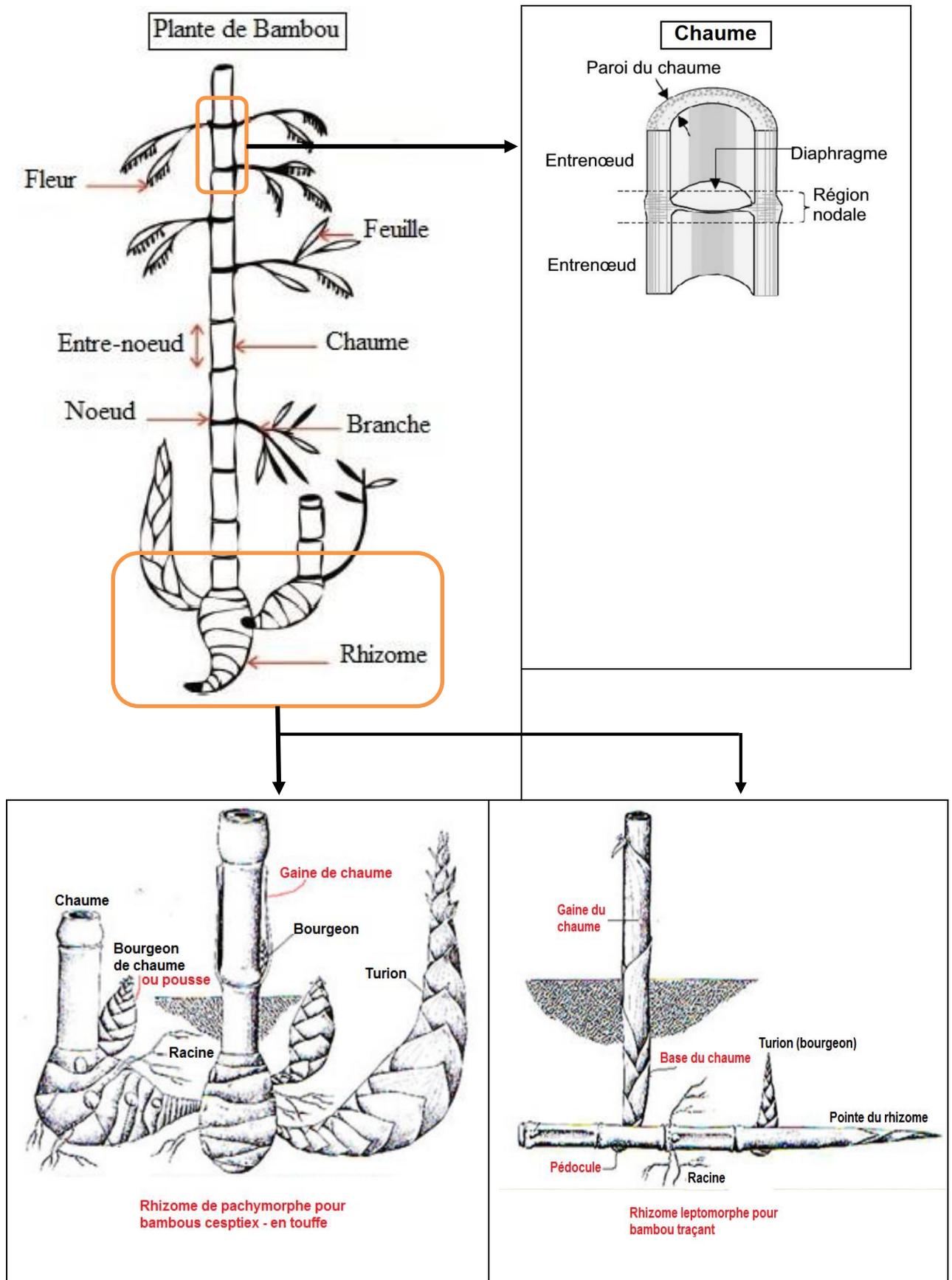


Figure 2: Morphologie du bambou (Source : NMBA, 2004)

I-1-3 Caractéristiques techniques et anatomique des tiges de bambou

I-1-3-1 Propriétés chimiques

La composition chimique du bambou est similaire à celle du bois. Les principaux constituants des chaumes, pour 90% de leur masse, sont : la cellulose, l'hémicellulose et la lignine. Une différence par rapport au bois est qu'il contient plus d'extraits alcalins, de cendres et de silice ainsi que des minéraux.

Le bambou contient également de l'amidon, des protéines et des glucides. Ces derniers jouent un rôle important dans sa durabilité. La résistance du bambou contre les moisissures, les champignons et les insectes est fortement liée à sa composition chimique.

Les propriétés chimiques du bambou varient avec son âge et sont en corrélation avec ses propriétés physiques et mécaniques (18).

I-1-3-2 Propriétés physiques et mécaniques

Les celluloses sont la principale source de propriétés mécaniques du bambou et du bois. Sa structure moléculaire est définie par trois plans perpendiculaires. Le premier est constitué de nombreuses et fortes liaisons hydrogènes, le second par de plus faibles forces « Van der Waals » et le troisième par des liens covalents. L'observation de cette structure explique l'anisotropie du comportement de ce matériau. La résistance à la traction de la cellulose est évaluée à 8000 MPa.

Le chaume est constitué de 55% de cellules de stockage ou parenchyme, pour la fonction chimique, de 35% de fibres pour la résistance, de 10% de tissus conducteurs d'eau et de sucre. Le bambou est donc en quelque sorte un matériau composite constitué de fibres cellulosiques dans une matrice ligneuse. Le pourcentage de fibres est plus élevé dans les parties extérieures et inférieures du chaume. En voici une coupe transversale (figure 3).

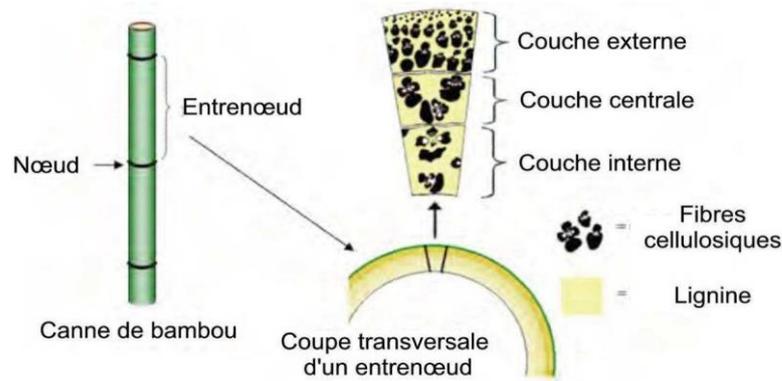


Figure 3: Coupe transversale d'un entre-nœud (source : Hargot, 2009)

Comme le montre la coupe transversale sur la figure, la quantité de fibres est plus importante dans le tiers extérieur afin d'assurer la résistance du chaume. Ces fibres représentent 60 à 70% du poids des tissus.

Le nœud est le paramètre qui influe le plus sur les propriétés physiques et mécaniques du chaume. Des études sur les nœuds du bambou ont montré que bien qu'ayant une densité plus élevée que celle des entre-nœuds, ils sont nettement moins performants au point de vue de leurs propriétés mécaniques. Cette contreperformance serait causée par la présence de fibres plus courtes et de faisceaux vasculaires tordus comme nous le montre la figure ci-dessous.

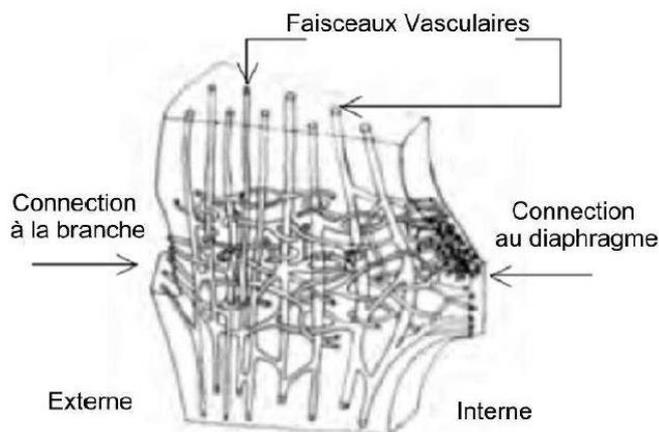


Figure 4 : Plan de détail d'un nœud (source : Hargot , 2009)

I-1-3-3 Anatomie du bambou

Les propriétés du chaume sont déterminées par son structure anatomique. Les tissus du parenchyme, matrice de base du chaume, sont constitués de cellules vivantes et

stockent les aliments nutritifs tels que l'amidon dont l'apport est nécessaire lors de la pousse très rapide de la plante. Ils contribuent également à la stabilité et à la flexibilité de la plante.

Au cœur du chaume, au niveau des nœuds, il existe une membrane tendre de couleur blanchâtre essentiellement constituée de parenchyme vivant (22).

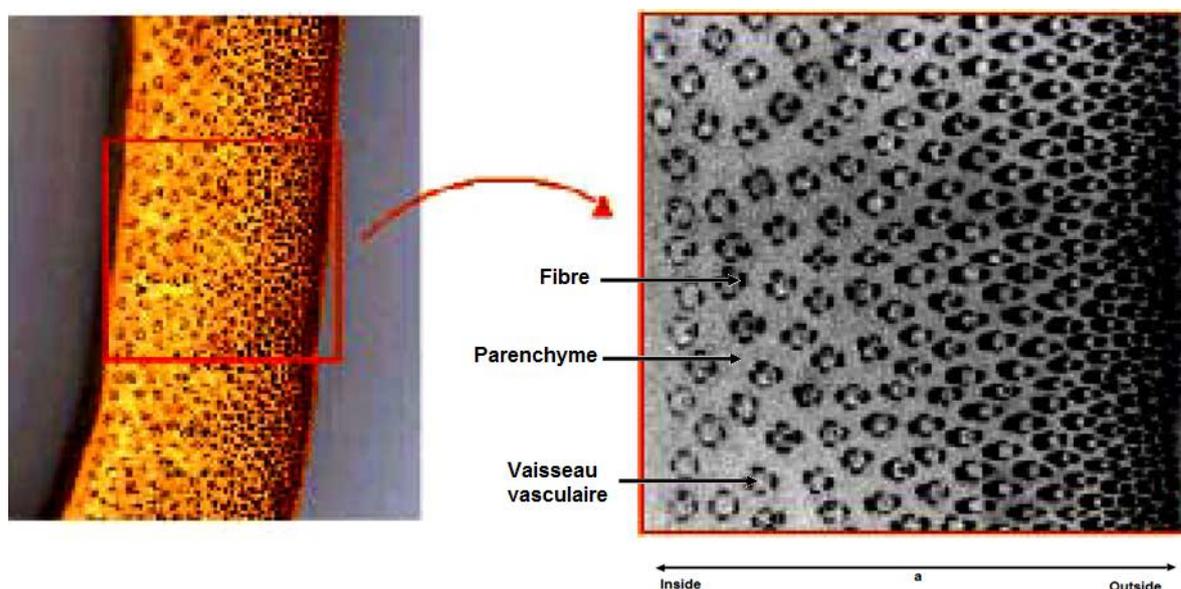


Figure 5: Section de tissus de parenchyme (Source : Grosser et Liese ,1971)

De plus, les tissus structuraux et mécaniques sont divisés en deux catégories : le collenchyme et le sclérenchyme.

- Les cellules collenchymateuses sont allongées et vivantes ; elles ont une paroi épaisse qui leur permet de soutenir les jeunes organes en développement.
- Le sclérenchyme renforce et soutient les parties de la plante qui ne s'allongent pas. Les cellules sclérenchymateuses sont mortes et allongées : ce sont les fibres de la plante.

A l'âge adulte, le pourcentage des cellules sclérenchymateuses est largement supérieur aux cellules collenchymateuses. Les fibres sont longitudinales et serrées ce qui confère à la plante sa souplesse, sa flexibilité, son élasticité et sa grande résistance en traction. Selon Fonlupt en 2008, elles occupent 40% de la paroi et sont disposées autour des vaisseaux conducteurs (23).

Les vaisseaux vasculaires qui permettent la conduite de la sève dans toute la plante sont actifs tout au long de la vie du bambou. Ils sont longitudinaux sans contacts entre eux sauf au niveau des nœuds où des jonctions permettent la circulation de la sève dans le

sens horizontal. Liese en 1987 a observé que le xylème conducteur est constitué d'un ou deux protoxylèmes et de deux grands vaisseaux de métaxylème. Les protoxylèmes ont une membrane simple alors que les métaxylèmes ont une double membrane (24).

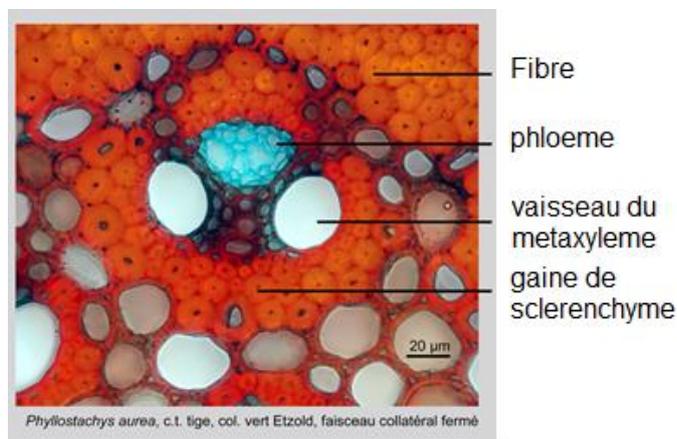


Figure 6: Coupe de vaisseau vasculaire du *Phyllostachys aurea* (Source : Itoh T. 1990)

I-1-4 Utilisation du bambou

Le bambou est un matériau respectueux de l'environnement, léger, durable, polyvalent et avec d'excellente caractéristique physique, chimique et mécanique qui lui permettent de milliers d'applications ou transformations.

D'autre part, le bambou est utilisé comme matières premières industrielles, (20), par exemple: fibres cellulosiques pour papier; l'amidon ou la production d'éthanol; bourgeon comestible; Matériel pour bâtiments ruraux et des bâtiments civils - béton léger; collé et panneaux de contreplaqué stratifiés; Carrelage en fibre de bambou, du ciment et du sable; Tubes pour la conduite d'eau; Meubles, l'artisanat et l'aménagement paysager;

A Madagascar, les bambous sont très utilisés dans la vie quotidienne des malgaches. Une maison entière peut être construite à partir des bambous : le toit, le mur, la porte, les palissades, le parquet et le plafond. A l'intérieur, les bambous sont aussi utilisés pour les ustensiles de cuisines, les meubles et les instruments de musique comme le flutte (sodina), le hocket en tuyau (kitratraika) et la cithare sur tuyau (valiha). En agriculture, les bambous sont utilisés comme canaux d'irrigation, tuteur et pour construire des paniers (garaba) pour le transport des produits.

Divers outils utilisés en pêche tels que les différents types de nasse (kiribo, tandroho) et la canne à pêche sont aussi fabriqués avec du bambou. La consommation des

pousses des bambous n'est pas encore très répandue même si quelques communautés savent que les pousses de certaines espèces sont comestibles (25).

I -1-5 Présentation de l'espèce étudiée

L'espèce *Dendrocalamus giganteus*, aussi connu comme bambou géant, est un géant est le plus imposant des bambous tropicaux et équatoriale. Elle est natif de Myanmar (Birmanie), Bhutan, la Chine et la Thailand mais a été introduit dans plusieurs pays dont Madagascar et qui est connue sous le nom de « *volobe mavo* ».

La classification du *Dendrocalamus giganteus* se présente comme suit (26),

Famille : POACEAE

Sous Famille : BAMBUSOIDEAE

Genre : *Dendrocalamus*

Espèce : *Dendrocalamus Giganteus*

Nom vernaculaire : *Volobe Mavo*

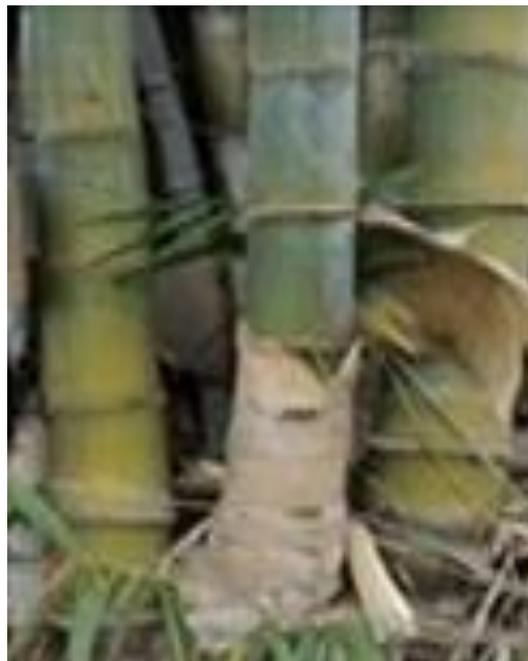


Photo 1: *Dendrocalamus Giganteus* (Source : Wikipédia 2015)

Cette espèce possède la meilleure fibre, avec une croissance rapide et elle n'est pas envahissante. Elle est la plus utilisée pour les fabrications des meubles, des bancs scolaires, des lamellés collés. De plus, le recyclage des résidus et des déchets provenant de la scierie est très possible et mérite d'être exploité.

I-2 Les matériels utilisés pour la calcination et la densification des sciures de bambou

I-2-1 Liant

1- Définition

Le liant est le composant de base indispensable au collage .Il permet l'agglomération des diverses particules solide entre elles.

2- Classification (27)

Selon leur composition, les liants peuvent être classés en deux grandes familles :

- a) les liants minéraux
- b) les liants organiques

➤ Les liants minéraux

En général, Les liants minéraux sont obtenus par traitement à haute température de matière minérale, et font prise en présence d'eau. Le carbone ne s'y rencontre que sous la forme oxydée de « CO₂ » (carbonate).Il est connu que certains liants durcissent à l'air seulement et d'autres dans des milieux humides ou dans l'eau. Cette propriété nous permet de classer les liants minéraux en :

- *Liants aériens* : liants pouvant se durcir à l'air dû à une réaction de carbonatation et ils ne peuvent conserver leurs propriétés mécaniques qu'à l'air : chaux aériennes, plâtres, argiles
- *Liants hydrauliques* qui durcissent et conservent leurs propriétés mécaniques non seulement à l'air mais aussi dans l'eau dû à une réaction d'hydratation de silicates ou d'aluminates (ex.: chaux hydraulique, ciment Portland, ciment prompt, laitiers.)

➤ Les liants organiques

Les liants organiques sont des résines d'origine naturelle ou synthétique qui servent de liaison pour les charges et les fibres dans les matériaux composites.

Les liants organiques sont synthétisés par des organismes vivants, ou par la science de l'homme, au départ de matière minérale ou de matière organique préexistante. Leur mode de prise est complexe, et le carbone s'y rencontre principalement sous la liaison $\equiv\text{C}-\text{H}$.

Les liants hydrocarbonés: bitumes, goudrons ; les résines et surtout les polymères : les aminoplastes, par exemple, sont des polymères largement utilisés comme liants dans l'industrie du bois et de ses dérivés.

La qualité des échantillons de composites qu'on veut obtenir dépend de la qualité des matières premières, des propriétés du mélange ainsi que des conditions de l'environnement lors du malaxage. Ces nombreuses variables peuvent affecter les propriétés des matériaux composites qu'on veut concevoir.

I-2-2 Méthodes de production du charbon

Les méthodes de production sont nombreuses suivant le temps et la technologie mais le principe est le même, on peut les catégoriser en 4 types comme les suivants :

- ✚ méthode à la meule
- ✚ méthode au four
- ✚ méthode par pyrolyse
- ✚ méthode de production industrielle moderne

a. Méthode à la meule (28)

C'est la technique la plus ancienne utilisée par l'homme depuis l'antiquité, ce procédé consiste pour faire carboniser le bois dans le lieu où l'on coupe ce dernier, c'est-à-dire dans la forêt.

Technique de l'installation

Les morceaux étant de longueur de 0 à 1 mètre environ, on les met debout et inclinés, entassés les uns sur les autres en formant une circonférence dans le plan horizontal de 3 à 6 mètres environ de diamètre, et une demie dans le sens vertical de 2m50 à 3 mètres de haut environ, en laissant un trou de toute la hauteur dans le centre pour y mettre le feu, qui consiste en charbon de bois allumé, puis on le referme totalement et on met une couche de terre ou de gazon sur toute la surface pour éviter les courants d'air.

Il brûle dans cette position pendant quinze jours ou trois semaines suivant la qualité du bois, et lorsqu'il est suffisamment brûlé on remet une nouvelle couche de terre sur toute la surface pour l'étouffer complètement et on le laisse refroidir, puis on démonte le tout.

Le bois étant assemblé et le feu y étant, il prend le nom de fourneau et demande à être surveillé nuit et jour ». Le procédé en meule permet d'obtenir entre 17 % et 28 % du poids initial de bois. Le rendement en volume est de 60 %. Ce procédé ne permet aucune récupération d'autres produits comme les goudrons.

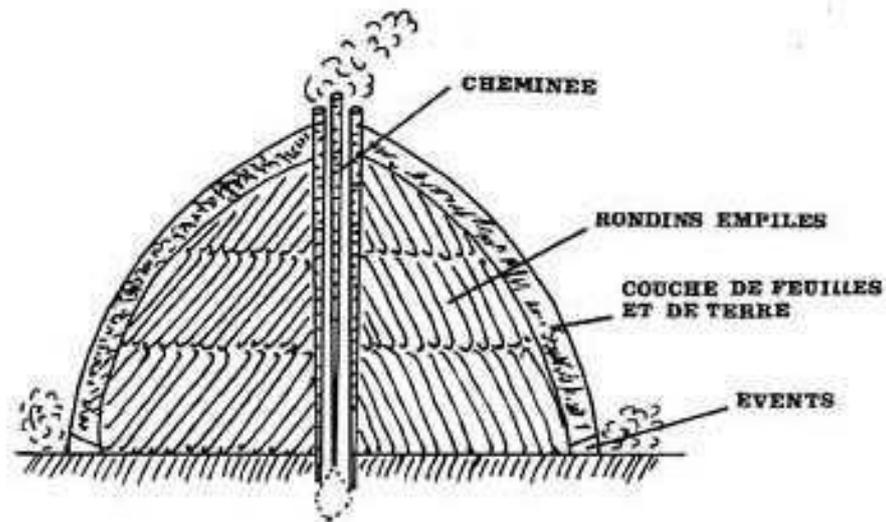


Figure 7: Exemple de production de charbon de bois par méthode à la meule

b. Méthode au four (29)

Cette méthode est apparue au cours du XIX^{ème} siècle, la production étant dans un four métallique, le principe est le même à celui de la méthode à la meule mais la différence se situe au niveau de la manipulation et de la production. Ce four est d'un usage plus facile que les meules. Il ne fonctionne pas en vase clos et récupère les sous-produits comme les goudrons et les gaz.

Description de l'appareil

« Il se compose d'une cage en forme de dôme composé de plaques de fortes tôles montées sur un bâti en fonte. La partie supérieure se termine par une cheminée munie d'un couvercle mobile ; la partie inférieure est ouverte et la cage se pose simplement sur une aire préparée comme pour une meule ordinaire ».

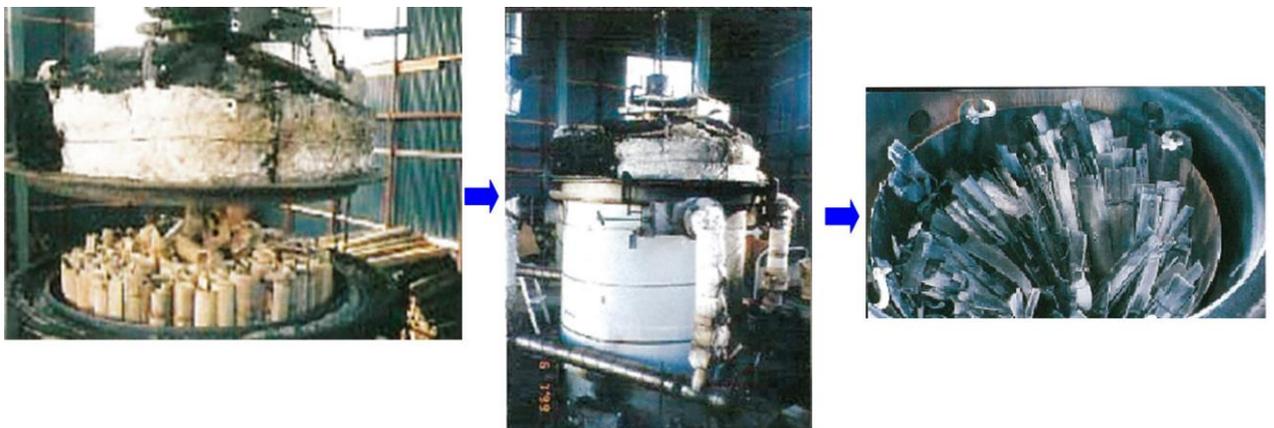


Photo 2: Méthode au four pour la production du charbon en bambou

c. Méthode par pyrolyse (30,31)

C'est le procédé en vase clos qui était utilisé à l'époque où la distillation du bois produisait l'acide acétique appelé alors acide pyroligneux, le méthanol appelé aussi « esprit de bois » et divers produits chimiques. Le charbon de bois n'était pas le but premier de l'opération mais plutôt un sous-produit.

La carbonisation de 100 kg de bois dans ce type de four permet d'obtenir :

- ✓ 25 kg de charbon de bois
- ✓ 0,75 kg d'alcool méthylique
- ✓ 1 kg d'acide acétique
- ✓ 4 kg de goudron de bois
- ✓ 45,95 kg d'eau
- ✓ 23 kg de gaz combustible

Mais les résultats dépendent de la qualité de bois et les conditions de transformations. Les résultats obtenus sont fortement dépendants des espèces de bois utilisées et des conditions de transformation.

En 1875, l'ingénieur métallurgiste Grüner notait : « Lorsqu'il a été préparé vers 350 à 400°C et par calcination lente, il est d'un beau noir pur, sonore, dur tachant peu les doigts. Préparé à une température inférieure, il est plus ou moins brun, peu sonore et tendre, mais plus tenace que le charbon noir ; c'est une sorte de charbon roux, que les ouvriers désignent sous le nom de « fumerons » ou de « brûlot », parce qu'il brûle avec fumée et flamme plus ou moins éclatante.

Un charbon trop cuit, ou plutôt partiellement brûlé par l'action de l'air passe à l'état de braise ; il est alors fendillé, tendre, friable, tachant les doigts, d'un noir ferme dans les cassures fraîches. »

d. Production industrielle moderne

La production industrielle est de plus en plus effectuée dans des fours. Un des enjeux contemporains est d'en limiter ou éviter les rejets dans le milieu naturel et d'utiliser des matières organiques qui n'augmentent pas la pression sur les forêts, tropicales et primaires notamment.



Photo 3: four moderne

I-2-3 Les types de presse pour les briquettes combustibles (32, 33, 34,35)

En général, on trouve souvent les presses à piston, les presses à vis et les presses à granuler. Elles se diffèrent fondamentalement par leur principe de fonctionnement, leurs exigences technologiques vis-à-vis de la matière et les caractéristiques des produits obtenus. Ces exigences technologiques supposent donc une préparation préalable des matières notamment par broyage et par séchage.

Ce sont également les technologies utilisées en production industrielle des bûchettes et des granulés dans les pays développés. Il existe des variantes au sein d'une même catégorie de presse qui diffèrent entre autres par la capacité de production, la masse, les tolérances vis-à-vis de la matière première.

Pour la compression sans liant, deux paramètres importants sont intervenues :

- la granulométrie
- l'humidité.

Une granulométrie adéquate permet l'automatisation du système permettant ainsi d'obtenir une forte capacité de production mais aussi et surtout d'obtenir de bons produits. Une taille de particules supérieure à celle exigée par la presse obture le système de chargement et affecte la solidité des produits.

Une humidité trop élevée provoque une accumulation de vapeur d'eau altérant le système de chargement et quelquefois provoque l'éjection de la briquette dans une presse à vis ou l'éclatement de la briquette, voire du moule, dans une presse à piston.

I-2-3-1 Presses à piston

C'est un système de compression muni d'un piston équipé d'une tête de poussée et animé d'un mouvement de va-et-vient compactant la matière dans un cylindre prolongé par un canal de refroidissement dont la longueur peut atteindre 5 à 10 m et qui empêche le gonflement et la destruction des briquettes sous la pression interne de la vapeur d'eau produite lors de l'échauffement de la matière.

Le piston reçoit l'énergie d'un moteur (électrique ou à explosion) à travers un système hydraulique à haute pression ou bien grâce à un volant d'inertie. Les briquettes produites sont reconnaissables de par l'existence des interfaces de coups de piston.

I-2-3-2 Presses à Vis

Dans les presses à vis, la biomasse est extrudée en continu grâce à une ou plusieurs vis rotatives à travers un moule de forme effilée. Les effets associés de la friction causée à la paroi du récipient et de la chaleur due à la friction interne dans la rotation du matériau et de la vis (600 tours/min) provoquent une augmentation de la température (avoisinant le 200°C) dans le système qui aide le réchauffement de la biomasse. Les briquettes qui en résultent sont facilement reconnaissables par l'existence d'un trou central obtenu grâce à un axe situé au centre de l'orifice d'extrusion.

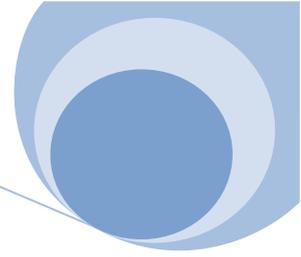
I-2-3-3 Presses à granuler

La presse à granuler possède une histoire plus récente dans le domaine de la densification à des fins énergétiques. Jusqu'en 1960, cette presse a été réservée exclusivement à la fabrication d'aliments pour le bétail. La matière est comprimée dans une matrice annulaire fixe munie de plusieurs filières grâce à un, deux ou trois rouleaux animés d'un mouvement rotatif.

A l'inverse, une autre variante propose une matrice annulaire tournant à grande vitesse alors que les rouleaux sont fixes. Une dernière variante utilise un disque horizontal (matrice à plateau) fixe dont la face supérieure est parcourue par des rouleaux. Ces rouleaux presseurs ont pour mission de distribuer la matière de manière uniforme à l'intérieur de la matrice et d'assurer une répartition régulière de la pression.

Les pressions de friction qui entrent en jeu sont de l'ordre de 100-150 [MPa], 200 [MPa] et provoquent une élévation de température de l'ordre de 163 à 176 °C, 179 à 193 °C.

L'apport de vapeur d'eau permet la lubrification et facilite la granulation qui, rappelons-le, se fait sans ajout d'agent de liaison, la lignine du bois jouant ce rôle. A leur sortie de la filière, à l'aide de couteaux ajustables, les granulés sont coupés à la longueur souhaitée puis dirigés vers un refroidisseur, tamisés afin de séparer les fines et enfin stockés



Chapitre II : METHODOLOGIE

Hormis les investigations bibliographiques, la méthodologie a comporté trois parties : descentes sur terrain, travaux au laboratoire (analyse) et enfin traitements de données.

II-1 Descente sur terrain

Les descentes sur terrain dans le cadre de cette recherche consistent surtout aux prélèvements des échantillons de *Dendrocalamus giganteus* en vue de caractériser son propriété. En plus de cela, les descentes ont permis de mieux appréhender l'écologie, les utilisations de ces bambous et de connaître les rôles de ces plantes tant sur l'aspect écologique, économique que social.

- **Obtention des sciures de bambou**

Pour cette étude, les échantillons des sciures de bambou provenaient des déchets de la scierie d'un Centre de Transformation de Bambou sis à **Tongarivo Bevalala (District Antananarivo Atsimondrano)**.

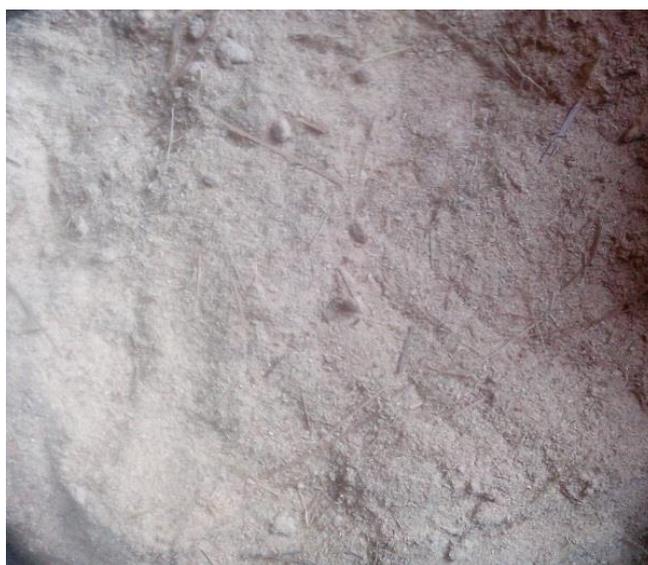


Photo 4: sciure de bambou (Source : Auteur 2016)

II-2 Analyse au laboratoire

Les analyses au laboratoire consistent à relever les diverses mesures (masses, volumes, etc.), qui permettent de calculer les paramètres physiques des bambous à étudier.

Le combustible est défini :

- Par ses qualités physiques :
 - Densités
 - Taux d'humidités

- Granulométrie
- Par ses qualités énergétiques
 - Taux de cendre ;
 - Taux de matières volatiles ;
 - Taux de carbone fixe ;
 - Pouvoir calorifique ;
 - Perte au feu ;
 - Capacité calorifique par test d'ébullition d'eau.

II-2-1 Les propriétés physiques des sciures de bambou utilisées

a. Densité

Dans notre cas deux types de densités interviennent : la densité apparente et la densité absolue.

⇒ **La densité apparente**

La masse volumique apparente est la masse volumique d'un mètre cube d'un matériau pris en tas, comprenant à la fois de vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules. Pour déterminer la masse volumique apparente des sciures, on a besoin d'un récipient dont on connaît le volume plein et un entonnoir.

Comme principe, il faut savoir le volume total du récipient qu'on va noter V_r . Ensuite, on remplit le récipient de sciure à l'aide d'un entonnoir qui doit viser le centre du récipient. On arrête jusqu'à ce que les sciures débordent du récipient. Après on tasse (comprime) le récipient à partir du milieu.

Le volume de la sciure V_s qui reste dans le récipient correspond alors au volume total V_r de ce dernier. Enfin, on détermine sur la balance électronique la masse de la sciure dans le récipient noté M_s

Ainsi, nous avons la formule suivante :

$$\mathbf{d_{app} = \frac{M_{si}}{V_{si}}} \quad \mathbf{[I]}$$

Avec : d_{app} : la densité apparente de l'échantillon de sciure de bambou [g/cm^3]

M_{si} : la masse de l'échantillon de sciure de bambou [g]

V_{si} : volume de l'échantillon de sciure de bambou [cm^3]

⇒ **La densité absolue**

C'est la masse d'un mètre cube de ce matériau, déduction faite de tous les vides, aussi bien des vides entre les grains que des vides à l'intérieur des grains. La densité absolue est le rapport de la masse absolue d'une unité de volume du matériau à température donnée à la masse du même volume d'eau distillée à la même température. Pour déterminer la masse volumique absolue de sciures, nous avons utilisé un pycnomètre



Photo 5: un pycnomètre

C'est un paramètre important dans la détermination de densité exacte des sciures de bambou en utilisant la formule suivante :

$$d_{\text{abs}} = \frac{P_3 - P_2}{(P_1 - P_3) - (P_4 - P_2)}$$

[II]

d_{abs} : la densité absolue de l'échantillon de sciure de bambou [g/cm^3]

P_0 : poids du pycnomètre vide ;

P_1 : poids du pycnomètre rempli d'eau ;

P_2 : poids du pycnomètre rempli au 1/3 (2/3 de l'eau est rejeté) ;

P_3 : poids du pycnomètre rempli au 1/3 plus échantillon ;

P_4 : poids du pycnomètre contenant l'échantillon, rempli d'eau au 3/3.

b. Teneur en eau

Dans notre expérience, il est très important de connaître la teneur en eau de la sciure de bambou à travailler.

Comme tout type de bois, l'eau contenue dans le bambou se trouve sous trois formes :

- ✓ l'eau de constitution de la cellulose et de la lignine notamment, que l'on ne peut éliminer sans détruire la nature du bambou
- ✓ l'eau de solvatation, qui n'est pas une eau chimique, mais une eau de saturation des membranes cellulosesiques
- ✓ l'eau libre qui est l'eau des vaisseaux et des cellules creuses

Pour la détermination de la teneur en eau de la sciure de bambou, nous avons mis dans des creusets les échantillons de même masse initiale 1 g que nous avons pesé dans une balance de précision. Ensuite nous avons introduit dans une étuve chauffée à 105°C pendant au moins 1 heure de temps avant de le pesé à nouveau.

A la sortie de l'étuve, l'échantillon est introduit pendant une heure de temps dans le dessiccateur pour éliminer tout contact extérieur et pour le stabiliser aussi.

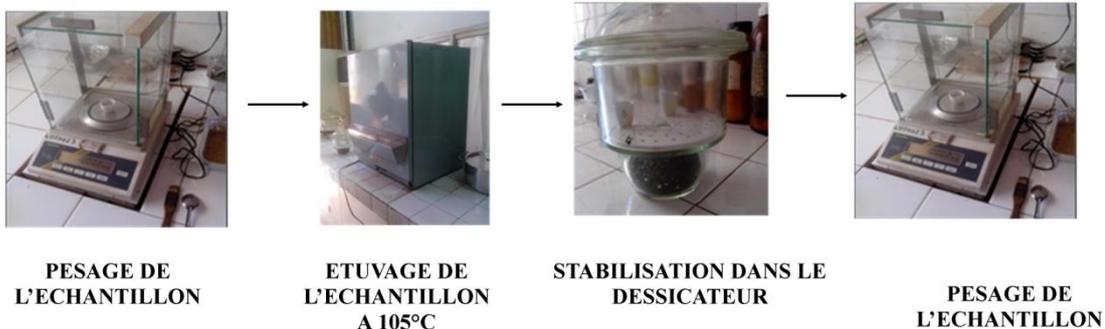


Photo 6: Mesure du taux d'humidité

La différence de la masse initiale et de la masse après séchage à l'étuve donne le taux d'humidité T_h qui est donné par la formule.

$$T_h = \frac{m_0 - m_n}{m_0} \times 100 \quad \text{[III]}$$

Avec : m_0 = masse à l'état initial [g]

m_n = masse à T_h après une heure de temps dans [g]

c. Analyse granulométrique

Pour déterminer la granulométrie des sciures de bambou, nous avons utilisé un appareil appelé tamis vibrant permettant de séparer toutes les dimensions existants dans les sciures de bois. Dans notre cas, six séries de tamis d'ouvertures différentes ont été utilisés lors de l'expérience et nous avons pris 100 g de l'échantillon pour le criblage.



Photo 7: Tamis vibrant

II-2-2 Caractérisation énergétique

Détermination de la teneur en cendres

La teneur en matière minérale représente la quantité de matière résiduelle obtenue en fin de combustion, on parle également du taux de cendres pour une combustion complète. Ce paramètre est un critère de qualité d'un combustible.

Pour la détermination de la teneur en cendres, l'échantillon doit être plus fin, le principe est l'incinération de l'échantillon à l'abri de l'air à 950°C jusqu'à une masse constante de résidu obtenu. Le protocole de détermination est à l'Annexe.

$$x\% = \frac{(m_3 - m_1) \cdot 100}{m_2 - m_1}$$

[IV]

X% : teneur en cendre en pourcentage en masse

[%]

m_1 : masse du creuset à vide [g]

m_2 : masse de la prise d'essai avec du creuset [g]

m_3 : masse de la cendre avec du creuset après calcination [g]

Matière volatile

La matière volatile représente les substances volatiles qui se transforment aisément en vapeur. La détermination de l'indice de matière volatile a été effectuée sur des échantillons pulvérisés. Le principe est le chauffage des échantillons à 950°C à l'abri de l'air.

Le calcul de l'indice de matière volatile se fait à partir de la perte de masse par rapport à la masse initiale.

$$\% \text{MOV} = \frac{(m_2 - m_1)}{m_4 - m_1} \times 100 \quad [\text{V}]$$

MOV : Matières Volatiles [%]

m_1 : masse du creuset à vide [g]

m_2 : masse de la prise d'essai avec le creuset [g]

m_4 : masse du creuset avec l'échantillon à la fin de l'opération [g]

Teneur en carbone fixe

La teneur en carbone fixe du matériau d'essai représente le solde des teneurs en matières volatiles et matières minérales par rapport à 100.

$$\% \text{Carbone fixe} = 100 - (\text{MV} + \text{TC}) \quad [\text{VI}]$$

MV : Matières volatiles [%]

TC : teneur en cendre [%]

Perte au feu

Elle représente les eaux de constitution des silicates hydrates, gaz carbonique, soufre, matière organique et volatile.

La perte au feu a été déterminée sur la matière granulée .Le principe est la calcination d'une prise d'essai dans un four à 900°C jusqu'à poids constant. Le calcul de la perte au feu est représenté par la nouvelle perte de poids rapporteur poids de l'échantillon.

$$\% \text{ Perte au feu} = \frac{(m_1 - m_3)}{m_1 - m_c} \times 100 \quad \text{[VII]}$$

Avec :

m₁ : masse du creuset avec l'échantillon [g]

m₃ : masse du creuset avec l'échantillon après enfournement [g]

m_c : masse du creuset [g]

Rendement de la production de charbon

Le rendement du charbon est le rapport entre la masse de charbon obtenue et la masse des sciures de bois à l'état sec.

$$r = \frac{m_c}{m_s} \times 100 \quad \text{[VIII]}$$

r : rendement [%]

m_s : masse des sciures de bambou à l'état sec [g]

m_c : masse de charbon obtenu [g]

II-3 Production de brique

Les briquettes sont des produits de la densification. Elles se présentent généralement sous forme cylindrique de longueur et de diamètre variables.

II-3-1 Brique de charbon de bambou

Par définition, les briquettes de charbon de bambou sont des produits de la densification des sciures de bambou calciné.

Ces derniers sont obtenus par carbonisation partielle avec une température de 250 à 350°C, plusieurs méthodes sont utilisées pour leur obtention mais durant notre expérience

au laboratoire, nous avons utilisé un four à moufle (Photo) pour l'opération de carbonisation partielle de ces composants.



Photo 8: Four à moufle (Naberther de 30 à 3000°C), Laboratoire OMNIS

II-3-1-1 Procédé de fabrication de la briquette de charbon

Les procédés de fabrication de la briquette sont nombreux mais celui que nous avons utilisé est présenté suivant l'histogramme ci-dessous, le principe de carbonisation est décrit en annexe.

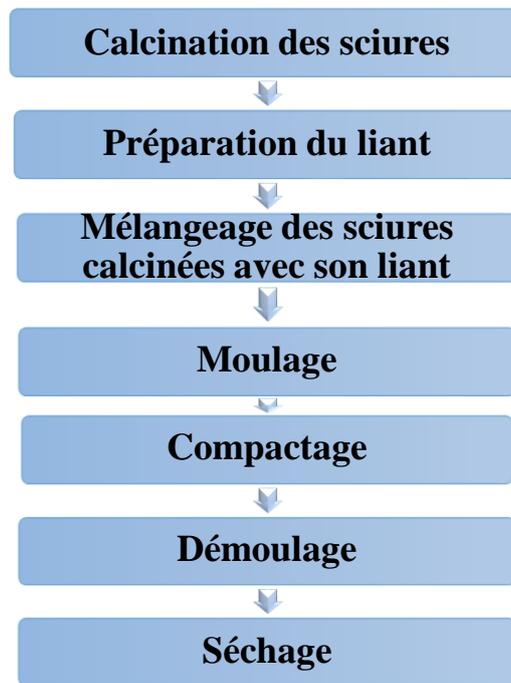


Figure 8: Procédé de fabrication des briquettes de charbons

II-3-1-1-1 Calcination des sciures

Plusieurs méthodes sont utilisées pour l'obtention des charbons, mais le long de notre travail sur terrain, nous avons utilisé un four artisanal sous forme de dôme permettant de carboniser notre sciure. Cette méthode est moins coûteuse et nous permet d'avoir un bon rendement.

⇒ Procédé de calcination à partir d'un four à dôme

La figure ci-dessous nous montre le procédé de carbonisation des sciures.

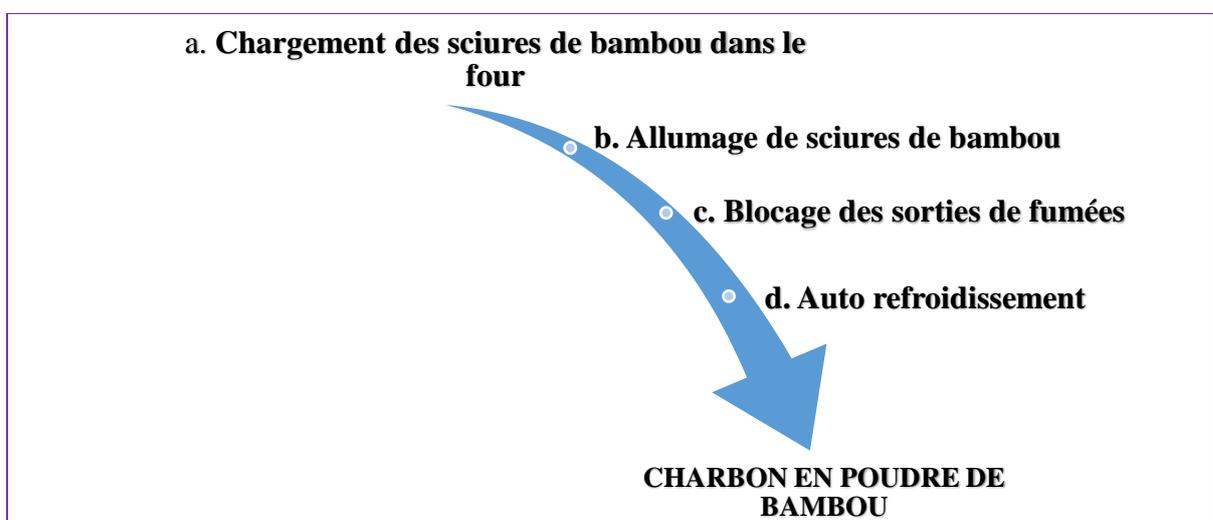


Figure 9 : Schéma du processus de carbonisation dans le four à dôme

Chargement des sciures de bambou dans le four

On verse les sciures dans le four, en évitant la présence d'éventuel vide parce que les circulations d'air ne rendent pas la carbonisation efficace.

Allumage des sciures de bambou

L'allumage commence par la partie supérieure du four. La conduite nécessite une maîtrise et plusieurs pratiques, surtout en analysant la couleur de la fumée.

Blocage des sorties de fumée

Lorsque les sciures de bambou sont chauffées au-dessus de 270°C, elles amorcent un processus de décomposition que l'on nomme carbonisation. En l'absence d'air, du fait qu'il n'y a pas d'oxygène présent pour réagir avec les sciures, le produit final est le charbon de sciure de bambou.

En présence d'air, qui contient de l'oxygène, les sciures prennent feu et brûlent en atteignant une température de l'ordre de 400° - 500°C, et le produit final est la cendre.

C'est pourquoi il est important de bloquer les sorties des fumées au moment où ces fumées disparaissent et descendent dans la sortie de la partie inférieure et la même opération se produit jusqu'à ce qu'elles disparaissent totalement.

Auto refroidissement

Quand toutes les sorties sont bloquées, les charbons passent dans le stade d'auto-refroidissement.

La figure suivant illustre ce procédé, qui a été réalisé au sein du Centre de Valorisation des Résidus et sciures de Bambou sis à Antananivony Andranofasika, Mahajanga, dans la region de Boina.



Photo 9: Procédé de calcination des sciures de bambou à partir d'un four à dôme (*Centre de Valorisation des Résidus et sciures de Bambou à Mahajanga*)

Obtention Charbon en poudre de bambou

Après 24 heures de refroidissement, nous sortons les charbons en sciure de bambou du four dôme.



Photo 10: Charbons en sciure de bambou (Auteur, 2015)

Avec 250 kg initialement introduit dans le four, on a récupéré 157,75 kg à la fin de carbonisation. Le rendement de carbonisation est de 63% (rendement massique).

II-3-1-1-2 Préparation du liant

Pour assurer l'adhésion entre les particules de charbon de sciures de bambou et la solidité des briquettes combustibles, un liant a été ajouté. Dans cette étude, la féculé de manioc a été choisie comme liant.

Nous avons versé une quantité d'eau bien définie dans le réacteur en chauffant progressivement jusqu'à ce que la température atteigne 70°C puis nous y avons ajouté une quantité suffisante de féculés de manioc. Après agitation, nous observons la formation d'une solution très visqueuse qui est l'empois d'amidon dans le milieu réactionnel et après refroidissement l'ajout d'hydroxyde de sodium rend la solution moins visqueuse. Une fois que la solution désirée sera obtenue, nous la mélangeons avec des pâtes de déchets cellulosiques jusqu'à une formation de ouate de cellulose et nous avons obtenu le liant amélioré à base de féculés de manioc.

II-3-1-1-3 Mélangeage des sciures calcinées avec son liant

Durant notre expérience au laboratoire pour le mélange de ces constituants (sciures de bambou et liant), nous avons utilisé une cuvette pour faire le mélange ; et les liants préalablement préparés sont versés en premier lieu dans ce cuvette avec dosage bien défini suivi d'une agitation lente à l'aide d'un agitateur électrique muni d'une hélice à 4 pales dont l'action est de rendre le mélange homogène puis les sciures de proportions connues sont versés en second lieu en augmentant la vitesse de l'agitateur. En tenant compte que l'eau apportée par les liants est suffisant pour bien mélanger l'ensemble.



sciure de bambou calciné



féculé de manioc



pâte de charbon de bambou

Photo 11: Fabrication de la pâte de charbon de bambou

II-3-1-1-4 Moulage

Cette opération consiste à verser le mélange dans un moule pour avoir la forme de la briquette voulue. Nous avons utilisés une moule dont la dimension est le suivant :

- Diamètre extérieure : 56 mm
- Diamètre intérieure : 50 mm
- Hauteur : 140 mm

Il sert à ajuster le mélange pâteux afin d'avoir une forme bien définie, à faciliter le compactage et à rendre le produit obtenu plus présentable

II-3-1-1-5 Compactage

C'est une technique assurant la densification du matériau par la force obtenue à l'aide des outils ou des machines perfectionnés qui rend les matériaux beaucoup plus résistants.

Durant notre expérience, nous avons utilisé la presse au bloc technique d'ANKATSO pour préciser la force de compactage subie par l'échantillon.



Photo 12: Presse hydraulique TESTWELL multifonctionnelle (compactage, résistance maximale) au bloc Technique d'Ankatso

Notre échantillon a subit une simple technique de compactage avec une pression de 7 MPa. Cette pression suffise à faire compacter complètement l'échantillon en raison du mélange pâteux.

II-3-1-1-6 Démoulage

Le moule contenant l'éprouvette est placé entre deux plaques métalliques, le moule est maintenu à l'aide d'un anneau fixé à la moitié de sa longueur. Une fois que tout est

bien placé, la force provoquée par la presse est exercée doucement sur le contre moule pour faire sortir l'éprouvette.

II-3-1-1-7 Séchage

Le séchage de l'échantillon se fait à l'air libre sous une pression atmosphérique pendant environ quatre semaines.



Photo 13 : Briquette de charbon de bambou

II-3-1-2 Autres : Procédé de valorisation des résidus de bambou charbon de bambou

Cette méthode est très efficace pour les recyclages des résidus en charbon de bambou par la méthode suivante. Ce four peut charger des résidus jusqu'à 420 kg.



Résidus des bambous



Découpage en petite lamelle



**Résidus des bambous décou-
pés en petites lamelles**



**Carbonisation dans le four
dôme**



Charbons en bambou

Photo 14: Méthode d'obtention de charbon des tiges de bambou

En appliquant cette méthode, nous avons chargé **420 [kg]** de résidus, et à la sortie, nous avons obtenu **168 [kg]** de charbon. Ce qui nous donne un rendement de **40%**.

II-3-2 Briquette de sciures de bambou

La procédé de fabrication des briquettes de sciures de bambou est exactement le même à celui du briquette charbon de bambou, la petite différence est que avec le briquette de charbon, on utilise des sciures calcinés.

Le procédé de fabrication de briquette de sciure de bambou est représenté comme suit :

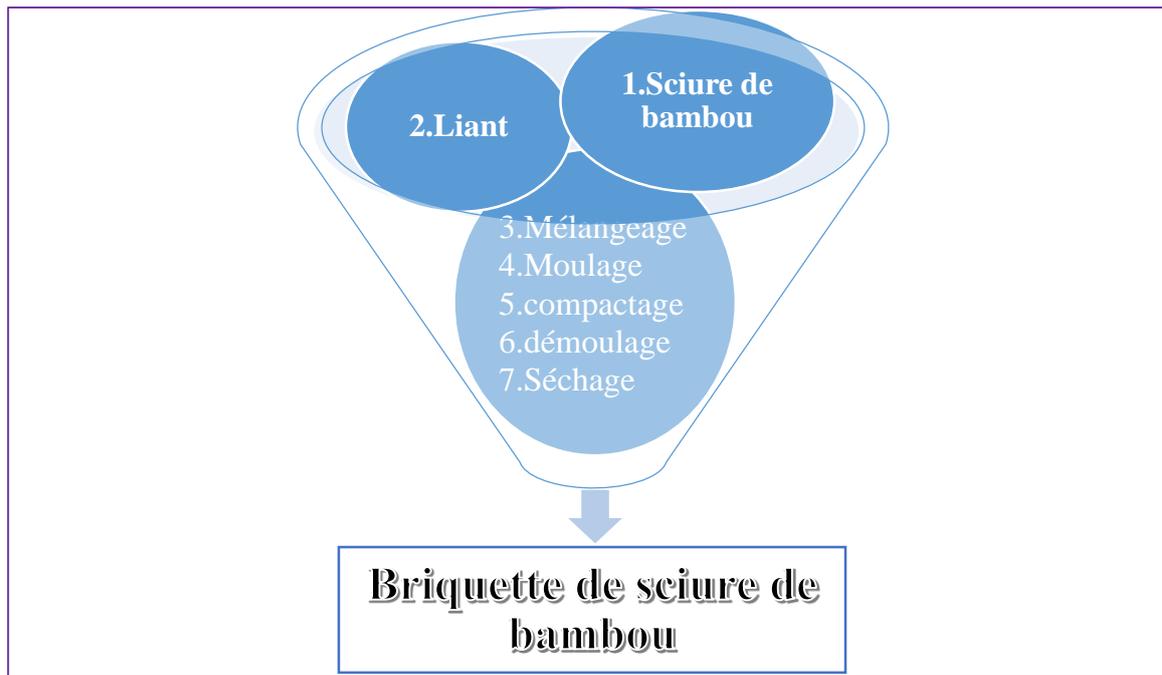


Figure 9: Procédé de fabrication des briquettes de sciures de bambou

II-3-3 Caractérisation des briquettes combustibles

La performance des briquettes est déterminée à partir des paramètres physico-chimiques tels que l'analyse immédiate et du pouvoir calorifique. L'objectif est de pouvoir dégager une comparaison avec d'autres combustibles qui sont utilisés à Madagascar.

II-3-3-1 Pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique d'un combustible représente la quantité d'énergie contenue dans une unité de masse de ce combustible. Elle s'exprime en terme 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 (37). C'est cette valeur du PC qui est récupérable comme énergie par l'utilisateur.

Principe de mesure : Le PCI est déterminé à l'aide d'une bombe peut être calculé avec une approximation suffisante par la formule suivante :

$$\text{PC (Kcal/Kg)} = 80 (100 - K)$$

[IX]

Où K est la teneur en cendre en % du combustible (38)

II-3-3-2 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. D'où l'humidité obtenue ici 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 à 105°C et on effectue une pesée dans un intervalle de temps de 30mn jusqu'à l'obtention d'un poids constant. Sa détermination suit la norme européenne EN 14774. Le taux d'humidité est obtenu par la formule suivante.

$$T_h = \frac{m_0 - m_n}{m_0} \times 100 \quad [X]$$

Avec : m_0 = masse à l'état initial [g]

m_n = masse obtenu après chauffage à 105°C à l'étuve. [g]

II-3-3-3 Taux de matière volatile

Les matières volatiles d'un combustible est la partie de la matière organique 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 Nabertherm B180 (Photo 8) 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 :

$$MOV = \frac{m_1 - m_4}{m_1 - m_c} \times 100 \quad [XI]$$

MOV : matière volatile [%]

m_c : masse du creuset [g]

m_4 : masse du creuset avec échantillon à la fin de l'opération [g]

II-3-3-4 Taux de cendre

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 obstacle 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 :

$$A(\%) = 100 - \left(\frac{m_1 - m_5}{m_1 - m_c} \times 100 \right) \quad]XII[$$

A : taux de cendres (%)

m_1 : masse du creuset avec échantillon (g)

m_5 : masse du creuset avec échantillon à la fin de l'opération (g)

m_c : masse du creuset (g)

II-3-3-5 Taux de carbone fixe

Généralement, si la carbonisation est bien conduite, le charbon 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 total qui est la somme du carbone fixe et le carbone contenu dans la partie volatilisé.

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

$$Cf(\%) = 100 - (MOV + A) \quad]XIII[$$

MOV : matière volatile (g)

A : teneur en cendre (g)

II-3-4 Test de combustion

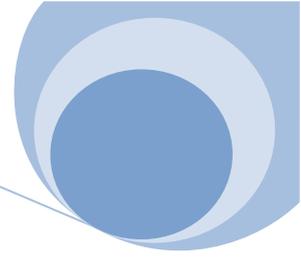
L'objectif était d'apprécier la combustion des briquettes produites, appelée aussi test à l'ébullition d'eau. Il s'agit de comparer le temps mis par ces briquettes pour bouillir une même quantité d'eau, le temps de consommation mais aussi de faire des observations visuelles sur les fumées, les cendres et les odeurs en comparaison avec le charbon du bois. Nous avons procédé comme suit :

- Equipements

- Foyer « fatapera »
- Marmite à fond plat en aluminium avec couvercle
- Une balance de précision
- Les briquettes doivent être sèches à l'air libre
- Un chronomètre

⇒ Procédure

- Oter toute trace de charbon ou de cendre du « fatapera » qui doit être utilisé pour les essais. Le « fatapera » ne devrait pas être encore tiède d'un feu précédent ;
- Prendre une quantité de combustible préalablement pesé ;
- Peser la marmite et son couvercle et en noter le poids, verser de l'eau dans la marmite à la quantité voulue, remettre le couvercle et à noter le poids ainsi obtenu.
- Allumer le feu et noter l'heure
- Exécuter la tâche d'ébullition prévue
- Noter le temps où l'eau commence à bouillir et le temps de fin d'ébullition,
- Faire rapidement les opérations suivantes :
 - Retirer les combustibles restants (non consommés, les peser et les remettre de côté)
 - Peser les cendres
 - Peser et noter le poids de l'eau restant dans la marmite



Chapitre III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

Ce chapitre a pour but de présenter les résultats auxquels notre méthodologie a abouti. Nous allons présenter les résultats de l'étude, d'une part, les analyses aux laboratoires concernant les propriétés physiques et ensuite les caractérisations énergétiques des sciures de bambou, et d'autre part les tests physico-énergétiques des briquettes combustibles. Ces résultats seront accompagnés par leurs interprétations et discussions.

III-1 Les analyses aux laboratoires

Dans cette partie, nous allons voir les résultats des caractéristiques se rattachant à l'état physique des sciures de bambou qui fait l'objet de nos analyses au laboratoire.

III-1-1 Les propriétés physiques des sciures de bambou

a. Densité

La densité est un facteur important pour la caractérisation physique du bambou.

⇒ La densité apparente

Ainsi, après avoir effectué plusieurs essais, pour chaque classe granulométrique, nous avons obtenu les résultats suivants en faisant la moyenne

Tableau 2: Masse volumique apparente des sciures

Diamètre des grains [μm]	$\emptyset < 90\mu\text{m}$	$90\mu\text{m} < \emptyset < 100\mu\text{m}$	$100\mu\text{m} < \emptyset < 125\mu\text{m}$	$125\mu\text{m} < \emptyset < 250\mu\text{m}$
Densité apparente [g/cm^3]	0.338	0.335	0.331	0.328

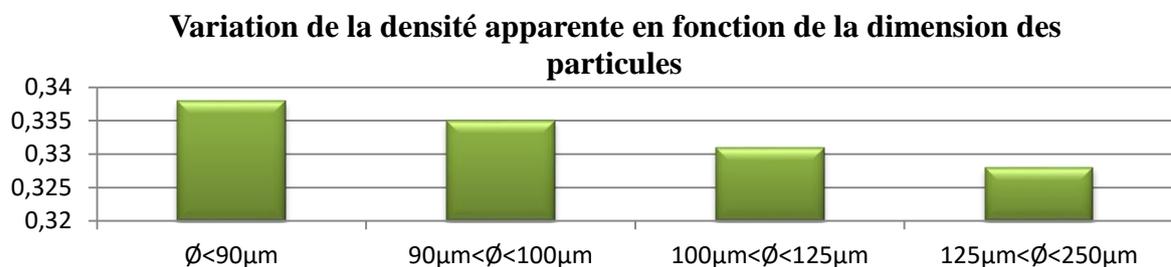


Figure 10: Histogramme montrant la variation de densité apparente en fonction de la granulométrie de l'échantillon

D'après cette histogramme, nous pouvons en déduire que plus le classe granulométrie augmente, plus la densité apparente diminue et cela est dû à l'existence des espaces vides dans chaque échantillon de dimension différente.

⇒ **La densité absolue**

Lors de notre expérience, la densité absolue des sciures de bambou a été difficile à déterminer à cause de leur absorption d'eau c'est-à-dire si on verse l'échantillon dans le pycnomètre contenu d'eau, on constate qu'il n'y a pas de variation de volume.

Teneur en eau

Dans la pratique, nous avons pesé 1000 mg de sciures de bambou par creuset de masse connue dans une balance de précision, les creusets sont numérotés de 1 à 3.

Après avoir effectués plusieurs essais, nous avons obtenu la valeur suivante

Tableau 3: Résultats du séchage des sciures de bambou

Echantillon \ Temps	t ₀	t	% Humidité
1	1000,2 mg	889,1 mg	11,11
2	1000,1 mg	890,5 mg	10,96
3	1000,0 mg	889,7 mg	11,03

t₀ : temps initial

En faisant la moyenne, nous avons obtenu :

$$T_h = 11 \%$$

Cette analyse du taux d'humidité révèle que les sciures de bambou utilisées contiennent 11% en eau.

Analyse granulométrique

Les résultats de l'expérience sont montrés sur le tableau suivant :

Tableau 4: Résultats de l'analyse granulométrique lors du criblage de la sciure

Ouverture de tamis [μm]	1000	500	250	125	100	90
Refus partiel [g]	23.7	33.0	18.5	11.7	9.8	3.2

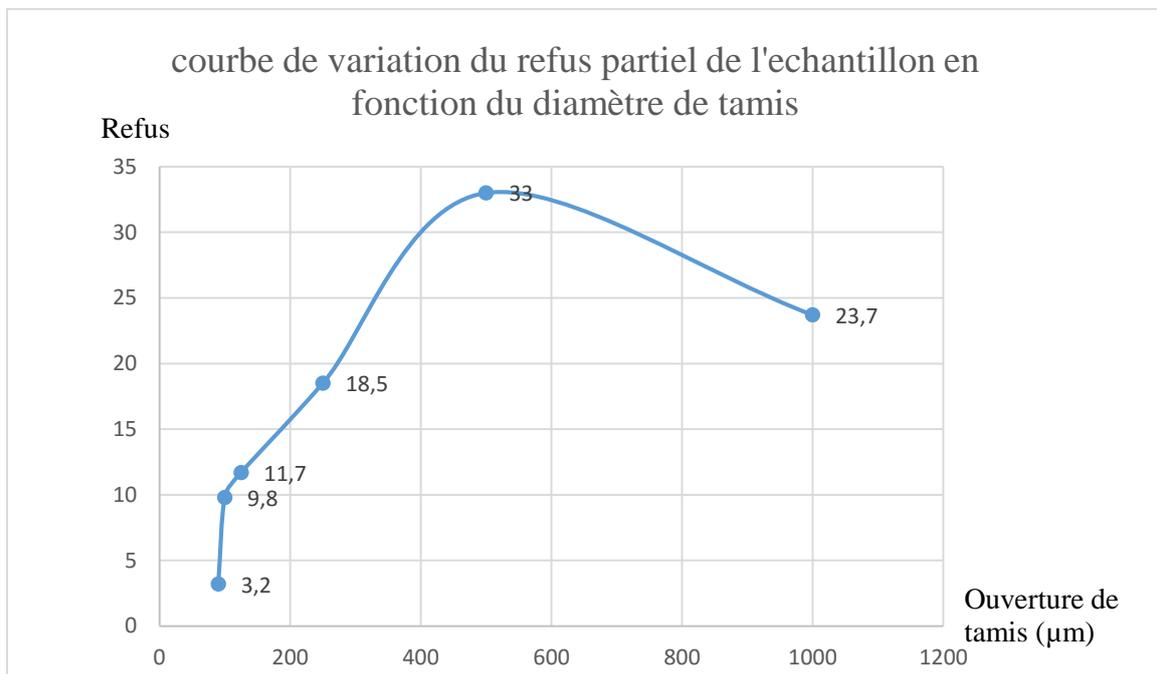


Figure 11: Courbe de variation du refus partiel de l'échantillon en fonction du diamètre de tamis.

III-1-2 Caractérisation énergétique

a. Taux de cendre

Le calcul de la teneur en cendre se fait à partir de la perte de masse par rapport à la masse initiale.

Les résultats expérimentaux sont résumés dans le tableau ci-après :

Tableau 5: Résultats de la teneur en cendres de sciures de bambou

Echantillon	m ₁ en mg	m ₂ en mg	m ₃ en mg	X%
1	8058	9058,1	8072,4	1,44
2	9254,4	10254,6	9269,8	1,54
3	8007,2	9007,5	8021,3	1,41

La moyenne est alors à 1,46% en cendres des sciures de bambous. Le taux faible de cendre signifie que notre produit est considéré comme de bon combustible.

Taux de matière volatile

Les résultats expérimentaux sont résumés dans le tableau ci-après :

Tableau 6: Résultats de la teneur en matières volatiles des sciures de bambou

Echantillons	m ₁ en mg	m ₂ en mg	m ₄ en mg	MOV %
1	7965,8	8966,2	8123,6	15,77
2	8137,2	9137,3	8287,1	14,99
3	9025	10025,3	9176,6	15,16

La sciure de bambou présente en moyenne est de 15,31% de matière volatile.

Le faible taux en MOV des sciures de bambou se justifie par la carbonisation qui élimine une grande partie des matières gazeifiables.

Taux de carbone fixe

Cette détermination a pour but de connaître la quantité de carbone fixe dans le minéral. Nos résultats sont regroupés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 7: Résultats de la teneur en carbone fixe des sciures de bambou

Echantillons	MOV	A	Carbone fixe (%)
1	15,77	1,44	82,79

2	14,99	1,54	83,47
3	15,16	1,41	83,43

Les sciures de bambou ont pour moyenne 83,23% le taux de carbone fixe.

La valeur élevée du taux de carbone fixe se justifie par la lignine contenue dans le bambou. Notons que le Carbone fixe renseigne sur le PCI. Plus il est important, plus, le PCI est important.

Perte au feu

Le calcul de la perte au feu est représenté par la nouvelle perte de poids rapporte au poids de l'échantillon. Le tableau suivant indique la perte au feu des sciures de bambou durant notre expérience au laboratoire.

Tableau 8: Perte au feu de l'échantillon

Echantillon	mc (mg)	m1 (mg)	m3 (mg)	Perte au feu
S	8025,4	9025,5	8406,5	61,89

Rendement de la production

Pour notre expérience, le temps de carbonisation est de 1 heure pour 107g de matières premières à l'état sec et nous avons obtenu 55 g de poudres de charbon de bambou.

$$r = \frac{m_c}{m_s} \times 100$$

[VIII]

r : rendement [%]

ms : masse des sciures de bambou à l'état sec [g]

mc : masse de charbon obtenu [g]

Avec :

$m_c = 55g$ et $m_s = 107g$, après calcul nous avons obtenu, au laboratoire avec le four à moufle, un rendement de 51,40%

III-2 Tests physico-chimiques des briquettes combustibles

Pour ces analyses, le taux d'humidité, qui sera représenté, est le pourcentage de la teneur en eau du combustible à l'état naturel (humide), alors que les valeurs des trois paramètres (taux de matières volatiles, taux de cendres et le taux de carbone fixe qui seront présentées ont été analysées sur la matière sèche. Ces analyses ont été effectuées dans le laboratoire de physico-chimie de l'OMNIS.

Les briquettes de charbons de sciures de bambou (**DG**) obtenues seront comparées par rapport à des études similaires de combustible à savoir : le charbon de bois (**CB**) qui est très utilisé à Madagascar, ainsi que d'autre espèce de charbon de bambou (Charbon de *Bambusa vulgaris constrictinoda* (**BVC**), Charbon de *Arundinaria marojejyensis* (**AM**)).

Nos échantillons, pour ces analyses, n'ont pas les mêmes proportions de taux de compositions. Ainsi, nous avons fixés la teneur en déchets cellulosique à 10%. Ils sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau 9: Tableau regroupant la composition massique des échantillons

Echantillons	Composition en %		
	Déchets cellulosique	Fécule de manioc	Charbon de sciure de bambou
DG 1	10	2,5	87,5
DG 2	10	7,5	82,5
DG 3	10	15	75

II-2-1 Humidité

Ce paramètre a une influence sur le pouvoir calorifique. Pour sa détermination, nous avons utilisés une étuve réglée à une température de 105°C. Nous avons noté T_0 le temps de l'introduction de l'échantillon dans l'étuve. Chaque échantillon est pesé successivement puis remis dans l'étuve, l'opération se répète plusieurs fois dans un intervalle de temps de 30mn jusqu'à l'obtention d'un poids constant en t.

Le résultat est présenté sous forme tableau ci-dessous :

Tableau 10: Représentation de la variation de masse des échantillons en fonction du temps.

Echantillons \ Temps	t0	t1	t2	t3	t
DG 1	65 g	61,12 g	60,62 g	60,57 g	60,57 g
DG 2	65 g	61,34 g	60,78 g	60,57 g	60,65 g
DG 3	65 g	62,26 g	60,95 g	60,51 g	60,51 g

D'après ce tableau, le taux d'humidité est du briquette de charbon est de 6,8%

Suite à des résultats de recherche scientifique récemment publié, nous avons pu comparer notre résultat par rapport à d'autres charbons combustibles.

La figure montre les résultats obtenus après l'analyse de l'humidité pour les briquettes de charbon et les briquettes de sciures de bambou par rapport aux autres combustibles.

Echantillons	DG	BVC	AM	CB
Taux d'humidités	6,8	5,7	5,8	5,28

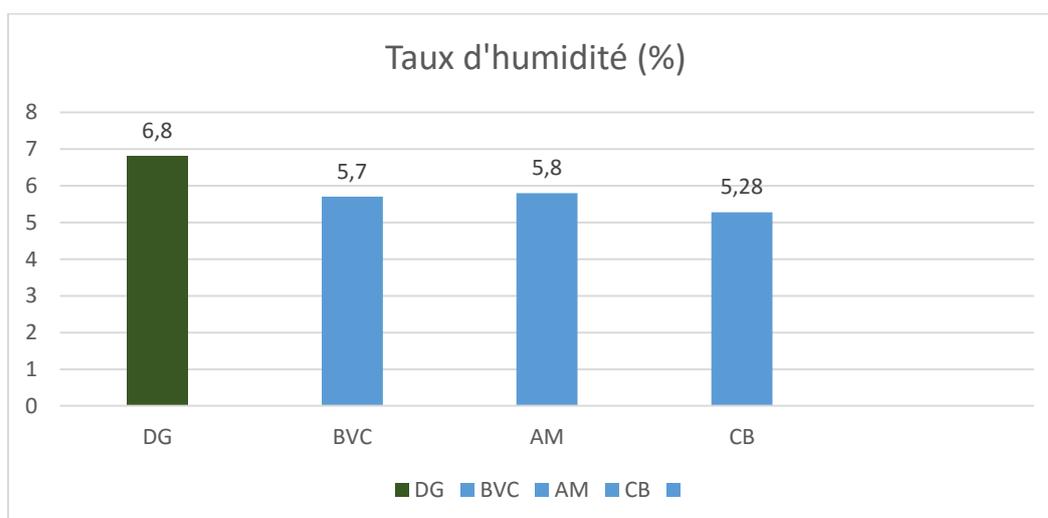


Figure 12: Taux d'humidité des briquettes charbons et des charbons de bambou et de bois

Les briquettes de charbon et les autres combustibles présentent un taux d'humidité faible qui varie entre 7-10%. On constate que le charbon du bois a un taux d'humidité très faible (5.28%) par rapport aux briquettes et aux autres combustibles. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que le charbon subit plusieurs jours de séchage avant sa vente voire même son utilisation.

Par rapport au charbon de bois, la briquette de charbon contient 1% de plus de teneur en eau.

II-2-2 Taux de matières volatiles, taux de cendres et taux de carbone fixe

La matière volatile représente les substances volatiles qui se transforment aisément en vapeur. La détermination de l'indice de matière volatile a été effectuée sur des échantillons pulvérisés. Le principe est le chauffage des échantillons à 950°C à l'abri de l'air.

Les résultats sont présentés sous forme de tableau ci-dessous,

Tableau 11: Résultat de la matière volatile des briquettes de charbon de bambou

Echantillons	MOV en %	A en %	Cf en %
DG 1	14,93	6,03	79,04
DG 2	14,79	5,98	79,23
DG 3	14,95	6,05	79

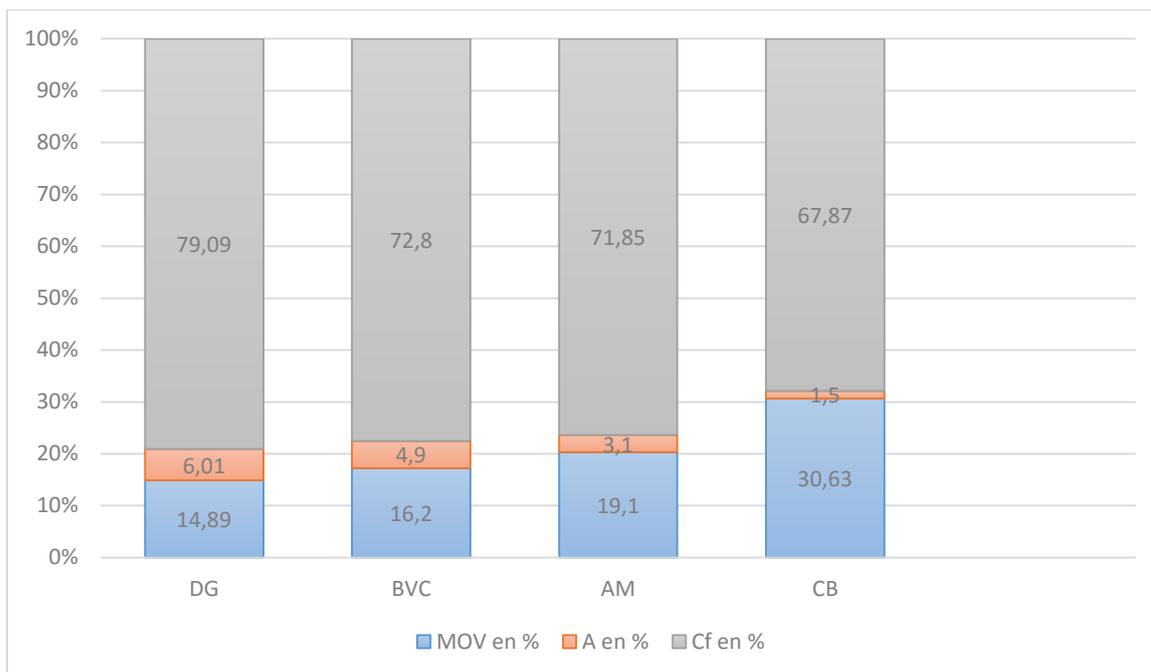


Figure 13: Taux de MOV, A, Cf des briquettes de charbon de bambou, des charbons de bambou, et charbon de bois

La figure montre la répartition en % de ces trois paramètres (MOV, A et Cf) dans la matière sèche des combustibles considérés. Ainsi, la composition d'un combustible peut être séparée en ces trois composantes. Ceci explique que leurs proportions cumulées fassent 100%. On constate que :

- ⇒ Les taux en MOV des charbons de bois sont plus élevés que ceux des briquettes de charbons et ceux des charbons de bambou. Le taux faible en MOV des briquettes se justifie par la carbonisation qui élimine une grande partie des matières gazéifiables. Plus les MOV sont importantes, plus le combustible est fumant. Ces résultats sont similaires à ceux trouvés par Njenga. et al. (2009) montrant que le charbon du bois possède un taux en MOV supérieur à celui des briquettes carbonisées.
- ⇒ On constate que le taux de cendres du charbon de bois est très faible par rapport aux autres charbons. Le faible rendement (10%) de la carbonisation influe également sur le taux de cendres car plus le rendement est faible, plus les charbons contiennent plus de cendres que de carbone fixe. Le four « à dôme » a fait l'objet d'amélioration de rendement de la carbonisation dans l'étude. Il s'agit d'un gros four de carbonisation. Ce four joue le rôle d'isolant en réduisant les pertes de chaleur. Il présente de bons rendements par rapport à un four simple selon des tests réalisés au Sénégal.
- ⇒ le carbone fixe du briquette de charbon est considérablement élevé vis-à-vis des autres combustibles. Ceci se justifie par la lignine contenue dans le bambou et qui a un fort

pouvoir énergétique. Notons que le Cf renseigne sur le PCI. Plus il est important, plus, le PCI est important

II-2-3 Pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique se détermine suivant la formule suivante :

$$\text{PC (Kcal/Kg)} = 80 (100 - K) \quad \text{[IX]}$$

Avec, K la teneur en cendre %

Après calcul, nous avons le **PCI = 7519,2 Kcal/Kg**.

Echantillons	DG	BVC	AM	CB
PCI (Kcal/kg)	7519,2	7605	7740	7402,0076

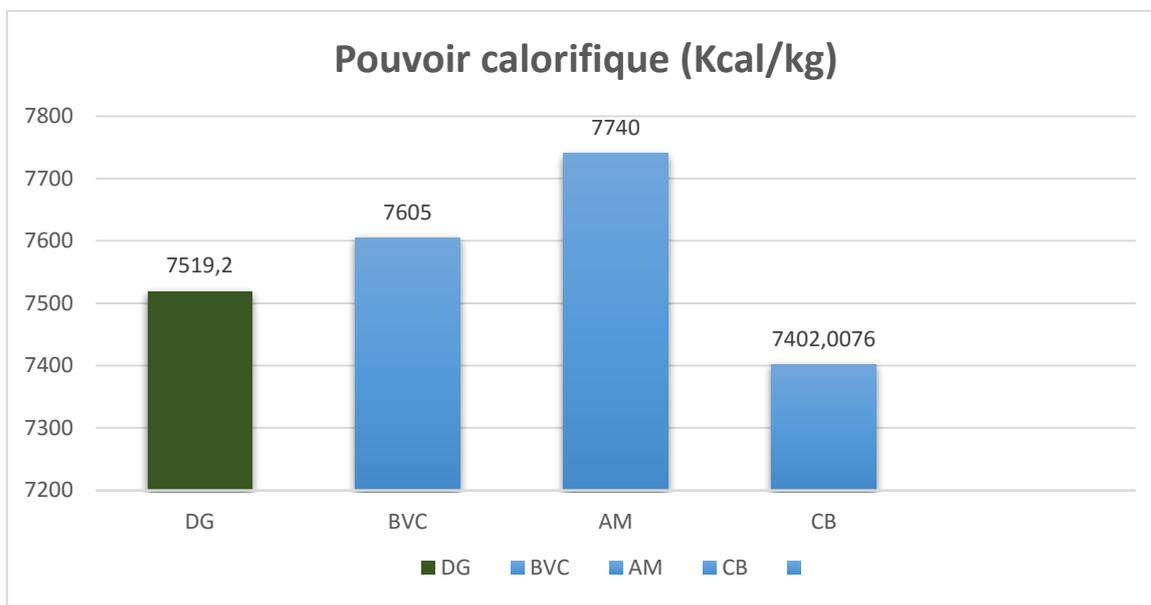


Figure 14: Pouvoir calorifique des briquettes de charbon de bambou, des charbons de bambou, et charbon de bois

Les briquettes de charbons de bambou ont un PCI supérieur à celles issues des charbons de bois qui s'expliquent par le rendement élevé de la carbonisation en contenant un taux faible de cendres et augmentant celui du carbone fixe.

Le liant utilisé dans la production des briquettes augmente ainsi le PCI car selon sa composition, elle est riche en matière organique. Ainsi, l'ajout de ces liants donne aux briquettes sa durabilité et sa solidité (39). Ceci justifie le fait que les briquettes ont un PCI supérieur aux charbons de bois et le taux élevé de carbone fixe.

III-3 Tests de combustion

Ce test mesure la consommation spécifique du combustible et le temps de requis. Il consiste à porter à l'ébullition la quantité d'eau, à noter le temps requis jusqu'à la fin de l'ébullition et à mesurer le volume d'eau évaporée. Les résultats du test sont exprimés en termes de combustible consommé et le temps requis (fin de l'ébullition).

Nous avons fait deux tests entre la briquette de charbon de bambou et le charbon de bois.

Le tableau suivant présente les mesures du temps de cuisson, des quantités d'eau et de charbons consommés.

⇒ **Pour le charbon de bois**

Tableau 12: Mesure du temps de cuisson, des quantités d'eau et des charbons de bois

	Mesure initiale	Mesure finale	Résultats
Temps d'ébullition	08h00mn	08h50mn	50mn
Poids du charbon	300 g	31 g	269 g
Poids de la marmite + couvercle + eau	1800 g	1391 g	409 g
Poids de la cendre			10,2 g

On a, 269g : masse de charbon de bois consommé et 409g : masse d'eau évaporée soit 409ml

$$C1 = \frac{\text{Charbon de bois consommé}}{\text{Volume d'eau évaporée}}$$

[XIV]

$$C1 = 0,66 \text{ g/ml}$$

Cette valeur nous a montré qu'il faut besoin 0,66g de charbon de bois pour évaporer totalement 1ml d'eau. Et le coefficient d'équivalence (e) est inversement proportionnel à la capacité calorifique.

⇒ **Pour la briquette de charbon de bambou**

Tableau 13: Mesure du temps de cuisson, des quantités d'eau et des briquettes de charbon consommés

	Mesure initiale	Mesure finale	Résultats
Temps d'ébullition	10h00mn	10h45mn	45mn
Poids de briquette de charbon	250 g	45 g	205 g
Poids de la marmite + couvercle + eau	2000g	1647	353 g
Poids de la cendre			9,8 g

On a, 205g : masse de briquette de charbon de bambou consommé et 353g : masse d'eau évaporée soit 353ml

$$C2 = \frac{\text{Briquette de Charbon de bambou consommé}}{\text{Volume d'eau évaporée}} \quad [XV]$$

$$C2 = 0,58 \text{ g/ml}$$

Cette valeur nous a montré qu'il faut besoin 0,58g de briquette de charbon pour évaporer totalement 1ml d'eau

Nous avons en déduit le coefficient d'équivalence (e) entre le charbon de bambou et les briquettes de charbons de bambou.

$$e = \frac{C2}{C1}$$

$$e = 0,87$$

Tableau 14: Coefficients d'équivalence des briquettes de charbon de bois et de sciures de bois

Briquettes de sciures de bambou	Coefficients d'équivalence
DG 1	0,87
DG 2	0,89
DG 3	0,95

En général, la prise de feu a été facile pour les briquettes et les charbons de bois mais la durée mis pour bouillir l'eau et celle de consommation diffère. On peut remarquer que ce sont les charbons qui mettent moins de temps pour que l'eau atteigne sa température d'ébullition ou temps d'ébullition (50minutes).

Ces résultats sont proches de ceux trouvés au KENYA qui prouvent que les briquettes de charbon de bambou ne dégagent pas beaucoup de fumées et sont faciles à allumer (40).

Par contre, la composition de la féculé de manioc dans les combustibles a une influence significative sur les coefficients d'équivalence, ils en dépendent.

Le temps d'ébullition du charbon du bois est supérieur à celui des briquettes. Cela est dû au pourcentage de féculé de manioc qui, en augmentant la solidité de la briquette, diminue son temps de consommation. Ces résultats sont proches de ceux trouvés au Sénégal par GTZ (2006) qui disent que le charbon se consume plus vite que les briquettes.

III-3-1 Relation entre les analyses physico-énergétiques et les tests de cuisine

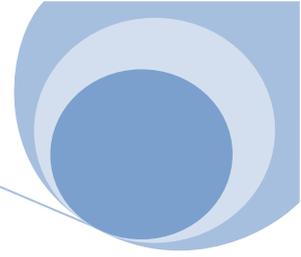
Ces deux types d'analyses de briquettes qui ont été réalisés lors de notre étude révèlent une cohérence entre eux. Par exemple, les briquettes de charbons sont caractérisées par un taux faible de cendres et les tests d'ébullition le confirment. Cependant, les pourcentages de féculé de manioc dans les briquettes combustibles ont eu un impact positif notamment sur le taux de cendres, le carbone fixe et le PCI ; les tests d'ébullitions le confirment. Les briquettes sont caractérisées par des taux assez faible en matières volatiles par rapport aux autres combustibles mais aussi par rapport au charbon de bois qui en est de 30,63% alors que le briquette est de 14,89% ce qui se manifeste par la réduction des fumées et de flamme pendant la combustion et augmente le PCI.

De ces deux types de résultats, nous pouvons conclure que les briquettes sont moins cendreuses ayant un fort PCI. Leur temps de consommation est également long.

III-3-2 Constatations

D'après ces résultats obtenus, on a pu constater que la briquette de charbon produit dispose d'une puissance de feu suffisante et d'un rendement thermique optimal. Ensemble, ces caractéristiques engendrent un point positif et avantageux, c'est celui d'être économique en termes de consommation.

Comparée à la combustion du charbon de bois, la combustion des sciures issues des dispositifs antérieurement décrits, présente l'avantage de produire une plus grande quantité de chaleur (10 à 30 % supérieure) et tous les avantages de l'utilisation du combustible sont : appareillage de combustion simple, pollution plus faible et facilité de distribution suivant le pouvoir calorifique.



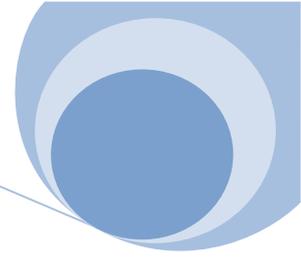
CONCLUSION

CONCLUSION

Notre étude avait pour objet la valorisation des sciures de bambou pour la fabrication des briquettes de charbon combustibles en utilisant l'espèce *Dendrocalamus Giganteus*.

A l'issue des résultats des tests physico-énergétiques, les valeurs obtenues pour l'humidité, les cendres, les matières volatiles et le carbone fixe étaient respectivement, 6,8%, 6,01%, 14,89% et 79,09%, on peut conclure que les briquettes de charbon issues des sciures de bambou sont de bonnes qualités (moins cendreuses avec forte pouvoir calorifique PCI : 7519,2 Kcal/kg), avec en général un temps de consommation plus long et un dégagement de fumées faibles que le charbon du bois. En plus, que l'espèce *Dendrocalamus Giganteus* est susceptible de devenir une alternative à la production de charbon en briquette, principalement pour un usage commercial domestique et industriel car ces briquettes sont compatibles avec les « fatapera » habituellement utilisés dans les ménages.

L'utilisation de la sciure de bambou pour la production de briquette de charbon combustible est avantageuse pour sa disponibilité et son faible coût. Cette valorisation participera à l'atténuation des pressions faites aux ressources forestières.



BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- 1- JARIALA, 2006. Étude sur la consommation et la production en produits forestiers ligneux à Madagascar. USAID.
- 2- David Myers, Ramamonjisoa.B, Rajafindramanga .M, Burren .C, Neloni .C (Mars 2006) Etude sur la consommation et la production en produits forestiers ligneux à Madagascar.
- 3- Hargot B., Mahy A. (2009), Etude, réalisation et analyse de poutres lamellé-collé en bambou, Revue Scientifique des ISILF n° 23, ECAM – Bruxelles.
- 4- COSTA, L. P. E. et al. Qualidade das chapas de partículas aglomeradas fabricadas com resíduos do processamento mecânico da madeira de *Pinus elliottii* Engelm. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 15, n. 3, p. 311-322, 2005.
- 5- HIDALGO LOPEZ, O. Bamboo-The gift of the gods. Bogotá: O. H. Lopez, 2003. 553 p.
- 6- OSTAPIV, F. Análise e melhoria do processo produtivo de tábuas de bambu (*Phyllostachys pubescens*) com foco em pisos. 2007. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2007.
- 7- SILVA, R. M. C. O bambu no Brasil e no mundo. In: ENCONTRO DA ESCOLA DE AGRONOMIA E ENGENHARIA DE ALIMENTOS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS, 2006, 1., 2006, Goiânia. Anais... Goiânia: Universidade Federal de Goiás, 2006. 45 p.
- 8- KOEHLIN, J., GUILLAUMET, S., L. et MORAT, P., 1974 : Flore et végétation de Madagascar. Cramer, Vaduz. 658p.
- 9- WEICHIN, L., 1970 : La culture de bambous à Madagascar. Antananarivo, Imprimerie de la grande Ile, Madagascar, 26p.
- 10- COSTA, T. M. S. Estudo da viabilidade técnica do emprego do bambu da espécie *Bambusa vulgaris* Schard., como carvão vegetal. 2004. 62 p. Dissertação (Mestrado em Ciências na área de Tecnologia Nuclear – Materiais) - Instituto de Pesquisa Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- 11- MARINHO, N. P. et al. Análise química do bambu-gigante (*Dendrocalamus giganteus* Wall. ex Munro) em diferentes idades. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 22, n. 2, p. 413-418, abr./jun. 2012.

12- SILVA, R. M. C. O bambu no Brasil e no mundo. In: ENCONTRO DA ESCOLA DE AGRONOMIA E ENGENHARIA DE ALIMENTOS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS, 2006, 1., 2006, Goiânia. Anais. Goiânia: Universidade Federal de Goiás, 2006. 45 p.

13- ITOH, T. (1990), "Lignification of bamboo (*Phyllostachys heterocyla* Mitf) during its growth", *Holzforschung* 44: 191 – 200.

14- LATIF, M.A., ASHAARI, A. JAMALUDIN, K. et MOHD. ZIN J. (1993), "Effects of anatomical characteristics on the physical and mechanical properties of *Bambusa blumeana*", *Journal Tropical Forest Science* 6(2): 159-170.

15- SUZUKI, K. et ITOH, T. (2001), "The change in cell wall architecture during lignifications of bamboo, *Phyllostachys aurea*", *Trees-Structure and Function* 15 (3): 137 – 147.

16- AMINUDDIN, M., LATIF, M.A. (1991), "Bamboo in Malaysia: Past, present and future research", *Proceedings 4th International Bamboo Workshop, Bamboo in Asia and the Pacific*. Chiangmai, Thailand. November 27 – 30. Pp. 349-354.

17- NMBA. Processing bamboo shoots. Training manual. New Delhi, India. 2004. 27 p.: il.

OLIVEIRA, A.C.A. Efeitos do bambu *Guadua weberbaueri* Pilger sobre a fisionomia e estrutura de uma floresta no Sudoeste da Amazônia. 2000. 71 p. Dissertação de mestrado. INPA/UA, Manaus. 2000.

18- Xiaobo L., 2004, "Physical, chemical and mechanical properties of bamboo and its utilization potential for fiberboard manufacturing", *Memoire de fin d'etude*, Baton Rouge, Louisiana State University - School of Renewable Natural Resources, 76p.

19- RAJAONALISON Fanjamalala «CHARACTERISATION DES PROPRIETES PHYSIQUES DES BAMBOUS DANS LA REGION ANTSINANANA» Cas de deux espèces *Dendrocalamus giganteus* et *Bambusa vulgaris constrictinoda* 2007 – 2012.

20- BERALDO, A.L.; AZZINI A *Bambu: Características e Aplicações*, Guaíba, Livraria Editora Agropecuária, 2004, p. 37-55.

21- Hargot B., 2009, "Etude,realisation et analyse de poutres lamelle-colle en bambou", *Memoire de fin d'etude*, Bruxelles, ECAM, 37p.

- 22- Grosser D. & Liese W. (1971), On the anatomy of Asian bamboos, with special reference to their vascular bundles, *Wood Science and Technology* 5: 290-312.
- 23- Fonlupt S. AST OFF GCC (2008), *Le Bambou dans la construction*, Séminaire piloté par le département Génie Civil et Construction .
- 24- Liese W. (1987), Anatomy and properties of bamboo, Pp.196–208 in *Proceedings of the International Bamboo Workshop on Recent Research on Bamboo*, Hangzhou.
- 25- Ratovohery, E. 1993 *L'utilisation des Bambuseae dans la région du Parc National Ranomafana*. Université d'Antananarivo, Mémoire de fin d'études, Ecole Nationale Supérieure.
- 26- Munro W. (1868), A monograph of the Bambusaceae, *Trans. Linn. Soc. London* 26: 1–157.
- 27- GHOMARI F, « SCIENCE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION » Université aboubekr belkaid.
101 Faculté des sciences de l'ingénieur Département de génie civil.
- 28- Eugène Dejonc, *Précis illustré de mécanique - La mécanique pratique - Guide mécanicien*, J.Rotschild Éditeur, troisième édition 1894, p63-64.
- 29- Jacques Corbion – *Le savoir...fer : glossaire du haut fourneau – tome IV – 4e édition – 11/2003 – édité par l'association Le savoir faire (ISBN 2-9520787-0-X)*, p240.
- 30- A. Ledebur (traduit de l'allemand par Barbary de Langlade revu et annoté par F.Valton) - *Manuel théorique et pratique de la métallurgie du fer – Tome 1 - Librairie polytechnique Baudry et Cie, éditeur - 1895*, p71.
- 31- M.L. Grüner : *Traité de métallurgie, tome premier, agent et appareils métallurgiques, principe de la combustion*. 1875, Dunod Editeur, pages 131- 162 Charbon de bois.
- 32- LEQUEUX, P., CARRE, J., HEBERT, J., LACROSSE, L. et SCHENKEL, Y., 1991, *Energie et Biomasse : La densification*, Presse Agronomique de Gembloux, France. KALIYAN, N. and MOREY, R.V., 2009, Factors affecting strength and durability of densified products, *Biomass and Bioenergy*, 33, pp 337-359.

33- CATTANEO, D., 2003, Le briquetage: une technique à redécouvrir, Bois énergie n°2, pp 43-45.

34- BHATTACHARYA, S.C., AUGUSTUS LEON, M. and MIZANUR RAHMAN, Md., 2002, A study on improved biomass briquetting, Energy for sustainable development, 6 n°2, pp 67-71.

35- Bois international, 2008, Plaquettes et granulés de bois pour le chauffage domestique et le petit collectif, Cahier du bois énergie n° 37, Biomasse Normandie, pp 45- 56.

34- AFNOR, 1985. Norme NF B51-004. Bois – détermination de l’humidité. 3 p.

35- AFNOR, 1985. Norme NF B51-005. Bois – détermination de la masse volumique. 5 p.

36- AFNOR, 2005. Norme NF EN 1860-2. Appareils, combustibles solides et allume-barbecue pour la cuisson au barbecue. Partie 2 : Charbon de bois et briquettes de charbon de bois pour barbecue –Exigences et méthodes d’essai. 25 p.

37- ADEME, Critt Bois, Fibois, & CTBA. (2001). Mesure des caractéristiques des combustibles bois.

38- Technique de l’ingénieur p.A2150-13 sur les caractéristiques générales du coke métallurgique de haute température.

39- Phonphuak, N., & Thiansem, S. (2011). Using charcoal to increase properties and durability of fired test briquettes. Department of Physics and Materials Science, Faculty of Science, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand, 612-618.

40- Njenga, M., Karanja, N., Prain, G., Malii, J., Munyao, P., Gathuru, K., et al. (2009). Community-based energy Briquette production from urban organic waste at Kahawa Soweto. Informal settlement, Nairobi. ISSN 1811-1440, Urban Harvest.

41- The Water Boiling Tests Version 4.1.2, 2009, Cookstoves Emissions and Efficiency in a controlled laboratory settings.

42- RAKOTOMANANA Niandry Maminirina “CONTRIBUTION À LA L’ÉTUDE ET À LA VALORISATION DE L’ESPECE DU BAMBOO “DENDROCALAMUS GIGANTEUS” OU “VOLOBE MAVO” ET DE L’ESPECE “DENDROCALAMUS ASPER” OU “VOLOBE AMBANIVAHITRA” Mémoire de fin d’études en vue de l’obtention du diplôme d’Etudes Approfondies en Sciences des Matériaux et Métallurgie (DEA) – 2013

ANNEXES

Annexe I : Principe de la carbonisation

Les biomasses végétales sont formées de trois constituants principaux : cellulose, lignine et l'eau. La cellulose et la lignine, plus certaines autres substances, sont fortement liées entre elles pour constituer la matière. L'eau contenue dans la matière doit être éliminée sous forme de vapeur avant que la carbonisation puisse avoir lieu. La première étape de la carbonisation est le séchage du bois à 100°C au moins jusqu'à l'état anhydre. La température du bois sec est ensuite élevée jusqu'à environ 280°C. L'énergie nécessaire pour ces deux étapes provient de la combustion d'une partie du bois empilé dans la charbonnière ou le four ; c'est une réaction endothermique, c'est-à-dire absorbant de l'énergie. Lorsque la matière est sèche, elle est portée à 280°C environ à l'absence de l'air. Il commence à se décomposer spontanément pour donner du charbon, plus de la vapeur d'eau, du méthanol, de l'acide acétique et d'autres composés chimique plus complexe, principalement sous forme de goudrons et de gaz non condensables formés surtout dihydrogène, monoxyde de carbone et dioxyde de carbone. La décomposition spontanée ou carbonisation de la matière au-dessus de 280°C libère de l'énergie, et cette réaction est dite exothermique. Ce processus est poursuivi jusqu'à ce qu'il ne reste plus que le résidu carbonisé, qui est du charbon. Pour le charbon de bois, ils contiennent encore des quantités appréciables de résidus goudronneux, ainsi que les cendres contenues au départ dans le bois. La teneur en cendres du charbon de bois est d'environ 3 à 5 % en poids ; la proportion de résidus goudronneux peut être d'environ 30% en poids, le reste étant constitué de carbone pur, soit 65 à 70 %. Si l'on continue à chauffer, la teneur en carbone pur augmente du fait de l'élimination et de la décomposition d'une plus grande proportion de goudrons. Une température de 500°C donne une teneur normale en carbone pur d'environ 85%, et une teneur en éléments volatiles de 10%. Le rendement en charbon de bois à cette température est d'environ 33% du bois anhydre carbonisé. Le rendement théorique en charbon de bois varie par conséquent avec la température de carbonisation en raison de la modification de sa teneur en substances goudronneuses volatiles.

Annexe II : Soude ou hydroxyde de sodium

Apparence : solide de formes variables, blanc, déliquescent, inodore

Propriétés chimiques

Formule brute : NaOH

Masse molaire : 39,9971+ ou – 0.0004g/mol

Pourcentage en H : 2,51% ; Na : 57,48% et O : 40%

pKa : base forte

Propriétés physiques

Température de fusion : 318°C

Température d'ébullition : 1 390°C

Solubilité dans l'eau à 20°C : 1,090g/l

Masse volumique : 2,1g/cm³

Pression de vapeur saturante

. 0.13kPa à 739°C

. 2,67kPa à 953°C

. 13,3kPa à 1 111°C

. 23,3kPa à 1 286°C

TABLE DE MATIERE

Pages

REMERCIEMENTS

SOMMAIRE

TABLE DES ILLUSTRATIONS

TABLES DES ANNEXES

SIGLES ET ABREVIATIONS

INTRODUCTION 1

CHAPITRE I: MATERIELS

I-1 LE BAMBOU 3

I-1-1 Définition et généralité 3

I-1- 2 Morphologie du bambou..... 4

I-1-3 Caractéristiques techniques et anatomique des tiges de bambou.. 7

I-1-3-1 Propriétés chimiques 7

I-1-3-2 Propriétés physiques et mécaniques..... 7

I-1-3-3 Anatomie du bambou 8

I-1-4 Utilisation du bambou..... 10

I-1-5 Présentation de l'espèce étudiée 11

I-2 Les matériels utilisés pour la calcination et la densification
des sciures de bambou 12

I-2-1 Liant 12

I-2-2 Méthodes de production du charbon..... 13

I-2-3 Les types de presse pour les briquettes combustibles..... 16

I-2-3-1 Presses à piston 17

I-2-3-2 Presses à Vis..... 17

I-2-3-3 Presses à granuler..... 17

CHAPITRE II: METHODOLOGIE

II-1 Descente sur terrain 19

II-2 Analyse au laboratoire 19

II-2-1 Les propriétés physiques des sciures de bambou utilisées 20

II-2-2 Caractérisation énergétique 23

<u>II-3 Production de brique</u>	25
<u>II-3-1 Brique de charbon de bambou</u>	25
<u>II-3-1-1 Procédé de fabrication de la brique de charbon</u>	26
<u>II-3-1-2 Autres : Procédé de valorisation des résidus de bambou</u> <u>charbon de bambou</u>	32
<u>II-3-2 Brique de sciures de bambou</u>	33
<u>II-3-3 Caractérisation des briques combustibles</u>	34
<u>II-3-3-1 Pouvoir calorifique</u>	34
<u>II-3-3-2 Taux d'humidité</u>	35
<u>II-3-3-3 Taux de matière volatile</u>	35
<u>II-3-3-4 Taux de cendre</u>	35
<u>II-3-3-5 Taux de carbone fixe</u>	36
<u>II-3-4 Test de combustion</u>	37
 CHAPITRE III: RESULTATS ET DISCUSSIONS	
<u>III-1 Les analyses aux laboratoires</u>	38
<u>III-1-1 Les propriétés physiques des sciures de bambou</u>	38
<u>III-1-2 Caractérisation énergétique</u>	40
<u>III-2 Tests physico-chimiques des briques combustibles</u>	43
<u>II-2-1 Humidité</u>	43
<u>II-2-2 Taux de matières volatiles, taux de cendres et taux de</u> <u>carbone fixe</u>	45
<u>II-2-3 Pouvoir calorifique</u>	47
<u>III-3 Tests de combustion</u>	48
<u>CONCLUSION</u>	50
 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	
 ANNEXES	

Titre du mémoire : « VALORISATION DES SCIURES DU BAMBOU EN BRIQUETTE DE CHARBON COMBUSTIBLE »

Nombre de page : 55

Nombre de tableaux : 14

Nombre de figure : 14

Nombre de photo : 14

RESUME :

Cette étude avait l'objectif d'étudier les caractéristiques physiques et énergétiques des sciures de bambou pour la fabrication des briquettes de charbon combustibles. La production des charbons en briquettes ont été réalisées à partir de la sciure de bambou obtenus à l'usinage de Tongarivo Bevalala. La sciure de bambou utilisée comme matière première principale est séché à l'air libre puis carbonisé dans un four à dôme artisanale et mélangé avec des liants à base de féculé de manioc. Le mélange est compressé dans une presse hydraulique pour obtenir de briquette de charbon combustible de type cylindrique avec un volume de 47 cm³. Des analyses physico-énergétiques ainsi que des tests de combustion ont été réalisés pour connaître les qualités des briquettes. Ces analyses et tests nous ont permis d'apprécier le taux d'humidité, le taux de cendre, la matière volatile, le pouvoir calorifique, le carbone fixe. En comparaison avec le charbon du bois, les briquettes de charbon de bambou ont un Pouvoir Calorifique supérieur à celui du charbon du bois (7519 contre 7402kcal/kg). En plus, leur temps de consommation est plus long que celui du charbon et dégagent peu de fumées. Étant une alternative de remplacement au charbon du bois combustible domestique, il est possible de produire les briquettes de charbon de *Dendrocalamus giganteus* à l'échelle industrielle.

Mots-clés : Bambou, briquette, charbon, combustible, sciure

ABSTRACT:

This study had the objective to study the physical and energy characteristics of bamboo sawdust to manufacture fuels coal briquettes. Briquetting of coal production were made from bamboo sawdust obtained machining Tongarivo Bevalala. Bamboo sawdust used as the main raw material is dried in the open air and then carbonized in an artisanal dome oven and mixed with cassava starch binders. The mixture is compressed in a hydraulic press to obtain fuel coal briquette of the cylindrical type with a volume of 47 cm³. Physical and energy analyzes and combustion tests were carried out to know the qualities of briquettes. These analyzes and tests have allowed us to enjoy the humidity, ash rate, volatile matter, calorific value, fixed carbon. Compared with coal wood, bamboo charcoal briquettes have a Calorific Value greater than that of coal Wood (7519 against 7402kcal / kg). In addition, consumption of time is longer than that of coal and low smoke. Being a replacement alternative to coal of domestic fuel timber, it is possible to produce coal briquettes *Dendrocalamus giganteus* on an industrial scale.

Keywords: Bamboo, briquette, coal, fuel, sawdust

Auteur : RANDRIAMBELOSON Ombana Tsiresy

Adresse : Lot AB 03 bis Ambovokely Ikianja Ambohimangakely

Mail : ankoay.mientana@gmail.com

Tel : +261 33 258 7333

Encadreur : Monsieur RAKOTOMANANA Niandry Maminirina

Monsieur RAZAFINJATOVO Charles

