



ÉCOLE SUPÉRIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES

DÉPARTEMENT EAUX ET FORÊTS

Promotion « AINA »

2004-2008

_

**MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME
D'INGÉNIEUR AGRONOME
– Option EAUX ET FORÊTS –**

VALORISATION ÉNERGÉTIQUE DES RÉSIDUS DE L'INDUSTRIE MÉCANIQUE DU BOIS A TRAVERS LA DENSIFICATION

Soutenu par Herimanitra Patrick RAFIDIMANANTSOA

Le 10 Novembre 2009

Devant le Jury composé de :

Président : Professeur Jean Chrysostôme RANDRIAMBOAVONJY

Tuteur : Docteur Tahiana RAMANANANTOANDRO

Examineurs : Monsieur Gilles QUETARD

: Monsieur Mamitiana RAMAMONJISOA



ÉCOLE SUPÉRIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES

DÉPARTEMENT DES EAUX ET FORÊTS

Promotion « AINA »

2004-2009

_

**MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME
D'INGÉNIEUR AGRONOME
– Option EAUX ET FORÊTS –**

VALORISATION ÉNERGÉTIQUE DES RÉSIDUS DE L'INDUSTRIE MÉCANIQUE DU BOIS A TRAVERS LA DENSIFICATION

Soutenu par Herimanitra Patrick RAFIDIMANANTSOA

Le 10 Novembre 2009

Devant le Jury composé de :

Président : Professeur Jean Chrysostôme RANDRIAMBOAVONJY

Tuteur : Docteur Tahiana RAMANANANTOANDRO

Examineurs : Monsieur Gilles QUETARD

: Monsieur Mamitiana RAMAMONJISOA

REMERCIEMENTS

Gloire avant tout à **Dieu Père Fils Saint Esprit**, sans Qui rien n'est accompli. Je Lui suis infiniment reconnaissant pour le courage, la volonté et la persévérance dont Il m'a doté et qui m'ont permis de mener à bien et à terme cette étude. Il m'a soutenu dans les moments difficiles et je Lui dois tout.

Mes remerciements s'adressent aussi à **Monsieur Jean Chrysostôme RANDRIAMBOAVONJY**, Professeur d'enseignement supérieur et de recherche à l'École Supérieure des Sciences Agronomiques, pour m'avoir fait l'honneur de présider cette défense.

J'exprime toute ma gratitude à **Madame Tahiana RAMANANANTOANDRO**, Maître de conférences à l'École Supérieure des Sciences Agronomiques, qui n'a pas ménagé son temps et ses moyens pour les éclaircissements en se donnant à fond pour l'encadrement de ce travail.

Je ne pourrai manquer de remercier **Monsieur Gilles QUETARD**, Directeur d'usine S. Prix Meubles qui a bien voulu accepter d'évaluer ce travail et pour avoir accepté que j'accède à l'entreprise.

Je remercie sincèrement **Monsieur Mamitiana RAMAMONJISOA**, Responsable du projet SEESO au sein du CNRIT, pour avoir accepté d'examiner ce travail et pour sa gentillesse en mettant à ma disposition les moyens nécessaires au bon déroulement des travaux préliminaires. Qu'il trouve ici toute ma reconnaissance.

Par ailleurs, sans les aides et la collaboration de nombreuses personnes, ce travail n'aurait pu être réalisé. Aussi, ai-je l'honneur d'adresser mes vifs remerciements et reconnaissance à :

- Docteur Florent EYMA, Maître de Conférences à l'UT Génie Mécanique et Productique de Tarbes pour ses aides dans les mesures des caractéristiques des combustibles (PCS, PCI, masse volumique et humidité, teneur en cendres,...)
- Anicet Marely pour son aide dans la fabrication des briquettes,
- Dada Solo pour son appui dans la détermination des compositions,
- Monsieur Justin RASOANAIVO du bloc technique de l'ESPA pour son assistance dans les tests de compression et d'abrasion,

- Monsieur Tiana et Monsieur Victor de l'usine S. Prix Meubles pour la collecte des échantillons et l'accueil chaleureux,
- Monsieur Mamisoa RAZAFIMANANTSOA pour sa contribution dans les tests d'ébullition d'eau,

Je ne saurais terminer, sans pour autant remercier :

- L'ESSA, le Département Eaux et Forêts, le Laboratoire de Recherches Appliquées
- Le personnel du Bloc Technique de l'ESPA,
- Monsieur le Directeur Administratif et Financier, Monsieur Barthel RAJAOMAHANDRY et le responsable dépositaire du Ministère de l'Énergie,
- Le Centre National de Recherches Industrielle et Technologique,
- Le Centre National de Recherches Environnementales,
- Mes parents, mon frère, ma sœur, ma grand- mère, mes amis,
- Sarobidy RAKOTONARIVO

Je présente toutes mes excuses à tous ceux qui, d'une façon ou d'une autre, m'ont apporté une quelconque assistance et que je n'ai pu citer.

Herimanitra Patrick RAFIDIMANANTSOA

Résumé

Quelques 42 tonnes de copeaux, 25 tonnes de sciures et 16 tonnes de poussière de ponçage sont produits annuellement au sein de l'usine S. Prix Meubles Ambohitratrimo. Dans l'optique d'une valorisation de ces sous-produits, la densification a été choisie. La densification est une opération par laquelle des matières à l'état particulaire sont assemblées mécaniquement et/ou chimiquement pour donner un combustible appelé « briquette ». Le procédé utilisé dans cette étude consiste en un mélange des trois sous-produits précédents avec la fécula de manioc comme liant. L'ensemble est ensuite compacté via une presse manuelle. L'objectif global de l'étude est de caractériser les produits densifiés obtenus avec un tel procédé en ne portant aucune modification aux matières premières et en utilisant les équipements de densification à disposition. En tant que mélange, les différents composants se trouvent dans des proportions définies. S'insère alors la notion de « composition ». La composition de départ était une composition caractérisée par une proportion élevée en sciures. Cette composition a été remaniée afin d'être en accord avec la disponibilité en résidus au sein de l'usine. Des briquettes de 50 mm × 140 mm (diamètre × longueur) ont ensuite été fabriquées conformément aux compositions retenues et compactées à 0.8 MPa. Les briquettes produites ont été caractérisées : densité et masse volumique en vrac, solidité et durabilité, qualités chimiques de combustibles (PCI, cendres, C fixe,...) et tests d'ébullition d'eau. Par ailleurs, une estimation sommaire du coût de production de la tonne de briquettes a été effectuée. La densité de briquettes varie selon la composition utilisée de même que leur masse volumique en vrac. Les briquettes résistent bien aux chocs et constituent également un combustible intéressant. Les valeurs des quelques paramètres caractéristiques ne sont pas éloignées des prescriptions européennes pour des briquettes à usage domestique de haute qualité. Bien que les caractéristiques des briquettes et du bois soient en général voisines, les tests d'ébullition d'eau ont montré une meilleure performance des briquettes. Elles peuvent de ce fait en constituer un bon substitut. De plus, il a été approximé que 1 kg de briquette serait équivalent à 1.4 kg de bois. Néanmoins, le coût élevé de la tonne de briquettes ne permettrait pas aux briquettes de concurrencer actuellement le bois d'Eucalyptus quand bien même elles sont performantes. 94 % de ces coûts sont imputables à l'achat de la fécula. La recherche de liants moins onéreux serait alors impérative dans une optique de compétitivité.

Mots clés : Copeaux, sciures, poussière, densification, briquettes, composition, combustible.

Abstract

About 42 tons of woodchips, 29 tons of sawdust and 15 tons of wood sand were produced annually at S. Prix Meubles wood processing plant in Ambohidratrimo. In order to use these huge quantities of by-products, densification was chosen. Densification is a process by which loose particles are compressed together with mechanical action to form a compact product called briquette. The densification process used in this study consists in a mixture of the above residues with starch as binding agent. Then compaction is done with a manually operated press. The overall objective of this study was to determine briquettes characteristics made from the existing raw materials used in their raw state and the available densification equipment following the above densification process. As a mixture, the different components are in defined proportions according to a parameter called “composition”. The starting composition required high amount of sawdust. So, it was restructured to be suitable with available by-products quantities. Briquettes of 50 mm × 140 mm (diameter × length) were manufactured according to the valid compositions and were compacted at 0.8 MPa. Characteristics of briquettes as densified product (density, bulk density, strength and durability) and as a fuel (NCV, water content, ash content...) were determined. In addition, water boiling tests were carried out in order to compare wood and briquettes performances. Results showed that briquettes can withstand handling, transport and storage stresses. With regard to their characteristics as a fuel, it was found that some usual parameters are near the guiding values of European standards for high quality wood briquettes. Briquettes and wood characteristics are approximately in the same range. However, water boiling tests demonstrated that briquettes performances are significantly greater than wood performances. Therefore, they can constitute a good substitute to woodfuel. Also, it was calculated that 1 kg of briquettes might equal to 1.4 kg of wood. The production cost of one ton of briquettes fetched 1 140 000 Ariary. 94 % of these costs are due to starch purchase. With 100 Ariary per kilo for the wood price, it is obvious that briquette can't compete with it. So, further studies must be done to find a cheaper binding agent.

Keywords: Woodchips, sawdust, wood sand, densification, briquette, composition, fuel.

Liste des acronymes et des abréviations

Ar	: Ariary, unité de la monnaie locale
ASTM	: American Society for Testing Materials
CEN	: Comité Européen de Normalisation
CFC	: Composition à forte proportion en copeaux
CFS	: Composition à forte proportion en sciure
CNRICT	: Centre National de Recherches Industrielle et Technologique
D	: Densité
D _T	: Durée de maintien de la pression ou « Dwell time »
Ec.Type	: Ecart type
ESPA	: École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo
G	: Granulométrie
G _i	: Fraction granulométrique retenue par le tamis T _i
H	: Humidité
H	: Hauteur
IUT	: Institut Universitaire Technologique
kJ	: kiloJoule = 10 ³ Joules
kN	: kiloNewton = 10 ³ Newton
L	: Longueur
l	: Largeur
LUACOB	: Laboratoire universitaire d'analyse de combustible biomasse
L _w	: Perte de masse après tumbling test
MA	: Masse anhydre
MG _i	: Masse de la fraction retenue par le tamis T _i
M _i	: Masse d'eau initiale
min	: minutes
MJ	: Méga Joules, unité d'énergie
MPa	: Méga Pascal, unité de pression

M_r	: Masse de l'eau restante
MT	: Masse totale
MV	: Masse volumique
P	: Perte
Pal CFC	: Briquette de palissandre privilégiant les copeaux dans la composition
Pal CFS	: Briquette de palissandre privilégiant la sciure dans la composition
PCI	: Pouvoir calorifique inférieur
PCS	: Pouvoir calorifique supérieur
Pin CFC	: Briquette de pin privilégiant les copeaux dans la composition
Pin CFS	: Briquette de pin privilégiant la sciure dans la composition
Q_3	: 3è quartile
R	: Reste
sd	: Standard deviation ou écart type
SEESO	: Synergie Energie-Environnement dans le Sud Ouest
$T_{éb}$	: Température d'ébullition
T_i	: Température initiale de l'eau
T_T	: Durabilité par tumbling test
V	: Volume
V	: Vitesse de combustion

Note sur la bibliographie

Le type de référencement bibliographique utilisé dans le texte est la bibliographie alphanumérique. Pour certaines références, on peut rencontrer le renvoi du type [1-2] qui signifie que c'est [1] qui est le propriétaire des résultats mais il a été cité par [2]. En d'autres termes, c'est l'ouvrage ou l'article de [2] que nous avons consulté ; la référence de [1] a été citée dans les références bibliographiques pour faciliter sa recherche pour celui qui veut poursuivre dans le domaine concerné.

Liste des photos

Photo 1 - Briquettes de presse à piston.....	6
Photo 2 - Briquette de presse à vis	6
Photo 3 - Pellets.....	10
Photo 4 - Empois d'amidon	20
Photo 5 - Moule, piston et démouleur	20
Photo 6 - Moule et piston	20
Photo 7 - Presse de Ramamonjisoa	20
Photo 8 - Briquette de référence.....	22
Photo 9 - Presse du bloc technique ESPA	26
Photo 10 - Moule et piston	26
Photo 11 - Manomètre	27
Photo 12 - Presse à manomètre du bloc technique ESPA	27
Photo 13 - Presse utilisée pour le test de compression.....	30
Photo 14 - Briquettes installées pour le test d'abrasion	32
Photo 15 - Tour utilisée pour le test d'abrasion	32
Photo 16 - Cylindre muni d'une tôle de brassage	32
Photo 17 - Les briquettes CFS.....	41
Photo 18 - Les briquettes CFC	43

Liste des tableaux

Tableau 1 - Exigences technologiques par type de presse selon la littérature.....	5
Tableau 2 - Quelques travaux de recherche sur le briquetage trouvés dans la bibliographie.....	12
Tableau 3 - Données de base pour la détermination des quantités de sous-produits disponibles au sein de l'usine S. Prix Meubles.....	18
Tableau 4 - Composition de départ	21
Tableau 5 - Proposition de composition de départ (CFC)	24
Tableau 6 - Variantes de presse utilisable proposées par Ramamonjisoa	36
Tableau 7 - Résultats de la caractérisation des matières premières.....	38
Tableau 8 - Taille des copeaux du tamis T ₃ (mm).....	39
Tableau 9 - Quantités théoriques de briquettes pouvant être produites tous les deux jours	40
Tableau 10 - Quantités de sous produits générés (kg) par l'usine S. Prix Meubles	40
Tableau 11 – Les compositions à forte proportion en sciure retenues	41
Tableau 12 – Caractéristiques des briquettes CFS	42
Tableau 13 – Les différents essais CFC et les caractéristiques des produits obtenus	42
Tableau 14 – Caractéristiques des produits densifiés.....	45
Tableau 15 - Propriétés physiques des briquettes.....	47
Tableau 16 – Caractéristiques des combustibles	50
Tableau 17 – Résultats des tests d'ébullition d'eau.....	52
Tableau 18 – Résultats de l'estimation du coût de production de la tonne de briquette	53

Liste des Annexes

- Annexe 1 : Relevés des masses MG_i
- Annexe 2 : Statistiques descriptives de la taille des copeaux
- Annexe 3 : Calcul masse volumique en vrac des matières premières
- Annexe 4 : Longueurs et densités des briquettes CFS
- Annexe 5 : Déperdition de masse, longueurs et calcul de la densité des briquettes 50 mm × 150 mm
- Annexe 6 : Résultats bruts des tests de compression
- Annexe 7 : Résultats bruts des tests de résistance à l'impact
- Annexe 8 : Résultats bruts des tests de résistance à l'abrasion
- Annexe 9 : Calcul de l'énergie utile
- Annexe 10 : Coût de la tonne de briquettes par type de presse

Table des matières

1	INTRODUCTION	1
1.1	Contexte	1
1.2	Problématique, hypothèses et objectifs	2
2	ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	4
2.1	La densification de la biomasse.....	4
2.2	La densification sans liant.....	4
2.2.1	Les presses à piston	5
2.2.2	Les presses à vis.....	6
2.2.3	Les presses à granuler	7
2.2.4	Le préchauffage de la biomasse	7
2.3	La densification avec liant	8
2.3.1	Les liants	8
2.3.2	Les presses.....	8
2.4	Les produits de la densification.....	9
2.4.1	Les pellets	9
2.4.1.1	Présentation	9
2.4.1.2	Fabrication.....	10
2.4.2	Les briquettes	11
2.5	Les études sur le briquetage	11
2.6	Le briquetage à Madagascar	13
2.7	Les combustibles concurrents	13
3	MATÉRIELS ET MÉTHODES	15
3.1	Procuration des matières premières.....	15
3.2	Caractérisation des matières premières	15
3.2.1	Détermination de la teneur en eau	16
3.2.2	Détermination de la granulométrie	16
3.2.3	Détermination de la masse volumique en vrac.....	17
3.2.3.1	Méthode de détermination.....	17
3.2.3.2	Détermination des quantités de sous produits générés par l'usine	17
3.3	Procédé de briquetage	18
3.3.1	Travaux préliminaires	18
3.3.1.1	Objectifs.....	18

3.3.1.2	La composition d'une brique	19
3.3.1.3	Les étapes de fabrication d'une brique	19
3.3.1.4	La presse utilisée et les accessoires	20
3.3.1.5	Les compositions testées	21
3.3.1.6	Critères de choix de la composition finale	25
3.3.2	Fabrication de briques à taille réelle	25
3.3.2.1	La composition	25
3.3.2.2	Les étapes de fabrication	25
3.3.2.3	La presse utilisée et les accessoires	26
3.3.2.4	Détermination de la pression de compactage	27
3.4	Les briques : un produit densifié	27
3.4.1	Détermination de la masse volumique	28
3.4.2	Détermination de la masse volumique en vrac	28
3.4.3	Détermination des propriétés physiques des briques	28
3.4.3.1	Test de compression	29
3.4.3.2	Test de résistance à l'impact	30
3.4.3.3	La durabilité	31
3.5	Les briques : un combustible	32
3.5.1	Détermination de la teneur en eau	32
3.5.2	Détermination du pouvoir calorifique	32
3.5.3	Détermination de la teneur en cendres	33
3.5.4	Détermination de la teneur en matières volatiles et en carbone fixe	33
3.5.5	Tests d'ébullition d'eau	34
3.5.5.1	Principe	34
3.5.5.2	Matériels	34
3.5.5.3	Déroulement du test	35
3.6	Détermination du coût de production de la tonne de brique	35
4	RÉSULTATS et DISCUSSIONS	37
4.1	Caractérisation des matières premières	37
4.1.1	Humidité	37
4.1.2	Granulométrie	37
4.1.3	Masse volumique en vrac	39
4.2	Résultats des travaux préliminaires	40
4.2.1	Compositions à forte proportion en sciures (CFS)	40

4.2.2	Compositions à forte proportion en copeaux (CFC).....	42
4.2.2.1	Pour le pin.....	42
4.2.2.2	Pour le palissandre	43
4.2.2.3	Densités des produits CFC.....	43
4.2.2.4	Modification du total.....	43
4.3	La pression de compactage	44
4.4	Résultats des briquettes en tant que produit densifié.....	44
4.4.1	Masse volumique	44
4.4.2	Masse volumique en vrac.....	45
4.4.3	Propriétés physiques	45
4.4.3.1	Test de compression.....	46
4.4.3.2	Test de résistance à l'impact	46
4.4.3.3	Test de résistance à l'abrasion	47
4.5	Résultats des briquettes en tant que combustible	48
4.5.1	Humidité.....	48
4.5.2	Pouvoir calorifique inférieur	48
4.5.3	Teneur en cendres.....	49
4.5.4	Teneur en matières volatiles et en carbone fixe.....	49
4.6	Résultats des tests d'ébullition d'eau.....	50
4.6.1	Énergie utile.....	50
4.6.2	Le temps d'atteinte de l'ébullition	51
4.7	Résultats de l'estimation du coût de production de la tonne de briquettes	52
5	CONCLUSION	54
6	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	56

1 - Introduction

1 INTRODUCTION

1.1 Contexte

Les industries de la première et de la seconde transformation du bois génèrent des déchets en quantités plus ou moins grandes selon le volume de bois travaillés, l'importance des commandes, le rendement des machines utilisées, les défauts du bois. Ces déchets sont constitués de chutes de tronçonnage diverses, de sciures, de copeaux de toutes sortes et de poussière de ponçage. A l'exception des grosses chutes¹ et de la poussière, ces sous-produits sont en général repris pour servir de combustibles. Ainsi, les petites chutes sont utilisées en général par les propriétaires eux-mêmes ou données aux employés. Les copeaux et les sciures sont vendus à raison de 100 à 300 Ariary le sac² ou cédés gratuitement à des personnes ne pouvant se payer le charbon. Certains utilisent uniquement les copeaux dans leur activité professionnelle à savoir les briquetiers, les biscuiteries artisanales et les éleveurs de volailles. Pour les usines, le fait que ces sous produits aient des preneurs les arrange, leur évitant ainsi d'investir dans leur évacuation. Néanmoins, pour celles qui génèrent des quantités assez importantes, tel est le cas de l'usine S. Prix meubles, une ébénisterie sise à Ambohidratrimo, trouver des utilisations ou des valorisations plus rentables de ces sous-produits serait intéressant.

Les sciures et les copeaux peuvent être utilisés directement comme combustibles ou après transformation. Le premier aspect ne sera pas traité dans cette étude. Les deux voies de valorisation, avec transformation, de la sciure et des copeaux les plus utilisées sont la fabrication de panneaux de particules et la densification à des fins énergétiques. La première n'a pas été retenue du fait de l'inexistence de broyeur et de presse à haute pression nécessaires pour l'étude. Aussi, la deuxième possibilité de valorisation a-t-elle été considérée en se basant sur les travaux de Ramamonjisoa, un expert en agglomération de combustibles et chercheur au Centre National de Recherches Industrielle et Technologique Fiadanana. Certes, les copeaux et les sciures peuvent être utilisés directement comme combustible sans les densifier, toutefois, la densification pallie au problème de la difficulté de manipulation, de stockage et de transport des ces sous-produits limitant leur utilisation à de petites quantités. La densification, connue également sous le terme de briquetage, est un procédé par lequel des matières à l'état particulaire sont comprimées, grâce à une presse, pour former des produits compacts appelés briquettes ou bûchettes densifiées, avec ou sans utilisation de liant [1]. Cette définition est assez restrictive puisque la densification donne également lieu à des pellets ou des granulés qui sont des briquettes de diamètre inférieur à 3 cm [2]. En général, ces bûchettes sont utilisées comme combustibles en substitution du bois de feu ou du charbon de bois³ dans les pays en

¹ Utilisées comme bois de coffrage ou d'échafaudage.

² Peu importe la taille du sac.

³ Après carbonisation préalable des sous produits ou carbonisation des briquettes produites

développement et pour le chauffage des locaux dans les pays développés. En outre, la densification a aussi été utilisée dans la fabrication d'aliments pour bétail et de poudres pharmaceutiques [3-8]. A Madagascar, cette technique n'est pas encore bien connue du public.

Les presses utilisées dans les pays nantis sont de fortes capacités et sont caractérisées par des exigences technologiques qui leur sont propres vis-à-vis de la granulométrie et de l'humidité de la matière, ce qui suppose un investissement en broyeur et en séchoir. Par contre, pour cette étude, l'idée est d'utiliser les matières premières constituées de copeaux, de sciure et poussière de ponçage telles qu'elles sont produites dans l'usine. Le procédé consiste à densifier un mélange de ces trois assortiments dans des proportions définies, que nous nous sommes convenus d'appeler une « composition », avec la fécule de manioc comme liant. L'ensemble est compacté à l'aide d'une presse manuelle. Une étude récente conclut qu'une presse importée d'Europe coûterait dans les 14 000 Euros⁴ à l'arrivée au port de Toamasina [4]. Il ne faut pas aussi oublier que les pièces détachées doivent être importées. Aussi, dans un souci de minimisation des coûts et compte tenu de la cherté actuelle de l'électricité, la presse utilisée et recommandée sera de confection locale et manuelle.

Etant donné que les matières premières utilisées n'ont pas été préalablement carbonisées, les briquettes produites dans cette étude seront alors destinées à constituer un combustible de substitution du bois de feu de par leur nature même. Toutefois, devant la diversité des utilisateurs de ce dernier, il faudrait mener des enquêtes pour déterminer leurs exigences respectives en termes de dimensions mais aussi de qualité de combustible recherchée. La présente étude ne constitue en effet qu'un préalable pour déterminer s'il y a un intérêt de valoriser les copeaux et les sciures à travers le procédé de densification précédemment évoqué. Si oui, les résultats seront à adapter avec les exigences de l'utilisateur ciblé. N'ayant alors défini aucun utilisateur, nous avons choisi de produire des briquettes cylindriques de 50 mm × 150 mm (diamètre × longueur). Ces dimensions ont été fixées pour faciliter leur manipulation et conformément aux normes dimensionnelles prescrites par le Comité Européen de Normalisation [5] d'une part et Lequeux *et al.* [6] pour les foyers fermés et les foyers ouverts d'autre part.

1.2 Problématique, hypothèses et objectifs

La question est de savoir si les briquettes pourraient constituer un substitut intéressant, ne serait-ce que partiel, du bois, leur concurrent premier. La réponse se trouve, pour une grande part, dans les tests de combustion qui permettent de comparer les performances des deux combustibles. Toutefois, comme il s'agit d'une agglomération, il importe que les briquettes restent intactes durant leur manipulation et leur transport. L'objectif général de l'étude est de caractériser le produit obtenu

⁴ Environ 33 600 000 Ariary soit 168 000 000 FMG.

conformément au procédé de densification initié par Ramamonjisoa, à partir des matières premières utilisées sans transformation et des équipements de densification existants et utilisables. Les caractérisations porteront sur l'aspect densification d'une part, et l'aspect combustible d'autre part. Le premier aspect concerne les propriétés physiques des briquettes (solidité et durabilité). Le second aspect présente les caractéristiques du combustible et ses performances par rapport au bois.

Trois hypothèses ont alors été avancées pour diriger ce travail. La première postule que « le procédé⁵ de densification utilisé permet d'obtenir des briquettes solides c'est-à-dire qui ne se désintègrent pas au cours de leur manipulation, de leur entreposage et de leur transport ». La deuxième stipule que « les briquettes sont aussi performantes que le bois en termes de combustion ». Si ce n'est pas le cas, il faudrait penser à d'autres voies de valorisation ou essayer d'améliorer le système. La dernière hypothèse est que pour les deux premières exigences, « les briquettes coûtent moins cher que le bois ». En effet, le critère prix reste un critère décisif pour l'utilisateur.

La présente étude comportera donc trois objectifs : (i) déterminer un ensemble de paramètres qui permettraient de produire des briquettes de bonnes qualités physiques. Bien qu'ils puissent exister divers paramètres à évaluer, en raison de la simplicité du procédé préconisé dans cette étude, on retiendra uniquement la composition et la pression à appliquer, (ii) évaluer les performances des briquettes en tant que combustible et (iii) estimer le montant des investissements à entreprendre afin d'en proposer un prix.

⁵ Le terme « procédé » doit ici se comprendre comme étant la manière de fabriquer les briquettes.

2- Etude Bibliographique

2 ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Cette étude bibliographique a pour objectif de donner un aperçu des procédés de briquetage de résidus ligneux et de ressortir les particularités de l'étude.

2.1 La densification de la biomasse

Très simplement, la densification peut être considérée comme étant une opération assurant le passage d'une matière de l'état particulaire à l'état consolidé à travers une presse à l'aide ou non d'un agent liant. Elle s'adresse de ce fait à des matières à l'état particulaire de nature (sciure et copeaux de bois, balles de riz, etc.) ou résultant d'un broyage préalable en vue de leur valorisation énergétique (résidus agro-industriels et plantes herbacées). Les principales ressources de matières ligno-cellulosiques densifiables sont : l'exploitation forestière (écorce, sciure), la transformation mécanique du bois (copeaux de toutes sortes, sciure, chutes diverses), l'agriculture (balles de riz, paille de blé, etc.) et les agro-industries (parche de café, fibres de coco et de palmes), les formations herbacées (herbes de savanes (*Hypparhenia*), *Lantana camara*, etc.) [6], [7]. En somme, il s'agit d'une valorisation de déchets ou de résidus. Les produits issus de la densification sont de deux types, classés selon leur diamètre : les pellets ou granulés et les briquettes.

Dans tout procédé de briquetage, un liant est nécessaire pour assurer la liaison entre les particules. Il peut s'agir d'un produit ajouté au processus ou inhérent à la matière mais libéré au cours du processus. Deux mécanismes se distinguent alors : la densification sans liant et la densification avec liant. Ils diffèrent par le niveau de pression utilisé, les presses et les caractéristiques des produits obtenus.

2.2 La densification sans liant

La densification sans liant se caractérise par l'utilisation de pression de compactage élevée c'est-à-dire supérieure à 100 MPa selon Eriksson et Prior [2]. En effet, cette pression élevée provoque une augmentation de chaleur due à la friction de la matière avec les parois du cylindre (moule) et favorise l'emboîtement mécanique des particules. De plus, elle libère la lignine [8], un polymère thermoplastique qui, à des températures supérieures à 100 ° C se fluidifie et agit comme un liant in situ [9]. Cette fluidification de la lignine et son refroidissement ultérieur, alors que le matériau est encore sous pression, est le facteur clé en briquetage à haute pression [9]. Générer des pressions de l'ordre de 120 – 150 MPa nécessite une presse spécifique. Aussi distingue-t-on généralement les presses à piston, les presses à vis et les presses à granuler. Elles diffèrent fondamentalement par leur principe de fonctionnement, leurs exigences technologiques vis-à-vis de la matière (cf. Tableau 1) 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. En laboratoire, il est coutume d'utiliser les presses à piston. Les presses à haute pression sont généralement munies d'un moteur.

Tableau 1 - Exigences technologiques par type de presse selon la littérature

	À piston hydraulique	À volant d'inertie	A vis et tête de poussée	A vis et manteau chauffant	Presse à granuler
G (mm)	< 30 [10]	10 – 15 [6]	6 – 10 [6]	6 – 10 [6]	0.6 – 0.8 [20-8]
H (% w.b.)	< 14 [10]	15 – 20 [6] 12 [10]	10 [6] 8 – 9 [10]	12 – 14 [6] 8 – 9 [10]	8– 12 [18]
Capacité (kg/h)	1800 ⁶ [10]	700 ⁷ [10]	2800 – 3600 [10]	2800 – 3600 [10]	-

L'humidité minimum admissible n'est pas bien définie mais les matières trop sèches (2-3%) ne donnent pas de bons produits.

En densification sans liant, la granulométrie et l'humidité sont deux paramètres importants. 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 [9] 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 brique dans une presse à vis [9] ou l'éclatement de la brique, voire du moule, dans une presse à piston [6].

2.2.1 Les presses à piston

Un piston équipé d'une tête de poussée et animé d'un mouvement de va-et-vient compacte la matière dans un cylindre prolongé par un canal de refroidissement. Ce dernier, dont la longueur peut

⁶ Pour une puissance de 37 kW.

⁷ Pour une puissance de 25 kW.

atteindre 5 à 10 m, 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 [6]. 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 (cf. Photo 1). Pour en savoir davantage, il est conseillé de lire Eriksson et Prior [2] et Lequeux *et al.*[6].



Photo 1 - Briquettes de presse à piston

Source : www.pelletclub.org

2.2.2 Les 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 les 200°C) dans le système qui aide le réchauffement de la biomasse [10]. 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 (cf. Photo 2). Pour plus de détails sur les presses à vis, il faut consulter Grover et Mishra [9] ainsi que Bhattacharya *et al.*[11].



Photo 2 - Briquette de presse à vis

Source : Cattaneo, Bois énergie n°2 [10]

2.2.3 Les 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 [8]. 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 [6]. 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 [12-8], 200 MPa [6] et provoquent une élévation de température de l'ordre de 163 à 176 °C [13-6], 179 à 193 °C [6]. 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 [14]. A leur sortie de la filière, à l'aide de couteaux ajustables, les granulés sont coupés à la longueur souhaitée puis dirigés vers un refroidisseur⁸, tamisés afin de séparer les fines et enfin stockés [14].

2.2.4 Le préchauffage de la biomasse

Cette section consiste en une amélioration ou une facilitation du processus de briquetage sans liant. En effet, la pression et la température élevées (200 à 250°C) requises appellent une importante consommation énergétique et favorisent l'usure accélérée des pièces maîtresses de la presse. Le préchauffage de la matière constitue une solution à ce problème. Le préchauffage a pour effet de réduire la résistance originelle ou la résilience des constituants fibreux. Avant d'être compactée, la matière est portée à une température de 200 - 250 °C, bien que la température maximale soit limitée à 350°C pour éviter la décomposition de la biomasse [9]. En conséquence, le chauffage de la biomasse permet une réduction très importante de la puissance requise (15-20%) avec une économie d'énergie évidente et la limitation de l'usure des machines [10]. En guise d'illustrations, Reed *et al.* [15-9] ont observé que le travail nécessaire pour la densification peut être réduit de moitié en préchauffant la matière végétale brute. Aqa et Bhattacharya [16] ont démontré une diminution de l'énergie électrique requise par kilogramme de 54 % pour densifier la sciure préalablement portée à 300°C. Grover et Mishra [9], Bhattacharya *et al.* [11] proposent des dispositifs de préchauffage de la biomasse.

Une presse générant des pressions élevées doit être certainement de constitution robuste, appelle une consommation énergétique importante et nécessite le broyage et le séchage des matières.

⁸ La compression provoque une élévation importante de la température du bois.

De telles opérations ont sûrement un coût conséquent. Pour ces raisons, nous avons décidé de ne pas opter pour la densification sans liant mais de nous tourner vers une autre plus simple et moins coûteuse.

2.3 La densification avec liant

Avec ce mécanisme, la liaison des particules est assurée par le liant. Kaliyan et Morey [8] définissent un liant, appelé aussi « additif », comme étant « *un liquide ou un solide formant un pont, un film, une matrice ou crée une réaction chimique pour former de solides liaisons interparticulaires* ». L'usage d'un liant s'explique par le fait que la pression développée par la presse n'est pas assez élevée pour permettre l'agglomération des particules selon le mécanisme précédent (cf. 2.2). Le compactage s'effectue alors à moyenne (5 – 100 MPa) ou à basse pression (0.2 – 5 MPa) [2].

2.3.1 Les liants

D'après sa fonction, le liant est de type *matrice* (les particules à agglomérer sont noyées dans le liant) ou du type *film* (une mince couche de liant permet d'agglomérer les particules entre elles) [6]. Selon sa nature, le liant peut être organique hydrophobe (goudron, bitume, résine) ou hydrophile (amidon, mélasse), inorganique insoluble (argile, chaux) ou solubles, composé (amidon et bitume, résine et goudron) [7]. Les liants sont extrêmement nombreux et il faut les choisir en fonction des exigences de la qualité des briquettes, de leur disponibilité locale, du coût et de la facilité d'utilisation. Le taux d'incorporation varie suivant le type de liant et le système utilisés. Par exemple, Chin et Siddiqui [17] ont montré qu'il faut de l'amidon ou de la mélasse à 25 % (en masse) pour briqueter la sciure avec une pression de 5 – 7 MPa. Il est souvent recommandé d'opter pour un liant organique. Les liants minéraux augmentent en effet la teneur en cendres du combustible. A Madagascar, Ramamonjisoa a également étudié l'utilisation de plusieurs types de liant dans le briquetage: la mélasse, la braie de houille, le jus de cactus, le jus de tamarin, la farine de manioc, la fécule de manioc et l'argile. La fécule de manioc a été choisie pour cette étude car il est facile de s'en procurer, outre le fait d'être utilisable sans extraction ou transformation mécanique préalable.

2.3.2 Les presses

La plupart des presses sont manuelles, de conception simple et fabriquées localement. Ce sont généralement des presses à levier, développant des pressions de l'ordre de 5 à 20 bars (0.5 à 2 MPa) [6]. Certaines plus élaborées ont recours à des vérins, un cric de voiture par exemple, et peuvent fabriquer plusieurs briquettes à la fois, en discontinu. Selon les procédés, la production journalière va

de quelques briquettes à une centaine de kilos par jour [7]. Comme nous le verrons plus tard, les presses utilisées pour les expérimentations sont de ce type.

2.4 Les produits de la densification

Les produits issus de la densification sont de deux types, classés selon leur diamètre : les pellets ou granulés et les briquettes. La production de pellets se réalise à l'aide d'une presse à granuler et la densification s'effectue généralement sans liant. Néanmoins, Obernberger et Thek [18] mentionnent que certains producteurs ont recours à de l'amidon pour améliorer les qualités physiques de leur produit. Les briquettes, par contre, peuvent être fabriquées aussi bien par densification sans liant qu'avec liant. Autrement dit, il est tout à fait possible de les produire à basse, moyenne et haute pression (cf. Tableau 2).

2.4.1 Les pellets

Même si la production de granulés figure parmi les voies de valorisation énergétique des sciures et copeaux, elle ne sera pas envisagée dans cette étude. La raison est que leur production nécessite de lourds investissements (broyeurs et presse à granuler de forte capacité, températures élevées, vaporisateurs, système de refroidissement entre autres) et engage un certain professionnalisme.

2.4.1.1 Présentation

Les pellets sont des bâtonnets (cf. Photo 3) de 6 à 9 mm de diamètre [14], ou 4.8 à 19.0 mm [8] et de 10 à 30 mm de longueur [14] ou 12.7 à 25.4 mm [8] produits à partir de sciures et copeaux secs (ou humides préalablement séchés). Ils sont caractérisés par un pouvoir calorifique élevé (4.5 à 5 MWh/t) en raison de leur faible taux d'humidité (en général, inférieur à 13% w.b. [19-8]) et une masse volumique apparente importante (plus de 650 kg/m³) qui facilite leur stockage [14]. Concernant la qualité des biomasses densifiées en général et des granulés en particulier, il existe des normes européennes telles les normes suisses (Swedish Standard SS 187120), allemandes (DIN 51 731), autrichiennes (ÖNORM M 7135) qui peuvent servir de référence [18]. En 2005, le Comité Européen de Normalisation a préparé 30 spécifications techniques pour les biocombustibles solides [5].



Photo 3 - Pellets

Source : www.bois-de-chauffage.net

2.4.1.2 Fabrication

La fabrication des pellets passe par trois étapes : la préparation des matières premières, la densification et le refroidissement et stockage. Les résidus doivent être ramenés dans des conditions de granulométrie et d'humidité imposées par la presse mais garanties d'une qualité optimale des pellets. La taille des particules recommandée est de 0,6 – 0,8 mm [20-8], 0,5 - 0,7 mm [21-8] . En fait, les particules supérieures à 1.0 mm créent des points de fissure causant des fractures dans les pellets [21-8] et en diminuent leur solidité. L'humidité de la matière doit être comprise entre 8.0 et 12.0 % (w.b.) [18].

Une fois ces conditions remplies, les particules sont introduites dans une presse via une trémie équipée d'un système de dosage et de mélange. L'apport de vapeur d'eau permet la lubrification et facilite la granulation qui, précisons-le, se fait sans ajout d'agent de liaison, la lignine du bois jouant ce rôle [14].

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 [14]. Les pellets quittent la presse avec une température de 60 - 95°C et 12-18 % d'humidité (w.b.) [19-8]. L'excédent de chaleur et d'humidité doit être enlevé pour permettre un stockage sans incident sur les pellets.

Le refroidissement est réalisé le plus souvent à l'aide d'air forcé [20-8]. Le temps de refroidissement peut s'étendre de 4 à 15 minutes [22-8]. Durant cette opération, les composants solubles présents dans la matière recristallisent et créent des liens entre les particules, et la viscosité de certains constituants pourrait accroître et aider au maintien de l'intégrité structurale du granulé [12-8]. Pour leur stockage, il est impératif que les granulés soient entreposés à l'abri de l'humidité pour éviter qu'ils ne se désagrègent.

2.4.2 Les briquettes

Les briquettes, appelées également bûchettes de bois densifié, se présentent sous la forme d'un cylindre de 30 à 50 mm de diamètre et de 20 à 50 cm de longueur en général. Cependant, suivant la forme du moule utilisé, on peut obtenir des bûchettes de taille et de forme différentes: cylindriques de longueur et diamètre variables, parallélépipédiques, octogonales, hexagonales, ovoïdes, sphériques.

Ce sont des produits de ce genre que nous avons essayé de produire dans cette étude, compte tenu des données en matière de granulométrie et d'humidité des matières premières et de l'appareillage existant.

2.5 Les études sur le briquetage

Pour le cas des résidus de l'usinage du bois, la plupart des études ont été effectuées sur la sciure et les copeaux dont quelques exemples sont présentés dans le tableau 2. Toutefois, il s'avère, selon Li et Liu [23], que les copeaux ne permettent pas de produire des briquettes de bonnes qualités physiques même densifiés sans liant à 138 MPa, probablement du fait de la taille importante des particules. A notre connaissance, peu ou pas d'études ont été menées concernant un mélange de matières premières, à l'exception de celle de Wamukonya et Jenkins [1]. Ces derniers ont mélangé de la sciure à de la paille de blé moyennant un ratio déterminé. Par ailleurs, la poussière de ponçage n'a pas fait l'objet d'étude. La particularité de notre étude réside dans le fait d'utiliser les copeaux, les sciures et la poussière de ponçage en mélange, en se basant sur les travaux de Ramamonjisoa.

Les paramètres étudiés en briquetage peuvent être répartis en deux catégories [6] :

- ceux liés à la matière première: la granulométrie, l'humidité, la masse volumique, la masse volumique en vrac et la composition chimique et
- ceux relatifs au procédé de densification : le diamètre du cylindre, la quantité de matière comprimée, la pression exercée, la vitesse du piston, la durée du maintien de la pression, la chaleur apportée par l'extérieur et l'adjonction de liant. Tous ces paramètres ont une influence plus ou moins marquée sur les caractéristiques des briquettes.

Dans cette étude, nous avons choisi de ne porter aucune modification sur les matières premières. Elles seront utilisées **telles qu'elles sont produites** par l'usine. L'objectif est de voir s'il serait possible, tout d'abord, d'obtenir une briquette dans ces conditions et ensuite d'évaluer les qualités physiques de celles-ci avec le procédé utilisé et recommandé dans cette étude. Au niveau du procédé, deux paramètres ont été considérés : la composition et la pression. La composition englobe à la fois la quantité de matière à comprimer et l'adjonction de liant. Le diamètre du cylindre a été fixé à 50 mm. Il n'y a pas d'apport de chaleur.

Tableau 2 - Quelques travaux de recherche sur le briquetage trouvés dans la bibliographie

Matière Première			Paramètres de briquetage	Caractéristiques briquettes	Réf.
Type	T (mm)	H (%) w.b.			
Sciure	0.3 – 0.85	17	P = 5 -7 MPa Taux liant = 25 % (en masse) D _T = 20-40 s	D = 442 kg/m ³ V = 0.44 g/min	[17]
Sciure de pin	5.5 - 6.5	15 - 20	P = 75 MPa D _T = 5 s	H = 13.3 % (sd=0.35) w.b. T _T = 82.6 % (sd =0.97)	[1]
Copeaux de pin	60 -75	15 - 20		H = 15.1% (sd=0.29) w.b. T _T = 88.4 % (sd=9.54)	
Sciure	< 2.36	8.9	P = 103 à 138 MPa D _T = 10-20 s	D = 0.882 à 0.915 g/cm ³ L _w = 6 à 1.7%	[23]
Mulch	T _{max} = 40, 7	9.7	70-138 MPa D _T = 10-20 s	D= 0.831-0.944 g/cm ³ L _w =1.7 à 0.69%	
Copeaux	T _{max} = 40×30×5	8.5	P =138 MPa D _T = 10-20 s	D = 0.874 g/cm ³ Specimen cassé	

Légende

MP	: matière première	D	: densité ou masse volumique
T	: taille des particules	V	: vitesse de combustion
T _{max}	: taille maximale des particules	T _T	: durabilité par tumbling test
H	: humidité	sd	: écart type ou « standard deviation »
P	: pression	L _w	: perte de masse après tumbling test
D _T	: Durée de maintien de la pression ou « Dwell time »		

2.6 Le briquetage à Madagascar

Il y eut un temps où apparurent les briquettes ardentes, produites à partir de sciures de bois, mais les documents à ce sujet n'ont pu être retracés. Il y eut aussi le briquetage d'anacarde (noix de cajou) réalisé à Mahajanga dans le cadre du Programme Énergie II du Ministère de l'Énergie et des Mines en guise de substitution du charbon de bois. Les coques étaient carbonisées et agglomérées afin de produire des boulettes ou des agglobriquettes. Les résultats des tests d'acceptabilité dans les ménages ont révélé un succès de ces produits. Leur qualité est meilleure comparée au charbon de bois (les briquettes sont un peu plus dense et moins sales). Cependant, le prix de revient de ces briquettes était juste au-dessous du prix de vente du charbon, raison pour laquelle l'usine de cajou n'a pas continué à produire ces briquettes [25]. Le briquetage du poussier de charbon est déjà une réalité à Antananarivo. Ces fines sont agglomérées à la main à l'aide de la tourbe.

Ramamonjisoa a antérieurement effectué des études sur le briquetage à basse pression de différentes matières : aiguilles de pin, herbes de savanes carbonisées, balles de riz, charbon de terre, résidus de l'industrie mécanique du bois. En 2005, des briquettes de balles de riz carbonisées ont été produites dans le cadre d'une étude conduite par un étudiant de la Faculté des Sciences dans le cadre de son Diplôme d'Études Approfondies. Plus récemment, le programme Tosika Meva de la Fondation Tany Meva récompensa un projet mis au point par l'association M-ARINA. Il s'agissait d'un combustible produit à partir d'un mélange de sciure ou de biomasse carbonisée, de tourbe et d'un liant (colle farineuse). La densification est assurée par une presse et le séchage s'effectue à l'air libre. Jusqu'ici aucune étude universitaire sur la densification des déchets à base de bois uniquement n'a été entreprise.

2.7 Les combustibles concurrents

La consommation de l'énergie à Madagascar est caractérisée par une forte contribution des combustibles ligneux : le bois de chauffe, le charbon de bois, la sciure [26], [25], [27]. Le charbon est un combustible à caractère urbain [26] alors que l'utilisation du bois de chauffe est caractéristique du monde rural. Ils sont préférés des autres sources énergétiques par le fait qu'ils ne nécessitent pas d'accessoires particuliers ni d'abonnements pour y accéder [26] en plus de leur prix abordable.

Comme les briquettes sont constituées de particules de bois consolidées et comme aucun foyer spécial n'est envisagé pour leur utilisation, le bois de chauffe constitue leur concurrent premier. Les gargotes, les pizzerias, certaines boulangeries, les cantines publiques l'utilisent pour la cuisson, quelques industries l'emploient pour la génération de vapeur. Les ménages utilisent plutôt le charbon, le gaz ou l'électricité selon leurs moyens. Dans l'ensemble, les quantités de bois consommées quotidiennement sont impressionnantes mais ramenées par utilisateur, elles le sont moins à l'exception

des industries. En réalité, il n'est pas encore ressenti un problème en « kitay » dans la capitale, ce qui n'est pas le cas du charbon qui rencontre actuellement une hausse de prix importante, atteignant 10 000 Ariary le sac.

Il est peu probable que les briquettes puissent constituer un substitut au charbon. Toutefois, cette idée n'est pas tout à fait à écarter car il est constaté actuellement une recrudescence de l'utilisation des copeaux et de la sciure en cuisson. La cherté du charbon a contraint une couche de population à se tourner vers ces sous-produits. Les utilisateurs de ces sous produits ont bricolé des foyers spéciaux qui permettent l'utilisation de la sciure et des copeaux. Il aurait été intéressant d'effectuer des expérimentations avec les copeaux et les sciures mais nous ne disposons pas des foyers adaptés. Par ailleurs, le TSFm produit également des briquettes de 50 mm de diamètre et de 190 mm de long. Au vu de l'aspect de ces dernières, la densification s'est effectuée à haute pression, sans liant. En définitive, les concurrents des briquettes sont principalement le bois de chauffe et les briquettes du TSFm.

3-Matériels et méthodes

3 MATÉRIELS ET MÉTHODES

3.1 Procuration des matières premières

Rappelons que dans cette étude, les copeaux, les sciures et la poussière de ponçage constituent les matières premières. Elles proviennent toutes de l'usine S. Prix Meubles Ambohidratrimo (à 15 Km du centre ville) Antananarivo. Elles sont produites au cours de l'usinage du bois. Les copeaux sont des petites chutes de matière créées suite à la découpe ou au façonnage de celle-ci [28]. Les sciures sont des copeaux de petites dimensions résultant de la découpe du bois par sciage [29]. La poussière de ponçage, comme son nom l'indique, se présente sous l'aspect d'une farine produite suite au passage d'une ponceuse sur une pièce. Les échantillons ont été prélevés en différents points des tas où ils se trouvaient : à la fois en superficie mais aussi le plus au cœur possible du tas. Lors de la collecte des échantillons, les copeaux et les sciures de pin ont été plus humides que ceux du palissandre. Cette différence est intéressante car elle permettra de déterminer si le procédé de densification fait acception d'humidité ou non.

Deux essences ont été considérées : *Dalbergia monticola* (palissandre) et *Pinus kesiya* (pin). Cette espèce de palissandre provient de Port Berger et de Morondava. Les bois ordinaires n'ont pas été étudiés en raison de leur grande diversité. Pour le palissandre, le bois dont dérivent les sous produits concernés est du bois préalablement séché à travers un séchoir solaire. Les discussions menées avec un responsable au sein de l'usine a permis de connaître que les copeaux provenaient principalement des toupies et des raboteuses et que la sciure des scies circulaires. Les copeaux de pin sont issus du passage d'un avivé non séché à travers une raboteuse. La sciure de pin est issue de la scie de tête. Le liant utilisé est la fécule de manioc produite par l'usine TAF.

3.2 Caractérisation des matières premières

La forme et la taille des sous produits concernés dépendent alors des caractéristiques de l'outil de découpe ou de façonnage. De ce fait, les caractéristiques des résidus diffèrent selon le centre de production. Aussi importe-t-il de connaître celles des sous produits existant au sein de l'usine S. Prix Meubles. Pour ce faire, la teneur en eau, la granulométrie et la masse volumique en vrac ont été déterminées pour chaque matière première et pour chaque essence considérée. En outre, la connaissance de ces caractéristiques est essentielle pour la réplication des essais dans d'autres usines.

3.2.1 Détermination de la teneur en eau

L'humidité ou la teneur en eau d'un échantillon est le rapport entre la masse d'eau -libre et liée- qu'il contient et une masse de référence. Selon la référence retenue, l'humidité peut s'exprimer en pourcentage :

-soit de la masse anhydre ou « dry basis » (**d.b.**): humidité sur base sèche

$$H = \frac{MT-MA}{MA} \times 100 \quad (1)$$

-soit de la masse totale (humide) ou « wet basis » (**w.b.**) : humidité sur brut

$$H_{MT} = \frac{MT-MA}{MT} \times 100 \quad (2)$$

Où MT = masse totale humide de l'échantillon

MA = masse anhydre correspondante

Les formules suivantes donnent la correspondance entre les expressions (1) et (2) :

$$H_{MT} = 100 \times \frac{H}{100+H} \qquad H = 100 \times \frac{H_{MT}}{100-H_{MT}}$$

La masse anhydre est obtenue en soumettant un échantillon de masse connue à une dessiccation à l'étuve (105 ± 5°C) jusqu'à masse constante. La détermination a été effectuée par le Centre National de Recherche Environnementale (CNRE). Dans le domaine du bois énergie, l'expression de l'humidité généralement utilisée est l'humidité sur brut.

3.2.2 Détermination de la granulométrie

La granulométrie représente la répartition en classe de la taille des particules composant une masse hétérogène [30]. Elle est déterminée par tamisage. Avant la détermination proprement dite, la matière est remuée pour l'homogénéiser, puis on prélève immédiatement l'ensemble des particules contenues dans de petits volumes définis par des plans verticaux et répartis au hasard. Cette opération s'avère essentielle puisqu'il se crée rapidement une sédimentation au sein de la matière, les fines particules ayant tendance à se déposer au fond du tas. Bref, il s'agissait de disposer d'un échantillon représentatif.

100 g de matière ont été tamisés à travers un ensemble de 04 tamis à mailles carrées de 3 mm, 2 mm, 1mm et 0.5 mm de côté. L'agitation est effectuée à la main. Les tamis ont été appelés respectivement T₃, T₂, T₁ et T_{0.5}. Les résultats s'expriment en pourcentage de masse de la classe de distribution par rapport à la masse initiale selon l'expression $G_i = \frac{MG_i}{M} \times 100$ dans laquelle :

G_i : fraction granulométrique G_i retenue par le tamis T_i (%)

MG_i : masse de la fraction retenue par le tamis T_i (g)

M : masse initiale (g)

Les MG_i sont en présentées en Annexe 1. Par ailleurs, pour le cas particulier des copeaux, en plus de la granulométrie, les dimensions (longueur, largeur) des particules retenues par le tamis T_3 ont été déterminées. Les copeaux sont assimilés à des parallélépipèdes droits. Leurs surfaces ont été calculées pour se faire une idée de leur taille. Pour ce faire, 200 individus de la fraction G_3 ont été prélevés au hasard.

3.2.3 Détermination de la masse volumique en vrac

La connaissance de la masse volumique en vrac est nécessaire pour déterminer les quantités de matières premières produites par l'usine et en conséquence d'estimer la quantité de bûchettes qu'il est possible de produire.

3.2.3.1 Méthode de détermination

Par définition, la masse volumique en vrac est le rapport, exprimé en kg/m^3 , entre la masse de matière et le volume la contenant. Pour ce faire, après homogénéisation, une quantité suffisante de matière est prélevée pour remplir, sans tasser, un récipient à section carrée de 95 mm de côté et 45 mm de haut. Faute de table vibrante, le récipient est agité manuellement pendant un temps suffisamment long tout en ajoutant la quantité de matière nécessaire pour stabiliser le niveau de la matière au sommet du récipient. La masse de l'échantillon est mesurée. Le volume se détermine de la même manière que le calcul du volume d'un parallélépipède rectangle (pavé droit). La masse volumique en vrac moyenne est calculée à partir de 10 séries de mesure par matière première par essence.

3.2.3.2 Détermination des quantités de sous produits générés par l'usine

Chez S. Prix Meubles, les copeaux, la sciure et la poussière sont captés par aspiration au-dessus des machines et stockés respectivement dans un conteneur et dans des box en bois. Comme le conteneur n'est jamais plein, le volume occupé par les copeaux à travers les dimensions minimales et maximales du parallélépipède fictif qu'ils forment a été calculé. Pour les box en bois, seule la hauteur de remplissage varie. Les hauteurs de remplissage (maximale et minimale) proviennent des discussions tenues avec un responsable lors de la collecte des échantillons accompagnées de relevés métriques (cf. Tableau 3).

En tant qu'ébénisterie, les pièces utilisées doivent nécessairement être sèches, c'est-à-dire se trouvant dans une fourchette d'humidité bien définie, pour la qualité des produits. Ainsi, bien que les copeaux contenus dans le conteneur soient d'essences diverses, la masse volumique en vrac des copeaux de palissandre a été utilisée pour estimer la quantité de copeaux générés. Par ailleurs, étant

donné que la plupart des sciures produites résultent de la scie de tête, la masse volumique de la sciure de pin a été utilisée pour la détermination. La poussière de ponçage est majoritairement constituée de palissandre, la masse volumique en vrac de cette essence a été alors utilisée.

La quantité d'une matière première est obtenue par la relation $Q \text{ (kg)} = \rho \times V$ où ρ est la masse volumique en vrac de la matière considérée et V le volume qu'elle occupe. Les volumes donnés au tableau 3 sont les volumes produits tous les deux jours⁹. La quantité hebdomadaire est obtenue en multipliant ces quantités par deux. La quantité annuelle est déterminée en multipliant les quantités hebdomadaires par 48, valeur correspondant au nombre de semaines amputé d'une durée de congé de un mois.

Tableau 3 - Données de base pour la détermination des quantités de sous-produits disponibles au sein de l'usine S. Prix Meubles

	Dimensions	Unité	Copeaux	Sciure	Poussière
L	max	cm	500	200	200
	min	cm	230	-	-
l	max	cm	220	195	195
	min	cm	200	-	-
H	max	cm	80	50	20
	min	cm	30	15	8
V	max	m ³	8.8	1.95	0.78
	min	m ³	1.38	0.59	0.31

3.3 Procédé de briquetage

Le procédé de fabrication utilisé dans cette étude se base sur les travaux de Ramamonjisoa. Il s'agit, rappelons-le, d'une densification avec liant d'un mélange de copeaux, de sciures et de poussière de ponçage. Le liant utilisé est la fécule de manioc. L'ensemble est placé dans un moule et compacté via une presse manuelle à basse pression. En tant que mélange, les « ingrédients » se trouvent dans des proportions bien définies, que nous nous sommes permis d'appeler une « composition ». Les paramètres liés au procédé utilisé dans cette étude sont alors la composition et la pression.

3.3.1 Travaux préliminaires

3.3.1.1 Objectifs

Les travaux préliminaires essaient de répondre au premier objectif de cette étude. Ils ont été menés à Ambohimanarina et consistaient à :

⁹ Les sous produits sont vendus tous les deux jours.

- (1) Voir à quoi ressemble réellement une briquette et comment la fabriquer,
- (2) Déterminer une composition pour chaque essence considérée qui satisferait l'exigence suivante : faire en sorte que la quantité de copeaux soit la plus élevée parmi les trois types de matières premières, puis celle de la sciure et enfin celle de la poussière conformément à la disponibilité en ces matières dans l'usine et,
- (3) Si la condition (2) est réalisable, on va utiliser la composition trouvée pour fabriquer des éprouvettes de plus grandes dimensions.

L'idée derrière les conditions (2) et (3) est de voir s'il est possible de fabriquer des briquettes en se servant d'une presse manuelle et en utilisant la composition adéquate. Autrement, il faut consentir à investir pour un broyeur ou se limiter à la quantité de sciures disponible.

3.3.1.2 La composition d'une briquette

Sur la base des recherches effectuées par Ramamonjisoa, la fabrication d'une briquette fait intervenir les copeaux, la sciure, la poussière et un liant. Les trois assortiments de bois diffèrent fondamentalement par la taille de leurs particules. En effet, le liant agglutine les particules de petite taille et lors de la compression, l'ensemble s'insère dans les vides existant entre les particules grossières. La fécule de manioc a été choisie, rappelons-le, comme liant. Elle est mélangée à de l'eau puis chauffée. La gélatinisation de l'amidon apparaît en présence de chaleur et d'eau [8]. Le liant subit donc une transformation par voie thermique. En effet, l'amidon cru possède un pouvoir cohésif inférieur à l'amidon gélatiné [31-8]. Wood [31-8] conclut que les pellets avec l'amidon pré-gélatiné ont été plus solides et plus durables que ceux avec l'amidon brut. En somme, la fabrication d'une briquette nécessite les trois types de matières premières, un liant et de l'eau.

3.3.1.3 Les étapes de fabrication d'une briquette

Le modèle de fabrication utilisé dans cette étude comprend cinq étapes : la préparation de la composition, la préparation du liant, le mélange, la compression et le démoulage. La première étape consiste à peser chaque ingrédient conformément à une composition donnée (cf. 3.3.1.5). Comme énoncée précédemment, la fécule de manioc est transformée en un empois (cf. Photo 4). Une fois le liant préparé, les trois matières premières sont mélangées entre elles dans un premier temps puis avec le liant dans un deuxième temps. Ce mode de mélange a été initié par Ramamonjisoa. Nous trouverons plus tard **un autre mode de mélange** que nous avons mis au point pour satisfaire le deuxième objectif de ces travaux préliminaires. L'ensemble est placé manuellement dans la matrice. Le piston, actionné

par le cric, comprime la matière jusqu'à ressentir un « contre mouvement ». Le démoulage¹⁰ est par la suite effectué grâce à un dispositif de démoulage. Le dispositif en question est constitué d'un moule suspendu sur un cylindre creux grâce à un arceau (cf. Photo 5). A ce stade, la briquette est très fragile et a l'aspect d'une pâte. Cette dernière phase doit s'effectuer délicatement pour espérer un produit de bonne présentation. En cas de mauvaise manipulation, elle se déforme et il faudra la replacer dans le moule pour y être recompactée.



Photo 4 - Empois d'amidon



Photo 5 - Moule, piston et démouleur

3.3.1.4 La presse utilisée et les accessoires

La presse utilisée pendant ces travaux préliminaires a été celle de Ramamonjisoa, à Ambohimananarina. Il s'agit d'un cric hydraulique de voiture d'une charge maximale supportable de 10 tonnes monté sur un bâti (cf. Photo 7). Le cric actionne le piston qui coulisse dans une matrice de 40 mm de diamètre (cf. Photo 6). L'ensemble permet de produire des briquettes de 40 mm de diamètre et entre 50 et 55 mm de long. Ces dimensions ne correspondent pas à celles recherchées dans cette étude, néanmoins elles sont valables pour des études préliminaires. La pression exercée est inconnue du fait qu'une telle presse ne dispose pas d'un manomètre.

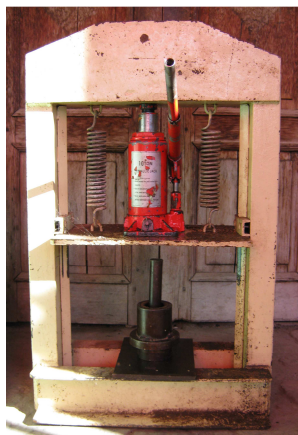


Photo 7 - Presse de Ramamonjisoa

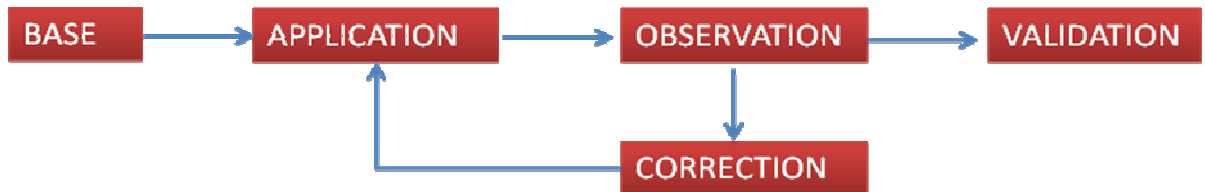


Photo 6 - Moule et piston

¹⁰ Opération consistant à évacuer la briquette néoformée du moule qui la contient.

3.3.1.5 Les compositions testées

Comme dans tout mélange, les cinq composantes d'une briquelette précédemment présentées se trouvent dans des proportions définies qui garantissent l'aspect et la qualité de la briquelette. On distinguera les compositions à forte proportion en sciures notées « *CFS* » des compositions privilégiant les copeaux notées « *CFC* ». Dans tout ce qui suit, le modèle de recherche suivant a été utilisé pour la validation des compositions.



La validation se réalise au moyen de critères : produit présentant le **moins de fentes possibles**, un **drop test supérieur à 95% et similitude**. Ce dernier critère n'est effectif que dans la détermination d'une composition où la sciure est en grande proportion.

a) Les compositions à forte proportion en sciure (CFS)

Pour produire une briquelette de la photo 8, une briquelette d'Eucalyptus dont nous ignorons l'espèce, les travaux de Ramamonjisoa conclurent que les copeaux de rabotage, de sciure et de poussière de ponçage sont mélangés dans des proportions reprises au tableau 4 (chiffres arrondis à l'entier le plus proche). Dans tout ce qui suit, seront dénommés « *Pin CFS* » et « *Pal CFS* » les compositions où la sciure est en proportion élevée respectivement pour le pin et pour le palissandre.

La composition présentée au Tableau 4 est considérée comme la composition de base ou de départ utilisée dans cette étude. Les fines, les moyennes et les grosses sont respectivement constituées par la poussière de ponçage, la sciure et les copeaux.

Tableau 4 - Composition de départ

Composant	Unité	Eau	Liant	Fines	Moyennes	Grosses	Total
Quantité	g	47	6	6	15	6	80
Quantité	%	58.75	7.5	7.5	18.75	7.5	100

Compte tenu des données en matière de granulométrie et d'humidité des matières premières, cette composition de départ a été appliquée pour chaque essence afin d'en vérifier la validité.

Signalons que le mode de mélange utilisé est celui initié par Ramamonjisoa. Les spécimens obtenus sont comparés visuellement à la brique de référence (cf. Photo 8) en termes d'aspect. L'existence de fentes ou craquelures importantes sur les briques a été retenue comme indicateur de mauvaise qualité. En effet, ces cracks constituent des points de résistance minimum [6]. Ils sont les premiers à céder lors des chocs ou lors de l'échappement des gaz de combustion et amènent de ce fait au délitage¹¹ des briques.



Photo 8 - Brique de référence

Si les briques sont, après observation visuelle, similaires à la brique de référence, la composition de départ est retenue et considérée comme valable. Dans le cas contraire, des corrections doivent être effectuées par diminution ou augmentation de la quantité d'une composante jusqu'à l'obtention d'un produit qui soit similaire à la brique de référence. Pour ce cas, les expériences et le savoir-faire d'un habitué¹² ont été des plus utiles. Le total du tableau 4 est maintenu à 80 g.

La masse volumique est un critère très utilisé pour apprécier la qualité de la densification, surtout en densification sans liant [6]. Aussi, les masses volumiques du Pin CFS et du Pal CFS ont été comparées statistiquement (au seuil de 5 %) dans un premier temps avec la masse volumique de la brique de référence (test *t* de student pour deux échantillons sur ExcelStat 2008) puis entre elles dans un deuxième temps. En outre, l'étude la plus proche pouvant servir de comparaison est celle de Chin et Siddiqui [17]. Les briques de sciures compactées à 7 MPa et avec de la mélasse à 25% en masse, valeurs optimales de fabrication, qu'ils ont fabriqué ont une densité de 442 kg/m³. Les densités des produits obtenus sont comparées statistiquement (au seuil de 5 %) avec cette valeur (test *t* de student pour un échantillon sur Excel Stat 2008).

¹¹ Le délitage est la désintégration de la brique ou la perte de cohésion de la brique sous une contrainte au dessus de celle supportable par le produit (humidité relative, immersion dans l'eau, chocs, sollicitation massique ou sollicitation thermique).

¹² Il s'agit d'un collègue de Mr Mamitiana, habile au mélange et à la détermination d'un composant en proportion manquante.

En plus des essais de similitude et de la densité, les briquettes ont été soumises à des drop tests après un certain temps de séchage afin de tester leur solidité. On estime que les briquettes sont sèches lorsque leur masse ne diminue plus au cours du temps. Le séchage des spécimens a été effectué à l'air et à l'ombre. Les spécimens ont été placés dans un même endroit donc soumis aux mêmes conditions de température et d'humidité.

Pour le drop test, la méthode utilisée par Al-Widyan et Al-Jalil [32-8] a été reprise. Les briquettes sont lâchées 4 fois de suite, sans vitesse initiale, à 1.85 m du sol et retombent sur une plaque en acier de 50 mm d'épaisseur. Trois répétitions ont été effectuées. Les masses des éprouvettes avant et après le drop test sont relevées et utilisées pour le calcul de D tel que :

$$D = 100 \times \frac{M_f}{M_i}$$

Plus D est élevé, plus les briquettes étaient solides et résistantes aux chocs dus à leur propre poids.

Toutefois, la composition de base **exige une forte proportion nécessaire en sciure**. Or, dans les usines, ce sont les copeaux qui se trouvent en quantités importantes, puis la sciure et enfin la poussière. Étant donné qu'aucun procédé de réduction de la taille des particules (broyage ou déchiquetage) n'est envisagé dans cette étude, et ce essentiellement pour des raisons de minimisation de coûts, cette réalité a conduit au second objectif de ces travaux préliminaires.

b) Les compositions à forte proportion en copeaux (CFC)

Dans tout ce qui suit, les termes suivants seront utilisés : « **Pin CFC** » et « **Pal CFC** » pour désigner les compositions privilégiant les copeaux respectivement pour le pin et pour le palissandre. Le dispositif expérimental étant le même, toutefois pour ce cas il importe de signaler que **le mode de mélange a été modifié**. C'est ici le mode de mélange que nous avons mis au point. Une fois le liant préparé, les copeaux sont versés en premier, puis la sciure et en dernier lieu les fines. Un mélange est toujours effectué avant chaque apport de matière. On opère de cette façon car les particules fines ont plus d'affinité avec le liant et l'« emprisonnent » rapidement. Autrement dit, si on avait versé simultanément les copeaux avec la sciure et la poussière de ponçage, comme dans le mode de mélange initié par Ramamonjisoa, ces deux derniers auraient accaparé le liant. Ce qui se traduirait, pratiquement, par l'existence d'une proportion importante de copeaux inutilisés et inutilisables. Les fines sont apportées en dernier lieu. Elles rendent le mélange peu collant en absorbant le reste de liant n'ayant pu être agglutiné par les copeaux et la sciure. Lorsque la quantité de poussière est suffisante, le mélange est facilement maniable et n'adhère plus aux mains.

Pour déterminer une composition privilégiant les copeaux, la composition de base du tableau 4 a été remaniée selon l'orientation présentée au Tableau 5, basée sur la quantité de sous-produits disponibles.

● Maintien du total à 80 g

Les hypothèses suivantes ont été alors avancées: doubler la quantité de copeaux, augmenter la quantité de liant à 8 g (pour s'assurer que les copeaux s'imprègnent bien), réduire de moitié la quantité de sciure, diminuer le pourcentage de fines, combler le reste par de l'eau. Le total a toutefois été maintenu à 80 g. Aussi, pour ce cas, la composition reprise au tableau 5 est-elle considérée comme le point de départ dans la recherche d'une composition privilégiant les copeaux. On procède de la même manière que dans la détermination des compositions CFS. En d'autres termes, le tableau 5 est appliqué compte tenu des données de granulométrie et d'humidité des matières premières considérées, en respectant le mode de mélange précédemment expliqué.

Tableau 5 - Proposition de composition de départ (CFC)

Composant	Unité	Eau	Liant	Fines	Moyennes	Grosses	Total
Quantité	g	48	8	4	8	12	80
	%	60	10	5	10	15	100

Le résultat est par la suite observé. Si ce dernier est satisfaisant, la composition est retenue, sinon on procède à des corrections jusqu'à l'obtention d'un produit acceptable. La présence de fentes importantes reste l'indicateur de mauvaise qualité retenu. Il s'agit donc toujours d'une appréciation visuelle. Les corrections s'entendent ici comme l'ajout et la diminution de la quantité des trois matières premières uniquement mais en maintenant le total à 80 g. La proportion de liant reste inchangée, ce qui induirait que celle de l'eau pourrait changer. On observe si la correction a amélioré ou non le produit. Après séchage, les éprouvettes sont plus tard soumises à des drop test avec la même méthode utilisée par Al-Widyan et Al-Jalil [32-8]. Deux éprouvettes par composition testée ont été fabriquées.

● Modification du total

Dans ce second cas, la quantité de liant a été diminuée alors que la masse des autres composants reste inchangée pour les CFC retenues pour chaque essence. Ici, il s'agit de voir si la diminution du taux du liant est préjudiciable aux briquettes. Si elle ne l'est pas, on retient la composition qui présente la plus faible proportion en liant nécessaire. L'intérêt d'une telle démarche réside dans une optique d'optimisation de coûts.

3.3.1.6 Critères de choix de la composition finale

En définitive, pour les compositions à forte proportion en sciure (CFS), la similitude et le drop test sont les critères retenus. Pour le cas des compositions privilégiant les copeaux (CFC), les compositions retenues sont celles donnant des produits avec peu de fentes, solides et respectant l'objectif (2) de ces travaux préliminaires.

3.3.2 Fabrication de briquettes à taille réelle

Les différentes compositions étant fixées après les expérimentations précédentes, il s'agit maintenant de fabriquer les briquettes de 50 mm × 150 mm (diamètre × longueur) qui font l'objet de cette étude. Ce sont ces briquettes qui seront un peu plus tard caractérisées à la fois en tant que produit densifié et en tant que combustible. La composition à forte proportion en sciures pour le palissandre n'a pas fait l'objet d'un essai grandeur réelle car nous n'avons pas collecté suffisamment de matières premières en cette essence. Dans les divers tests qui suivront, la composition à forte proportion en sciure du pin (Pin CFS) sera considérée comme la briquette de référence. Aussi resteront le Pin CFS, le Pin CFC et le Pal CFC. Afin de permettre des comparaisons, 102 briquettes ont été au total fabriquées, soit 34 briquettes par composition.

3.3.2.1 La composition

Les compositions retenues d'après les travaux préliminaires, conformément aux critères posés, sont utilisées ici avec éventuellement des corrections mineures. Les quantités de chaque composant ont été multipliées par quatre pour permettre la fabrication d'une briquette de 150 mm de long.

3.3.2.2 Les étapes de fabrication

La fabrication est assez similaire à celle suivie dans les travaux préliminaires. A titre de rappel, elle comprend la préparation de la composition et du liant, le mélange selon le mode de mélange approprié à chaque composition selon que celle-ci relève de la CFS¹³ ou de la CFC¹⁴, le compactage et enfin le séchage. Ainsi, chaque ingrédient est pesé conformément à la composition retenue. L'ensemble eau-liant est chauffé à feu doux pour gélatiniser l'amidon. Le mélange est par la suite effectué. La pâte obtenue est enrobée dans un sachet plastique qui facilite son transport et son placement dans le moule en lui conférant une forme fuselée. Le séchage a été effectué à l'air libre et à

¹³ Composition à forte proportion en sciures

¹⁴ Composition à forte proportion en copeaux

l'ombre. Les éprouvettes sont dites « sèches » lorsque leurs masses ne diminuent plus. Les briquettes ne sont vraiment manipulables, c'est-à-dire les manier sans risquer de les briser, qu'une semaine environ après leur fabrication.

La masse à la sortie du moule est d'environ 288 - 300 g. La différence avec la masse théorique vient des pertes de matière au cours du mélange. En effet, les particules de petite taille agglutinent le liant et adhèrent à l'outil ayant servi au brassage/mélange ainsi qu'au récipient ayant servi pour le mélange. Une fois les briquettes confectionnées, elles ont été évaluées en tant que produit densifié et en tant que combustible.

3.3.2.3 La presse utilisée et les accessoires

La presse de Ramamonjisoa n'a pas pu être utilisée car les dimensions de la briquette à produire imposent une course de piston plus importante. Pour y remédier, le compactage a été réalisé au moyen d'une presse manuelle du Bloc Technique de l'ESPA Ankatso (cf. Photo 9). Il s'agit d'un axe actionné par deux bras grâce à un pas de vis. La partie inférieure de la presse est constituée d'une plaque de métal de 6 mm d'épaisseur supportée par deux crics de voiture d'une charge maximale supportable de 20 tonnes. Cette presse est usuellement utilisée pour la fabrication de matériaux de construction notamment de briques mais aussi, de temps en temps, pour l'extraction d'huiles végétales. En outre, il a fallu également confectionner un moule de 50 mm de diamètre interne et de 200 mm de longueur ainsi qu'un piston de 220 mm (cf. Photo 10) en collaboration avec le bloc technique de l'ESPA.



Photo 9 - Presse du bloc technique ESPA



Photo 10 - Moule et piston

3.3.2.4 Détermination de la pression de compactage

Pour cette détermination, une presse hydraulique du bloc technique de l'ESPA (cf. Photo 12) munie d'un manomètre a été utilisée. Cette presse, actionnée manuellement, développe une pression maximale de 60 MPa. La pression est appliquée jusqu'à ce qu'il y ait fuite de liant. En réalité, lorsque la pâte, une fois placée dans le moule, est compactée avec la presse à vis (cf. Photo 9), à un moment donné, lorsque la réduction du volume devient négligeable, une partie du liant est expulsée à la base du moule. Cette fuite de liant nous a servi d'indicateur lors du compactage, signe qu'il faut arrêter la compression. Si la compression est continuée, la fuite de liant provoque la formation de brèches importantes à la base de la brique en formation. La pression exercée est lue directement sur le manomètre. Trois essais ont été effectués. Le résultat est exprimé en MPa.



Photo 12 - Presse à manomètre du bloc technique ESPA



Photo 11 - Manomètre

Comme énoncé maintes et maintes fois précédemment, la caractérisation concerne la brique en tant que produit densifié d'une part et en tant que combustible d'autre part.

3.4 Les briquettes : un produit densifié

Il est intéressant de connaître les caractéristiques des produits obtenus avec le procédé de densification utilisé dans cette étude afin d'en apprécier l'efficacité. La masse volumique, la masse volumique en vrac, la solidité et la durabilité des éprouvettes ont été alors déterminées.

3.4.1 Détermination de la masse volumique

La masse volumique est un critère très utilisé pour apprécier la qualité de la densification. C'est une propriété dont la signification est évidente et dont la mesure est considérée comme facile [6]. En densification sans liant, il est admis qu'il n'est pas possible d'obtenir des briquettes de qualité en-dessous d'une masse volumique de 800 kg/m^3 , mesurée à 20°C et 65 % d'humidité relative [6]. En outre, la masse volumique des briquettes influe sur la vitesse de combustion [17]. Plus la briquette est dense, plus lente est la vitesse de combustion.

Par définition, la masse volumique d'une briquette est le rapport entre sa masse et le volume limité par sa surface extérieure. Elle s'exprime en kg/m^3 . La masse a été mesurée avec une balance de précision à 0.1 g près pour toutes les briquettes de la composition concernée. La détermination s'effectue sur des briquettes sèches. Le volume de la briquette se détermine comme celui d'un cylindre droit. Ces mesures ont été effectuées sur toutes les éprouvettes d'une composition donnée. La valeur moyenne est retenue comme résultat.

3.4.2 Détermination de la masse volumique en vrac

Il est utile de connaître la masse volumique en vrac des briquettes pour dimensionner le local d'entreposage et la quantité transportable par un camion d'une contenance donnée. Pour la détermination, nous avons supposé un cube virtuel de 1 m de côté. Le nombre de briquettes pouvant être contenues dans ce récipient peut être estimé à partir du diamètre et de la longueur moyenne des briquettes. La masse totale M des briquettes pouvant être contenues dans un volume de 1 m^3 est obtenue par la relation :

$$M = N \times M_{\text{moy}}$$

dans laquelle :

N : nombre de briquettes contenues dans 1 m^3

M_{moy} : masse moyenne des éprouvettes, g

La masse volumique en vrac, exprimée en kg/m^3 , est par la suite calculée, après conversion des unités.

3.4.3 Détermination des propriétés physiques des briquettes

Il s'agit ici de déterminer les qualités physiques des briquettes. L'efficacité du procédé de densification utilisé pour cette étude peut être appréciée à travers les tests de solidité et de durabilité des produits obtenus. Ces tests permettent d'indiquer les contraintes maximales (stress) que le produit peut supporter et le pourcentage de fines produites lors de la manipulation, du transport et de

l'entreposage [8]. En effet, il serait contraignant pour l'utilisateur final de disposer d'un produit qui se désintègre au moindre impact ou qui nécessiterait un soin particulier. La solidité est déterminée à travers trois tests: le test de résistance à la compression, le test de résistance à l'impact et le test de résistance à l'eau. Ce dernier test n'a pas été réalisé. En effet, il est généralement admis qu'une forte humidité est préjudiciable aux briquettes. Des études montrent que l'eau absorbée diminue leur cohésion [8], [23] et favorise l'attaque microbienne [38]. Aussi est – il impératif de les maintenir à l'abri des conditions humides et notamment de la pluie.

3.4.3.1 Test de compression

La résistance à la compression (*compressive strength*) ou la résistance à l'écrasement (*crushing strength*) ou encore la dureté (*hardness*) détermine la charge maximale que l'éprouvette peut supporter avant de craquer ou de se désintégrer [8]. Ce test trouve son intérêt dans le fait que les briquettes sont disposées en piles dans le local d'entreposage et durant leur transport. Il simule en effet la contrainte de compression subie par une briquette située sur une pile inférieure et, en particulier, celle située à la base de la pile.

La dureté se détermine par un test de compression diamétrale [8]. Signalons toutefois qu'il existe, et c'est la plus couramment utilisé, une méthode développée par l'American Society for Testing Materials (ASTM) désignée méthode C 39-96 [33-23]. Nous ignorons si la démarche est similaire à celle de la compression diamétrale car nous n'avons pas eu accès aux procédures d'utilisation. Aussi, cette méthode a été citée à titre informatif, utilisant les références bibliographiques de Li et Liu [23].

Pour la compression diamétrale, une briquette est placée entre deux plateaux parallèles dont les surfaces sont supérieures à la section de la briquette. Une charge est appliquée jusqu'à ce que le spécimen présente les premières fractures visibles. Une presse¹⁵ (cf. Photo 11) du bloc technique de l'ESPA a été utilisée à cet effet. L'opération a été effectuée sur trois briquettes pour chaque composition. La moyenne des trois observations est retenue comme résultat, exprimé en kN.

En plus du test de compression, les briquettes auraient du être soumises à un test de résistance à la traction (*tensile strenght*). La grosseur des briquettes n'a pas permis d'effectuer le test puisque la machine exige un échantillon cylindrique de 5 mm de diamètre tout au plus. Contrairement au test précédent, celui-ci n'a pas de mise en pratique directe mais permet d'avoir une idée sur le niveau de cohésion des particules formant la briquette. D'une manière générale, plus la force nécessaire pour séparer la briquette est importante, plus la cohésion est élevée.

¹⁵ Machine d'essai universelle Wolpert Testwell.



Photo 13 - Presse utilisée pour le test de compression

3.4.3.2 Test de résistance à l'impact

Le test de résistance à l'impact ou de résistance aux chutes ou aux fracassements simule les forces rencontrées lors du déchargement des briquettes du camion vers le sol ou juste lorsqu'elles tombent sur une surface dure. Ce test est plus communément connu sous le terme « drop test ».

Trois méthodes ont été répertoriées par Kaliyan et Morey [8]. La première a été déjà présentée et utilisée durant les travaux préliminaires (cf. 3.3.1.5). La deuxième, la plus couramment utilisée, est la méthode D 440-86 de l'ASTM [34-23]. Elle n'a pas pu être utilisée car nous ne disposons pas des procédures pour l'appliquer. Elle est citée à titre informatif grâce aux références bibliographiques de Li et Liu [23]. La troisième, utilisée par Lindley et Vossoughi [35-8], a été retenue et reprise pour cette étude en raison de sa simplicité d'exécution bien que les dimensions des éprouvettes testées soient différentes. Lindley et Vossoughi [35-8] ont utilisé des briquettes de 50 mm × 18 mm (diamètre × épaisseur). En fait, nous ne disposons plus d'une plaque en acier.

Pour ce faire, la briquette est lâchée 10 fois successives à 1 m au-dessus d'un sol en béton, sans vitesse initiale. Les masses de la briquette avant (M_i) et après (M_f) les 10 jets sont relevées. Quatre briquettes par composition ont été testées. Pour chaque observation, un indice de résistance à l'impact noté **Imp**, exprimé en pour cent, a été défini tel que :

$$\text{Imp} = \frac{M_f}{M_i} \times 100$$

Le résultat est exprimé comme la moyenne des quatre observations. Plus **Imp** est élevé, plus la briquette résiste bien aux impacts dus à son propre poids, donc elle est de bonne qualité.

3.4.3.3 La durabilité

La durabilité, connue aussi comme la friabilité ou la résistance à l'abrasion, est l'expression de l'évolution du fractionnement des produits densifiés soumis à des chocs répétés tels que ceux rencontrés, pour une grande part, lors du transport et dans une moindre mesure lors de la manipulation. Il traduit en fait le potentiel de génération de fines des produits.

Trois méthodes peuvent être utilisées pour déterminer la durabilité d'un produit densifié : *Tumbling can method*, *Holmen tester method* et *Ligno tester method* [8]. La première méthode est utilisable et a été retenue pour cette étude étant donné que les deux autres nécessitent un appareillage spécial n'existant pas à Madagascar. La *tumbling can method* consiste à soumettre les éprouvettes à des chocs répétés en les plaçant dans un tambour rotatif muni d'une tôle de brassage ou chicane. Durant la rotation, les briquettes culbutent, entrent en collision entre elles mais aussi avec les parois du récipient. Plusieurs auteurs ont utilisé la *tumbling can method* avec des variations au niveau de la vitesse et de la durée de rotation, de la forme du récipient ainsi que du nombre d'échantillons introduits dans le tambour.

Pour cette étude, le nombre d'éprouvettes à introduire dans le tambour, la vitesse et la durée de rotation employés par Li et Liu [23] ont été choisis: trois éprouvettes, 60 tours par minute pendant 40 minutes. Il s'agit en fait d'une adaptation de la méthode standard D 441-86 de l'ASTM [36-23] sur le charbon minéral.

Ainsi, les trois briquettes ont été placées dans un cylindre galvanisé de 30 cm de diamètre et de 30 cm de profondeur muni d'une tôle de brassage de 10 cm ou chicane que nous avons nous-mêmes bricolés (cf. Photo 16). Le récipient est mis en rotation à l'aide d'une tour du bloc technique de l'ESPA (cf. Photo 15). En réalité, la vitesse de rotation dont dispose la tour est de 63 tours par minute, ce qui signifie que les sollicitations sont plus importantes. Les dimensions du cylindre précédent ont été choisies pour être adaptées à cette tour.

Les masses des éprouvettes avant (M_i) et après (M_f) rotation sont relevées. Le résultat est un indice A exprimé en pour cent selon l'expression :

$$A = \frac{M_f}{M_i} \times 100$$

Plus la valeur de A est élevée, plus le pourcentage de fines est moindre. En d'autres termes, la briquette ne « salit » pas lorsque A est élevé.



Photo 16 - Cylindre muni d'une tôle de brassage



Photo 14 - Briquettes installées pour le test d'abrasion



Photo 15 - Tour utilisée pour le test d'abrasion

3.5 Les briquettes : un combustible

L'humidité, le pouvoir calorifique, les teneurs en matières minérales, en matières volatiles et en carbone fixe ont été déterminées. En outre, des tests d'ébullition d'eau ont été effectués pour comparer les performances des briquettes par rapport au bois. La plupart de ces mesures et analyses ont été effectuées par l'Institut Universitaire Technologique (IUT) de Tarbes, France.

3.5.1 Détermination de la teneur en eau

L'humidité des briquettes est une donnée essentielle en tant que combustible. Ce paramètre a une influence sur le pouvoir calorifique inférieur, l'efficacité de combustion et la température de combustion [18]. La détermination de l'humidité a été effectuée lorsque les masses des éprouvettes ne variaient presque plus au cours du temps. En général, cette stabilité est atteinte 30 à 33 jours après fabrication. Une briquette pour chaque composition a été utilisée pour la détermination. Cette tâche a été confiée au CNRE. La méthode utilisée a été la méthode par étuvage.

Une autre détermination a été également effectuée par le laboratoire universitaire d'analyse de combustible biomasse (LUACOB) de l'Institut Universitaire Technologique de Tarbes, France. L'humidité du matériau est déterminée selon la norme française relative à la caractérisation des combustibles solides M03-005. Une balance analytique précise à 0.1mg ainsi qu'une enceinte climatique ont été utilisées pour réaliser les essais. Les résultats sont exprimés en pourcentage de la masse totale (% w.b.).

3.5.2 Détermination du pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique d'un combustible est la quantité de chaleur, exprimée en MJ/kg, libérée par la combustion complète en présence d'oxygène et à volume constant d'un échantillon de masse unitaire dans les conditions normales de température (20°C). La vapeur d'eau contenue dans les

gaz de combustion étant condensée, la valeur ainsi obtenue est définie comme le « pouvoir calorifique supérieur » (PCS). Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) est calculé en déduisant la chaleur de vaporisation de l'eau contenue dans l'échantillon (cas général de l'industrie). Le PCI est, jusqu'à présent, la valeur la plus utilisée en matière de combustion. Ces mesures ont été réalisées en suivant une procédure définie par la norme ISO 1928-1976 (E) « combustibles minéraux solides - détermination du pouvoir calorifique supérieur selon la méthode à la bombe calorimétrique, et calcul du pouvoir calorifique inférieur », à l'aide du calorimètre adiabatique Parr 1341EE du laboratoire bois de l'IUT de Tarbes, France.

Dans la bombe calorimétrique, on travaille à volume constant. Or, nous estimons que les briquettes auront plus de chance d'être utilisées en tant que combustibles de chaudières industrielles. Comme la pression dans ces chaudières avoisine la pression atmosphérique, le PCS et le PCI sont marqués d'un indice p (à pression constante). Le PCS_p et le PCI_p d'un bout d'Eucalyptus acheté auprès d'un revendeur de « bois de chauffe » ont aussi été mesurés afin de permettre des comparaisons avec nos briquettes.

3.5.3 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 de taux de cendres pour une combustion complète. Ce paramètre est un critère de qualité d'un combustible. Une briquette par composition a été utilisée. Comme précédemment, deux mesures ont été effectuées : l'une par le CNRE et l'autre par l'IUT Tarbes. Au CNRE, l'échantillon est incinéré dans un four à moufle à 550°C. Le résultat est exprimé en pourcentage de la masse totale de l'échantillon. A l'IUT, chaque échantillon est soumis à un chauffage de 850 °C ± 10 °C pendant au moins 5 h et le résultat est exprimé en pourcentage de la masse anhydre.

3.5.4 Détermination de la teneur en matières volatiles et en carbone fixe

La teneur en matières volatiles du matériau d'essai représente la perte de masse subie par un échantillon anhydre soumis à un chauffage à l'abri de l'air à 950 °C ± 10 °C pendant 10 mn ± 10 s. Cette teneur en matières volatiles est exprimée en pourcentage de la masse anhydre initiale de l'échantillon. La teneur en carbone fixe du matériau d'essai représente le solde des teneurs en matières volatiles et matières minérales par rapport à 100.

3.5.5 Tests d'ébullition d'eau

Les tests d'ébullition d'eau permettent de comparer les performances des briquettes et du bois d'Eucalyptus.

3.5.5.1 Principe

Il s'agit de faire bouillir une quantité donnée d'eau avec une quantité donnée de combustibles. Les performances seront évaluées en termes d'« énergie utile » notée EU exprimée en kJ et de temps nécessaire, en minutes, pour atteindre le point d'ébullition. Dans ces tests, ce point d'ébullition a été fixé à 94°C. L'énergie utile est fonction de la quantité de chaleur accumulée par l'eau entre sa température initiale et sa température d'ébullition et de la chaleur latente de l'eau évaporée. On a donc la formule

$$EU (kJ) = 4.18 \times M_i \times (T_{eb} - T_i) + 2257 \times M_i - M_r \text{ dans laquelle}$$

M_i : Masse d'eau initiale (kg)

T_{eb} : Température d'ébullition (°C)

T_i : Température initiale de l'eau (°C)

M_r : Masse de l'eau restante (kg)

D'autres paramètres ou indicateurs peuvent être étudiés à partir des données de ce test mais seuls les plus simples ont été retenus. Comme le dispositif est fixé, toute source de variation provient de ce fait des combustibles, ce qui permettra la comparaison. Les EU des briquettes et du bois sont alors comparées statistiquement (test t de student sur Excel Stat 2008) pour déterminer si leur différence est significative. En outre, les EU des briquettes de chaque composition ont été également comparées. L'idéal aurait été d'utiliser un foyer à bois comme celui des gargotiers par exemple mais la conformation du foyer ne permettait pas son installation sur la balance de précision. Par ailleurs, les essais en chaudières industrielles ou dans les cantines publiques n'ont pas pu être réalisés du fait de la quantité limitée des éprouvettes fabriquées.

3.5.5.2 Matériels

Les matériels suivants ont été utilisés pour la réalisation du test : un foyer « fatapera », une marmite en aluminium (cocotte 30) de 23 cm de diamètre et de 12 cm de profondeur, les combustibles (briquettes, bois de chauffe), l'eau de la JIRAMA, un thermomètre, une balance de précision. Quatre tests ont été effectués pour chaque combustible. Notons que pour être adapté au fatapera, les briquettes ont dû être divisées en 2 ou 3 petits cylindres de même longueur. De même, le bois a été fendu en morceaux pour convenir au foyer. Toutefois, le combustible bois consiste en un mélange de morceaux de différentes tailles.

3.5.5.3 Déroulement du test

Après essais préliminaires, la masse des combustibles a été fixée à 530 g (± 1 g) et la masse d'eau à 1570 g (± 1 g). Cette masse d'eau correspond à la quantité d'eau remplissant le tiers de la marmite utilisée. L'ignition est réalisée avec 20 g de « kitay menaka ». La marmite est positionnée 2 minutes après ignition. Le test se déroule en deux phases : la phase 1 (avant ébullition) et la phase 2 (ébullition) :

Phase 1 : La température de l'eau est enregistrée toutes les minutes jusqu'à ce qu'elle atteigne 94 °C, correspondant à la température d'ébullition. Le temps nécessaire pour faire passer la quantité d'eau donnée, de la température ambiante au point d'ébullition, est notée TAE ou temps d'atteinte de l'ébullition. En effet, à cette température apparaissent les premières bulles. Quand $T = 94\text{ °C}$, la masse de combustibles restants et celle de l'eau restante sont relevées.

Phase 2 : La température se stabilise autour de 100 °C avec des maxima de 102 à 103 °C. La masse de combustible restants et celle de l'eau restante sont relevées toutes les 10 minutes pendant 30 minutes après l'atteinte du point d'ébullition.

3.6 Détermination du coût de production de la tonne de brique

Cette partie essaie d'évaluer sommairement le coût de production d'une tonne de brique 50 mm $\times$ 150 mm (diamètre $\times$ longueur). La composition de référence utilisée est celle du Pal CFC qui est 180-32-24-36-48. Compte tenu de la disponibilité moyenne journalière en matières premières, l'objectif de production journalier a été fixé à 4000 briques soient 483 kg ou 1.43 m³. Aussi dans l'année, il est produit 125 tonnes de briques, sous les conditions hypothétiques ci-dessous :

- Matières premières disponibles toute l'année
- Intrants : Eau = 720 kg/jour, liant = 128 kg/jour. Ils constituent les coûts fixes.
- Nombre de presse = variable suivant la capacité de production (cf. Tableau 6). Pour cette évaluation, la presse hydropneumatique n'a pas été considérée.
- Charge d'entretien d'une presse = variable suivant la presse 100 000 à 500 000 Ar/an.
- Les chutes massives constituent le combustible utilisé pour la préparation du liant
- Le processus de densification : pesée des matières premières et préparation du liant, mélange, compactage, séchage, entreposage
- Nombre de jours de travail par an = 260
- Nombre d'ouvriers = 4 à 6 suivant le type de presse.
- Salaire mensuel d'un ouvrier = 120 000 Ariary.
- Matériels nécessaires : marmites, brouettes, moules et pistons,...

Toutes les charges sont ramenées annuellement puis divisées par la quantité annuellement produite pour obtenir le coût de production par tonne. Le calcul financier est réalisé hors bâtiments, hors frais généraux, hors bénéfices et hors taxes avec efficacité de 100 %. Les bâtiments sont constitués par les hangars de séchage et de stockage.

Tableau 6 - Variantes de presse utilisable proposées par Ramamonjisoa

Type de presse	Capacité de production (kg/jour)	Prix (Ariary)
Presse à vis	144	1 230 000
Presse à levier (Type presse à brique CINVA-RAM)	300	6 200 000
Semi-hydraulique (Type RASANT)	500	15 200 000
Hydropneumatique	1000	31 200 000

4- Résultats et discussions

4 RÉSULTATS et DISCUSSIONS

4.1 Caractérisation des matières premières

Le tableau 7 présente les résultats de la caractérisation des matières premières utilisées dans cette étude. Il s'agit de l'humidité, de la granulométrie et de la masse volumique en vrac de ces matières. Ce tableau est complété par le tableau 8 qui présente la taille des copeaux et le tableau 9 qui résume la quantité de sous-produits générés par l'usine.

4.1.1 Humidité

Il apparaît que les matières de palissandre sont sèches (humidité autour de 11 % w.b.), rien de surprenant pour une ébénisterie. Pour le pin par contre, les copeaux et les sciures présentent une humidité d'environ 4 fois plus élevée que celle du palissandre pour les mêmes intrants (cf. Tableau 7). Selon Resch et Hoag [37-1], l'humidité optimale des matières premières devrait se situer entre 12-20 % w.b. Aucune humidité des matières premières n'est comprise dans cet intervalle. En densification à haute pression, Li et Liu [23] recommande une humidité de 6 à 12%. Seules les matières premières de palissandre peuvent alors être utilisées de suite.

En somme, si on considère uniquement le critère humidité (cf. Tableau 1), les copeaux et les sciures de palissandre peuvent être utilisés directement en densification sans liant. Le choix entre un procédé sans liant et avec liant porte alors notamment sur les coûts de production et sur les qualités du produit recherchées, ces dernières correspondant aux exigences d'un utilisateur clairement défini.

Les copeaux et la sciure de pin doivent impérativement être séchés pour pouvoir être utilisés en densification sans liant. Mais cette étude veut démontrer qu'ils sont utilisables tels quels avec le procédé utilisé et mis au point.

4.1.2 Granulométrie

▪ *Les copeaux*

Si les proportions en fraction grossière (taille des particules supérieure ou égale à 2 mm) sont à peu près les mêmes pour les copeaux des deux essences, les copeaux de palissandre présentent plus de fraction moyenne (taille des particules comprise entre 0.5 et 2 mm) que ceux du pin (cf. Tableau 7). Les relevés massiques sont présentés à l'Annexe 1. Généralement, les copeaux de pin sont plus grands que ceux du palissandre.

Concernant les refus de tamis T3, les copeaux de pin présentent des dimensions, en moyenne, deux fois plus importantes que ceux du palissandre (cf. Tableau 8). En outre, sur considération des

écarts types respectifs, il apparaît clairement que les copeaux de palissandre sont plus homogènes en termes de taille. 75% des copeaux de palissandre ont une surface inférieure à 96 mm² alors que pour la même proportion, les copeaux de pin ont une surface inférieure à 429.75 mm². Tous les relevés métriques effectués sont présentés à l'Annexe 2 ainsi que la statistique descriptive de la taille des copeaux par essence. Bien que les épaisseurs ne soient pas présentées, nous pouvons affirmer après observation que les copeaux de palissandre sont plus épais que ceux du pin.

▪ Les sciures et les poussières

La sciure de palissandre présente une proportion de particules fines (taille inférieure à 500 µm) presque le double de celle de la sciure de pin. Les trois-quarts des particules de pin sont compris entre 0.5 et 2 mm. Les deux tiers de la sciure de palissandre sont constitués de particules inférieures à 1 mm. Ainsi, on peut affirmer que les particules de pin sont plus grandes que les particules de palissandre. L'humidité élevée du pin pourrait constituer une explication à cette différence. En général, les sciures des deux essences sont utilisables en densification sans liant (cf. Tableau 1) mais il faut recourir au séchage pour le pin.

Avec l'outillage à disposition, il n'a pas été décelé de grande différence au niveau de la granulométrie des poussières. Les pertes sont constituées de particules très fines facilement emportées par le vent.

Tableau 7 - Résultats de la caractérisation des matières premières

Paramètres	Unité	<i>Pinus kesiya</i>			<i>Dalbergia monticola</i>		
		Copeaux	Sciures	Poussière	Copeaux	Sciures	Poussière
Humidité	% w.b.	46.41	44.77	11.2	11.05	10.8	10.9
G₃	%	80	-	-	70	-	-
G₂	%	5	2	-	11	5	-
G₁	%	5	37	-	8	25	-
G_{0.5}	%	2.5	38	4	4	39	3
R	%	3.75	17	95	3	30	97
P	%	3.75	6	1	4	1	0
MV en vrac	kg/m³	55	242	312	86	327	308
Ec. type	kg/m³	0.005	0.006	0.006	0.004	0.01	0.004

Tableau 8 - Taille des copeaux du tamis T₃ (mm)

Pinus kesiya						
Dimensions	Moyenne	Écart type	Maximale	L × l max	L × l min	Q 3 ¹⁶ S (mm ²)
Longueur	21.07	9.70	55	47 × 23	5 × 3	429.75
largeur	12.72	5.29	23			
Dalbergia monticola						
Dimensions	Moyenne	Écart type	Maximale	L × l max	L × l min	Q 3 S (mm ²)
Longueur	11.78	3.56	22	22 × 18	4 × 3	96.00
largeur	6.05	2.86	18			

4.1.3 Masse volumique en vrac

Pour les copeaux et la sciure, les masses volumiques en vrac du palissandre sont supérieures à celles du pin bien que ce dernier présente une humidité quatre fois supérieure (cf. Tableau 7). Ce fait est imputable à la densité du bois et à la grosseur des particules de pin, comme l'a démontré le paragraphe précédent, laissant de ce fait beaucoup plus de vides interparticulaires. En effet, rappelons-le, le remplissage du récipient de détermination s'est effectué sans tassement. Les valeurs des 10 séries d'observations par matière première par essence sont présentées à l'Annexe 3.

Il a été estimé que quelques 42 tonnes de copeaux, 29 tonnes de sciure et 15 tonnes de poussière de ponçage sont produits annuellement par l'usine (cf. Tableau 10). Il apparaît ainsi que les copeaux constituent les résidus les plus importants, viennent ensuite les sciures et enfin les poussières. Certes, ces chiffres justifient notre détermination à rechercher une composition qui éviterait tout recours au broyage, mais rien n'empêche, dans ces conditions, d'opter pour une composition privilégiant la sciure surtout si elle donne des produits de qualité supérieure. C'est la raison pour laquelle les produits de différentes compositions ont été comparés. D'après ces quantités, l'usine pourrait produire théoriquement tous les deux jours entre 3800 à 9 000 briquettes selon la composition retenue (cf. Tableau 9). N/m³ traduit le nombre de briquettes de la composition concernée contenues dans un cube virtuel de 1m d'arête.

¹⁶ Q3 : 3^e quartile

Tableau 9 - Quantités théoriques de briquettes pouvant être produites tous les deux jours

Briquettes	Nombre	N/m ³	Quantité (m ³)	Quantité (kg)
Pin CFS	3825	2800	1.37	385
Pal CFS	5100	-	-	-
Pin CFC	9100	2400	3.8	1061
Pal CFC	9100	2800	3.25	1100

Tableau 10 - Quantités de sous-produits générés (kg) par l'usine S. Prix Meubles

	Q	Copeaux	Sciure	Poussière
Tous les 2 jours	max	755	472	236
	min	118	142	95
	moy	437	306	165
Hebdomadaire	max	1 510	944	472
	min	236	284	189
	moy	874	612	330
Annuelle	max	72 480	45 312	22 656
	min	11 328	13 632	9 072
	moy	41 952	29 376	15 840

4.2 Résultats des travaux préliminaires

Il s'agit ici de présenter les résultats des travaux préliminaires qui consistaient à formuler les compositions valides de matières premières pour le pin et pour le palissandre. Deux cas ont été considérés : les compositions à forte proportion en sciures et les compositions à forte proportion en copeaux

4.2.1 Compositions à forte proportion en sciures (CFS)

La composition de départ du tableau 4 a été testée pour le palissandre et il s'est avéré que celle-ci est valide. Cette composition est donc utilisable pour fabriquer des briquettes de palissandre à forte proportion en sciures (cf. Photo 17 C). Par contre, pour le pin, il a fallu apporter quelques corrections. En effet, on s'est aperçu qu'il fallait diminuer la proportion de copeaux et que le produit était encore collant. La proportion excessive de copeaux est due à leur faible masse volumique en vrac. L'aspect collant est un indicateur d'une insuffisance en fines. Les corrections consistaient alors à diminuer les grosses et augmenter les fines et les moyennes jusqu'à l'obtention d'un produit

satisfaisant. Les compositions finalement retenues, conformément aux critères posés (similitude avec la brique de référence, densité, drop tests) sont présentées au tableau 11. A titre de rappel, les fines, les moyennes et les grosses sont constituées respectivement par la poussière, les sciures et les copeaux. Les masses finales des éprouvettes par composition tournent autour de 30 g (cf. Annexe 4).

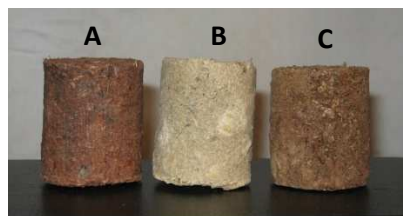


Photo 17 - Les briquettes CFS

Tableau 11 – Les compositions à forte proportion en sciure retenues

Essence	Unité	Composition						Photos
		Eau	Liant	Fines	Moyennes	Grosses	Total	
Eucalyptus	g	47	6	6	15	6	80	17 A
	%	58.75	7.5	7.5	18.75	7.5	100	
Pin	g	40	7	10	20	3	80	17 B
	%	50	8.75	12.5	25	3.75	100	
Palissandre	g	47	6	6	15	6	80	17 C
	%	58.75	7.5	7.5	18.75	7.5	100	

Les tests de comparaison (test *t* de student) des masses volumiques moyennes (cf. Tableau 12) de chaque composition, comparées séparément avec la brique de référence, montrent qu'il n'y a pas de différence significative ($p\text{-value} > 0.05$) entre les masses volumiques de ces compositions. Comme la brique d'Eucalyptus est la brique de référence, sur considération de la densité comme critère de qualité [6], ces tests de comparaison signifiaient alors qu'il est possible d'obtenir des produits de même densité, donc de même qualité, quand bien même l'essence et les données granulométriques et d'humidité des matières premières sont différentes moyennant une composition adéquate. Ce résultat est soutenu par les résultats des drop tests (cf. Tableau 12). Les résultats bruts ayant permis les comparaisons statistiques se trouvent à l'Annexe 4.

Comparées à la masse volumique des briquettes de sciure (442 kg/m^3) de Chin et Siddiqui [17] (7 MPa, mélasse à 25% en masse), nos briquettes sont significativement plus denses, excepté le Pal

CFS où les densités peuvent être considérées comme égales. On pourrait alors penser que la pression de compactage de la presse de Ramamonjisoa est supérieure à celle utilisée par Chin et Siddiqui [17] dans leur étude.

Tableau 12 - Caractéristiques des briquettes CFS

Essence	Dénomination	MV (kg/m ³)	D (%)
Eucalyptus	Eucal CFS	504	100
Pin	Pin CFS	511	100
Palissandre	Pal CFS	473	100

4.2.2 Compositions à forte proportion en copeaux (CFC)

La composition du tableau 5 a été testée sur le pin et le palissandre.

Tableau 13 - Les différents essais CFC et les caractéristiques des produits obtenus

Essence	Composition (g)						MV (g/cm ³)	D ¹⁷ (%)
	Eau	Liant	Fines	Moyennes	Grosses	Total		
Pin	48	8	4	10	10	80	0.324	100
	44	8	6	10	12	80	0.321	100
Palissandre	47	8	5	8	12	80	0.447	100
	45	8	6	10	11	80	0.470	100
	45	8	6	9	12	80	0.469	100

4.2.2.1 Pour le pin

Les remarques après application de la composition du tableau 5 ont été le manque de fines et de moyennes. En outre, les grosses s'individualisaient, signe évident du manque de moyennes. Après correction et compte tenu des critères posés (le moins de fentes possibles, drop test D (%), copeaux en proportion élevée) la composition finalement retenue est : **44-8-6-10-12** (cf. Tableau 13 et Photo 18A). La densité des éprouvettes de cette composition est inférieure à celle du Pin CFS.

¹⁷ Indice du drop test

4.2.2.2 Pour le palissandre

On s'est aperçu que les fines manquaient. L'insuffisance de fines rend difficile la manipulation de la brique et augmente la proportion de reste. On y remédie par augmentation de la proportion en ce composant. Dans l'impératif de maintenir un total de 80 g, il a fallu diminuer la quantité d'eau. Cette décision n'affecte pas la qualité des briquettes car les valeurs des ratios liant-eau, 8/47 et 8/45 pour le palissandre ne sont pas très éloignées. Conformément aux critères posés (le moins de fentes possibles, drop test D (%), copeaux en proportion élevée), la composition finalement retenue pour le palissandre est alors: **45-8-6-9-12** (cf. Tableau 13 et Photo 18 B). Des essais présentant une quantité de copeaux supérieure à 12 g ont été menés mais ne donnaient pas de bons résultats. Les produits qui en résultaient étaient bourrés de fissures.

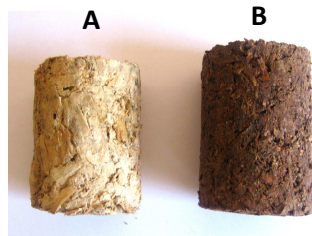


Photo 18 - Les briquettes CFC

4.2.2.3 Densités des produits CFC

Les briquettes Pin CFC et Pal CFC sont moins denses que leurs homologues Pin CFS et Pal CFS. En effet, après compression, les copeaux ont une relaxation élevée du fait de leur taille importante d'autant plus qu'ils se trouvent en proportion élevée dans la composition. Cette relaxation favorise la création de vides à l'intérieur de la brique. Par ailleurs, le Pal CFC est plus dense que le Pin CFC puisque les copeaux de palissandre sont plus petits que les copeaux de pin (cf. 4.1.2). L'emboîtement mécanique dû à la compression est plus favorisé. En définitive, en formulation CFC, la taille des copeaux affecte grandement la composition, elle-même influençant la masse volumique des briquettes. C'est la raison pour laquelle la taille des copeaux a été particulièrement traitée (cf. 4.1.2).

4.2.2.4 Modification du total

A partir des compositions retenues pour chaque essence, il a été déterminé par expérimentation que la quantité de liant diminuée à 6 g donnait les mêmes aspects. Toutefois, cette nouvelle quantité n'a pas pu être retenue dans les essais grandeur réelle. En effet, lorsque la quantité de chaque composant a été multipliée par quatre en prenant comme référence 6 g de liant, il a été remarqué que le liant n'était pas suffisamment visqueux. Ce qui se traduisait pratiquement par un

assemblage difficile des particules. Fort de ce constat, la quantité de liant a été maintenue à 8 g soit 32 g en fabrication grandeur réelle.

Les compositions adéquates permettant de satisfaire les critères d'estime posés ont ainsi été déterminées. Il convient à présent de fabriquer les éprouvettes à taille réelle (50 mm de diamètre et 140-150 mm de long). Pour cela, il a fallu multiplier la quantité de chaque composant par quatre. Les compositions des bûchettes de 50 mm de diamètre sont alors **176-32-24-40-48**¹⁸ (en grammes) pour le pin et **180-32-24-36-48** (en grammes) pour le palissandre pour les compositions CFC et **160-28-40-80-12** pour le Pin CFS.

4.3 La pression de compactage

Pour les trois essais réalisés, l'aiguille a affiché une pression inférieure à 1 MPa. La pression de compactage développée par la presse du bloc technique (cf. Photo 12) a été alors estimée se situant entre **0.7 et 0.9 MPa**. Selon la classification d'Eriksson et Prior [2] sur le niveau de pression, la densification s'est effectuée à basse pression.

4.4 Résultats des briquettes en tant que produit densifié

Cette partie présente les résultats de la caractérisation des produits obtenus et donne une appréciation de leurs qualités physiques.

4.4.1 Masse volumique

Le procédé utilisé donne lieu à des produits dont la densité diffère selon la composition (cf. Tableau 14). Les densités des produits vont de 361kg/m³ pour le Pin CFS à 473kg/m³ pour le Pal CFC. Ces densités sont les densités maximales qu'on peut obtenir à partir du procédé utilisé. Les tests statistiques montrent que les compositions CFC sont significativement plus denses ($p \text{ value} \leq 0.05$) que la composition CFS de référence. Par conséquent, si la densité est considérée comme un critère de qualité, nous avons donc produit des briquettes de qualité meilleure. Les relevés massiques en fonction du temps, les longueurs et les éléments de calcul de la densité pour chaque composition sont présentés à l'Annexe 5.

Toutefois, ces résultats sont assez surprenants car on avait espéré que les briquettes CFS seraient les plus denses à cause d'une plus grande proportion en particules fines. Ce caractère aurait dû permettre une réduction de volume conséquent. C'est également la raison pour laquelle la briquette Pin

¹⁸ Quantité d'eau, de liant, de fines, de moyennes et de grosses

CFS a été retenue comme une briquette de référence pour être comparée aux briquettes CFC. Puisque la ligne de densification a été la même, la source de variation ne pourrait provenir que de la composition elle-même sauf erreur de pesée des ingrédients ou autre manipulation. Comparées à la densité des briquettes de sciure de Chin et Siddiqui [17], nos produits sont moins denses. Ce qui est normal vu que la pression appliquée ait été de 0.7 à 0.9 MPa. En densification à haute pression, les densités, bien que variantes selon la technologie, sont comprises entre 800 et 1400 kg/m³ [6],[8],[10], [23]. En outre, le comité européen de normalisation exige comme norme une densité supérieure à 1000 kg/ m³ [5].

4.4.2 Masse volumique en vrac

Pour un même volume, les briquettes de Pal CFC sont plus « lourdes » que les briquettes des deux autres compositions (cf. Tableau 14). Ce qui se traduirait pratiquement comme suit : si les briquettes sont vendues par unité de masse et non par unité de volume, on opterait pour les briquettes Pal CFC. Une masse volumique en vrac élevée serait alors souhaitable voire recherchée pour minimiser les coûts de transport.

Tableau 14 - Caractéristiques des produits densifiés

Paramètres	Unité		Pin CFS	Pin CFC	Pal CFC
Longueur	mm	Moy	141.51	156.59	140.97
		Ec.Type	8.79	8.40	3.76
Masse finale	g	Moy	100.4	116.44	120.93
		Ec.Type	7.96	10.37	5.40
Masse volumique	kg/m³	Moy	361.5	379.05	437.22
		Ec.Type	17.70	28.68	18.42
Masse volumique en vrac	kg/m³		281.12	279.46	338.6

4.4.3 Propriétés physiques

Rappelons que ces propriétés physiques sont traduites en termes de solidité et de durabilité. Il s'agit en fait de simulations des forces rencontrées lors de l'entreposage, de la manipulation et du transport des produits. Les résultats sont présentés au tableau 15.

4.4.3.1 Test de compression

Il faudrait une charge de 260 kg au dessus d'une briquette de Pin CFS et de Pal CFC pour que celles-ci commence à présenter des fractures. Le Pin CFC se fissure sous l'action d'une charge verticale de 177 kg (cf. Tableau 15). Ce qui signifierait que la briquette sise en bas de pile peut supporter environ entre 1500 à 2000 briquettes placées bout-à-bout en hauteur, soit une hauteur d'environ 21 m. Sur le plan pratique, les briquettes produites peuvent être alors considérées comme étant de bonne qualité eu égard du test de compression. En outre, puisque la charge cassant la briquette Pin CFC est plus petite que celle fissurant les deux autres compositions, on peut penser que le niveau de cohésion des particules à l'intérieur de cette briquette CFC est donc faible. Ceci pourrait être attribué à la grosseur des copeaux de pin qui constitueraient des faces de glissement qui favoriseraient le délitage. Les différents relevés par composition sont présentés en Annexe 6.

4.4.3.2 Test de résistance à l'impact

L'indice *Imp* est supérieur à 99 % pour toutes les compositions (cf. Tableau 15). Les chocs provoqués n'ont alors entraîné que des pertes en masse mineures, voire négligeable. Sur la base de ces résultats, les briquettes des trois compositions peuvent donc supporter sans dommages majeurs les chutes et les fracassements lors de leur déchargement et leur emmagasinage. Toutefois, il importe de signaler qu'au cours des tests, une briquette sur les quatre testées pour les compositions CFC s'est scindée en deux demi-cylindres compacts aux environs du 8^e jet. En effet, le risque que l'éprouvette se divise en deux demi-cylindres est assez élevé étant donné qu'elles sont longues de 140 à 150 mm et que l'éprouvette est lâchée sans orientation définie. Nous pensons tout de même que cet incident ne constitue guère un critère de mauvaise qualité. Si elle s'était cassée en menus morceaux, alors dans ce cas la qualité aurait été effectivement médiocre. A l'avenir, l'indice de résistance à l'impact de Richards noté IRI [39-23] serait peut-être plus approprié pour ce test. En effet, cet indice tient compte du nombre de particules dénombrées après un certain nombre de jets. Les valeurs des quatre (04) observations par composition sont présentées à l'Annexe 7.

Tableau 15 - Propriétés physiques des briquettes

Test	Indice	Unité	Pin CFS		Pin CFC		Pal CFC	
			Moyenne	Ec.type	Moyenne	Ec.type	Moyenne	Ec.type
Compression	-	kN	2.63	0.06	1.77	0.25	2.63	0.06
Impact	Imp	%	99.98	0.04	99.87	0.20	99.88	0.14
Abrasion	A	%	99.20	0.16	95.50	4.24	98.11	0.78

4.4.3.3 Test de résistance à l'abrasion

Après rotation à 60 tours. min⁻¹ pendant 40 min, l'indice de résistance à l'abrasion A est compris entre 95.5 % pour le Pin CFC et 99.2 % pour le Pin CFS. En d'autres termes, 4.5 %, 1.9 % et 0.8 % de la briquette de Pin CFC, de Pal CFC et de Pin CFS respectivement sont transformées en fines dus aux chocs rencontrés dans le tambour. A la lumière de ces chiffres, on peut avancer que la cohésion des particules est plus élevée dans le Pin CFS et Pal CFC alors qu'elle est nettement plus faible dans le Pin CFC. Cette conclusion rejoint celles de nombreux auteurs qui ont démontré une corrélation négative entre la taille des particules utilisées et la durabilité du produit résultant pour des mêmes conditions de fabrication [8]. La durabilité est sans doute le test le plus discriminatif pour qualifier les propriétés physiques des produits densifiés. En général, les briquettes peuvent supporter sans dommages les divers chocs et sollicitations rencontrés au cours du transport. Les résultats bruts sont présentés à l'Annexe 8.

La comparaison de nos résultats avec la durabilité des briquettes de sciure de chêne produites par Li et Liu [23] ($T_T^{19} = 98.3\%$) dans les meilleures conditions, à l'exception du Pin CFC, nous permet d'affirmer que notre procédé donne des briquettes de meilleure qualité que celle densifiée à haute pression, et ceci bien que la sollicitation dans le tambour ait été plus importante. Comparées aux résultats de Wamukonya et Jenkins [1] ($T_T = 82.6\%$) dans les meilleures conditions, nos briquettes dépassent largement les leurs en termes de qualité. L'étude démontre alors qu'avec la composition adéquate, il est tout fait possible de produire des briquettes de bonne qualité.

¹⁹ Durabilité par tumbling test

4.5 Résultats des briquettes en tant que combustible

Le tableau 16 récapitule les valeurs de l'humidité, de la teneur en cendres, du pouvoir calorifique des produits densifiés issus des différentes compositions ainsi que de leurs performances en combustion.

4.5.1 Humidité

30 à 33 jours après leur fabrication, les briquettes ont une humidité entre 10 et 11 % w.b. (cf. Tableau 16). En comparaison, le bois d'Eucalyptus commercialisé dans la capitale présente une humidité de 16 %. Il est enregistré une perte de masse d'environ 40 % entre la fabrication et l'humidité d'équilibre. Cet ordre de grandeur est essentiel dans la conception du séchoir, nécessaire afin de raccourcir la durée de séchage. Les différences de valeurs d'humidité (1) et (3) s'expliquent par le fait que les échantillons utilisés pour (3) ont été envoyés environ trois semaines avant la détermination effectuée par le CNRE. Entre-temps, les éprouvettes ont encore « perdu du poids ». Le comité européen de normalisation impose une humidité inférieure à 10 % [5] pour les briquettes de haute qualité à usage domestique. Sur la base de ce critère, nos produits seraient donc presque de haute qualité. Idéalement la teneur en eau doit être inférieure à 20% [6], nos produits correspondent à cet idéal. Pour comparaison, les briquettes produites par Wamukonya et Jenkins [1] ont une humidité finale de 13.3 % w.b. pour la sciure et de 15.1% pour les copeaux (cf. Tableau 2).

4.5.2 Pouvoir calorifique inférieur

Les pouvoirs calorifiques inférieurs des briquettes tournent autour de 15 MJ/kg (cf. Tableau 16). En comparaison, les résultats des tests sur le bois d'Eucalyptus d'une masse volumique d'environ 637kg/m³ donnent une valeur de PCI de 16 MJ/kg. La différence de quantité de chaleur libérée par la combustion complète de ces deux types de combustibles n'est pas très grande. Ceci est imputable en grande partie à la faible teneur en eau (autour de 11 % w.b.) des briquettes malgré leur densité environ 1.5 fois inférieure à celle de l'Eucalyptus. Le comité européen de normalisation insiste pour un PCI égal à 16.9 MJ/kg [5] pour les briquettes de haute qualité à usage domestique. Sur considération du PCI, il y a de grande chance que les briquettes puissent constituer un substitut au bois de chauffe. En densification sans liant, les briquettes de résidus ligneux compactées par presse à vis et manteau chauffant ont un PCI entre 18 et 19 MJ/kg pour une teneur en eau de 7 à 8 % w.b. et une densité de 1250 kg/m³ [6].

4.5.3 Teneur en cendres

Les teneurs en cendres varient fortement avec la méthode utilisée. La détermination de cette caractéristique par le CNRE montre que les teneurs en cendres des briquettes varient fortement entre les compositions (cf. Tableau 16). Celles des compositions CFC sont plus élevées (25 fois plus et 49 fois plus respectivement pour le Pin CFC et le Pal CFC) que celle du Pin CFS. Ces différences sont dues à la densité du bois. En effet, la teneur en cendres des bois légers est comprise entre 0.4 et 0.8 % d.b. alors que pour les bois durs, elle se situe entre 1 et 1.3 % d.b [18]. Ce qui expliquerait la teneur en cendres élevée du Pal CFC par rapport au pin. Pour une même essence, la composition influence la teneur en cendres. Elle semble s'accroître avec la proportion en copeaux. Les briquettes des trois compositions ont une teneur en cendres inférieure à celle de l'Eucalyptus (cf. Tableau16). Le comité européen de normalisation (CEN) exige une teneur en cendres inférieure à 0.7 % d.b. [5] pour les briquettes de haute qualité à usage domestique. Le Pin CFS et le Pin CFC peuvent donc être qualifiés de combustible de haute qualité. Un autre seuil est proposé par Lequeux *et al.* [6] selon lequel, pour les foyers ouverts et les foyers fermés, une teneur en cendres inférieure à 10% de la masse anhydre est un critère de bonne qualité du combustible. Sur considération de ce seuil, nos briquettes peuvent être considérées comme des combustibles de bonne qualité.

Sur la base des analyses effectuées par l'IUT Tarbes, les teneurs en cendres, tout combustible confondu, excèdent de loin la norme imposée par le CEN. Toutefois, on peut dire que les valeurs ne sont pas très dispersées à l'exception de celle du Pin CFC.

4.5.4 Teneur en matières volatiles et en carbone fixe

Les teneurs en matières volatiles des briquettes sont légèrement supérieures à celle du bois (cf. Tableau 16). Mais comme il n'a pas été possible de voir si ces différences sont significatives ou non, nous retiendrons que le bois et les briquettes se consomment à peu près à la même vitesse. La teneur en carbone fixe est surtout utilisée pour qualifier la qualité du charbon. Elle est donnée à titre informatif.

Tableau 16 - Caractéristiques des combustibles

Paramètres	Unité		Pin CFS	Pin CFC	Pal CFC	Eucalyptus
Humidité	% w.b.	(1)	11.01	10.18	10.94	-
	% w.b.	(3)	13.64	11.92	12.16	16.15
PCS_p	MJ/kg		15.95	16.94	16.47	17.41
PCI_p	MJ/kg		14.56	15.55	15.08	16
Teneur en cendres	% w.b.	(1)	0.016	0.50	0.99	-
	% d. b.	(2)	0.018	0.58	1.19	1 - 1.3 [18]
	% d. b.	(3)	2.81	4.05	2.25	2.45
Teneur en matières volatiles	% d. b.		88.25	90.10	86.5	85.8
Teneur en carbone fixe	% d. b.		8.95	5.85	11.25	11.75

(1) : déterminée par le CNRE.

(2) : calculée à partir de la teneur en humidité (% w.b.) et de la teneur en cendres (% w.b.)

(3) : déterminée par l'IUT Tarbes, France.

En somme, les briquettes, toute composition confondue, présentent des caractéristiques voisines de celles du bois, à quelques exceptions près, avec tout de même une proximité plus marquée pour les briquettes Pal CFC. Jusqu'ici, on peut affirmer que le bois peut être substitué sans difficulté majeure par les briquettes quand bien même il est plus dense.

4.6 Résultats des tests d'ébullition d'eau

4.6.1 Énergie utile

L'énergie utile des briquettes excède d'environ 400 kJ celle du bois (cf. Tableau 17). Les tests t de student révèlent que les énergies utiles des briquettes sont significativement supérieures (p-value < 0.05) à l'énergie utile du bois. La différence pourrait s'expliquer par la teneur en eau du bois (environ 16 % w.b.) plus élevée que celle de nos produits (10-11 % w.b.). En effet, une partie de l'énergie libérée par la combustion du bois est utilisée pour « évacuer » cette eau. Ce qui résulte en une quantité de chaleur transférée plus faible. Cette explication est renforcée par un dégagement excessif de fumées de la part du bois observé durant les expérimentations. Les détails de calcul de l'énergie utile sont récapitulés en Annexe 9.

Entre composition, le Pin CFS possède une EU significativement supérieure ($p\text{-value} < 0.05$) comparé aux deux autres compositions. Le dispositif étant le même, la composition constituerait alors la seule source de variation. La sciure brûlerait donc mieux que les copeaux. Ce qui rejoindrait la conclusion tirée des teneurs en cendres respectives des compositions. La composition formulée influencerait donc sur les performances des briquettes.

4.6.2 Le temps d'atteinte de l'ébullition

Le temps d'atteinte de l'ébullition TAE varie d'une composition à une autre (cf. Tableau 17). Pour les briquettes, il se situe entre 6 min 30 s et 9 minutes. Ceci pourrait être attribué à la densité des briquettes (cf. Tableau 14). Plus elle est dense, plus sa vitesse de combustion en une phase donnée (flamme ou braises) est réduite. Comparé au bois, l'utilisation des briquettes permet d'obtenir de l'eau bouillante plus rapidement.

Pour porter l'eau à ébullition, toute composition confondue, environ la moitié des briquettes a été consommée alors que cette consommation est proche des trois quarts pour le bois. Cette différence peut être traduite en termes d'économie d'énergie par rapport au bois. Si on considère qu'en moyenne 270 g de briquette et 395 g de bois donnent le même résultat (i.e l'ébullition de l'eau), ramené au kilogramme, on pourrait approximer que 1 kg de briquettes serait équivalent à 1.46 kg de bois.

En définitive, avec la méthode utilisée, les différents résultats tendent à montrer que les briquettes sont plus performantes que le bois. Ces performances s'observent en termes d'économie d'énergie et de temps. Aussi peuvent-elles se substituer au bois.

Tableau 17 - Résultats des tests d'ébullition d'eau

	Unité		Pin CFS	Pin CFC	Pal CFC	Bois
EU	kJ	Moy	1550	1323	1346	990
		Ec .Type	50	43	76.67	63.62
TAE	min	Moy	6.58	7.27	9.08	9.5
		Ec .Type	0.56	0.20	0.37	0.35
CC 1	g	Moy	267	308	273.6	395
		Ec .Type	27	11.5	27.3	12
	%		50.23	58	51.57	74.3
MEE	g	Moy	487	383.2	392	240
		Ec .Type	25	21	28	24
	%		31	24.4	25	15.3

Légende

EU : énergie utile

TAE : temps d'atteinte de l'ébullition

CC1 : combustible consommés en phase 1

MEE : masse d'eau évaporée en fin de test

4.7 Résultats de l'estimation du coût de production de la tonne de briquettes

Le coût de production de la tonne de briquette Pal CFC est compris entre 1 116 000 et 1 145 000 Ar (cf. Tableau 18). Ces chiffres montrent que la presse utilisée ne semble pas trop influencer le coût de production de la tonne de briquettes. Le choix de la presse tient compte par contre de la commodité des utilisateurs. 90 à 93 % des charges totales sont constitués par le prix des intrants (133 270 000 Ar/an) et notamment le prix de la féculé de manioc (2000 Ar/sachet de 500g). Ramené au kilo, le coût des briquettes serait d'environ 1130 Ar, ce qui dépasse de loin le prix de vente du bois d'Eucalyptus (100 Ar/kg) vendu dans la capitale. Il faudrait impérativement trouver un substitut à la féculé de manioc. Il faudrait se renseigner auprès de Ramamonjisoa puisqu'il a déjà mené des études sur différents liants pour connaître lequel admet approximativement le même pouvoir cohésif que la féculé. Les détails de calcul sont présentés à l'Annexe 10.

Tableau 18 - Résultats de l'estimation du coût de production de la tonne de briquette

Type de presse	Investissements (Ar)	Coût de la tonne (Ar/tonne)
Presse à vis	7 333 000	1 116 200
Presse à levier (type presse à brique CINVA-RAM)	15 943 000	1 145 400
Semi-hydraulique	19 043 000	1 138 550

5- Conclusion

5 CONCLUSION

Ce travail, pionnier au sein de la chaire de technologie du bois de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, se propose de rechercher des voies de valorisation aux déchets connexes des industries de transformation du bois. Pour ce faire, le procédé de densification a été testé. Les matières premières sont constituées de copeaux, sciure et poussière de bois dans l'état tel qu'elles sont produites au sein de l'usine S. Prix Meubles à Ambohidratrimo, c'est-à-dire sans modifications préalables. Les essences étudiées sont le pin et le palissandre. Les paramètres qui entrent en jeu lors de la densification sont la composition et la pression. La composition est définie par les quantités des différents composants tandis que la pression est qualifiée de basse pression.

Dans un premier temps, l'étude vise à formuler une composition qui permette de satisfaire les exigences en termes de solidité de la briquette obtenue. Une presse manuelle de conception simple permettant de produire des briquettes de petites dimensions (40 mm de diamètre et 45-55 mm de longueur) a été utilisée. La pression développée par la presse est inconnue car la presse ne dispose pas de manomètre. La composition de base établie par M. Ramamonjisoa, chercheur au CNRIT, a été d'abord testée puis adaptée aux données de granulométrie et d'humidité des matières premières. Notées compositions à forte proportion en sciure ou CFS, la composition valide est de **40-7-10-20-3** (en grammes) pour le pin. Ces chiffres représentent la quantité en grammes d'eau, de liant, de poussière, de sciure et de copeaux respectivement. Pour le palissandre, la composition valide est de **47-6-6-15-6** (en grammes). Les inventaires effectués au sein de l'usine S. Prix Meubles concernant les quantités de déchets connexes montrent que l'usine produit plus de copeaux (49%) que de sciure (34%) et de poussière (17%), chutes non comprises. C'est ainsi que la composition de M. Ramamonjisoa a été remaniée pour privilégier les copeaux et ainsi convenir aux quantités de résidus disponibles (composition notée CFC, à forte proportion de copeaux). La composition valide est à peu près la même pour les deux essences considérées : **44-8-6-10-12** pour le pin et **45-8-6-9-12** pour le palissandre.

Dans un deuxième temps, ces différentes compositions ont été utilisées dans la fabrication de briquettes de plus grande dimension, susceptibles d'intéresser les consommateurs (50 mm de diamètre, 145 mm de longueur). Cette partie a nécessité la fabrication d'un moule adapté. Les quantités de chaque composition formulées dans la première partie du travail ont été multipliées par quatre. Les briquettes ont été ensuite densifiées à une pression comprise entre de **0.7 à 0.9 MPa**. Si le total a été modifié, il existerait probablement d'autres compositions valides.

Les résultats des tests effectués ont montré que les paramètres de la densification qui ont été proposés permettent d'obtenir des briquettes présentant de bonnes qualités physiques. Tous les

indicateurs de qualité physique sont supérieurs à 95 %. La première hypothèse de ce travail a donc été validée. La masse volumique reste néanmoins faible comparée aux études de Chin et Siddiqui, qui ont également opté pour une densification à basse pression et utilisation de liant. En tant que combustible, les caractéristiques des produits sont intéressantes. En général, la teneur en eau et la teneur en cendres ne sont pas éloignées des normes européennes sur les biocombustibles en général et les produits densifiés en particulier. De plus, le pouvoir calorifique est proche de celui du bois d'Eucalyptus vendu dans nos rues. Toujours en termes de combustion, il a été démontré à travers les tests d'ébullition d'eau que les briquettes ont été plus performantes que le bois aussi bien en termes de chaleur fournie que d'économie de combustibles. Du moins c'est la conclusion qui découle de la méthode utilisée. La deuxième hypothèse de ce travail peut donc être validée. Néanmoins, des tests sur des foyers à bois devraient être entrepris pour s'en assurer définitivement.

Malgré ces résultats encourageants, la troisième hypothèse de ce travail n'a pas été vérifiée. En effet, le coût de la tonne de briquette est estimé à 1 100 000 Ariary soit 1 100 Ariary le kilo. A ce niveau, les briquettes sont loin de concurrencer le bois qui se vend à 100 Ariary le kilo pour les petits consommateurs, en particulier les gargotes, et à 5 000 Ariary le tas pour les grands utilisateurs. 94% de ce coût de production est dû à l'achat de féculles de manioc. Certes la fécule est un bon agent d'agglomération mais il semble impératif de trouver un autre type de liant qui soit accessible à faible coût. On peut penser au *Tacca leontopetaloides* qui, selon A. Rasamindisa, chercheur au FOFIFA, est également réputé pour son pouvoir cohésif. En outre, les études financières et l'étude de marché devraient être poussées en tenant compte des exigences des utilisateurs ciblés en matière de dimensions.

Cette étude montre que le procédé utilisé est pertinent. Son originalité réside dans le fait que ce procédé ne fait acception ni d'essence, ni de granulométrie, ni d'humidité des matières premières. L'application des résultats dans d'autres ébénisteries serait intéressante pour appuyer cette affirmation. Si le procédé possède l'avantage de ne pas consommer d'électricité, son inconvénient majeur est qu'il dépense beaucoup de temps (*time consuming process*). Cette dépense en temps est due à la presse manuelle caractérisée par une faible capacité de production, à la nécessité du mélange des matières premières (surtout le mode de mélange que nous avons mis au point) et au temps de séchage. Il serait ainsi recommandé d'entreprendre des études pour accélérer la vitesse du procédé. Par ailleurs, l'utilisation des briquettes en gazéification et en cogénération devrait également faire l'objet d'étude. L'utilisation des résidus ligneux en particulier et de la biomasse en général devrait prendre de l'ampleur compte tenu des contextes internationaux énergétique et climatique actuels.

6 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] WAMUKONYA, L. and JENKINS, B., 1995, Durability and relaxation of sawdust and wheat-straw briquettes as possible fuels for Kenya, *Biomass and Bioenergy*, 8, pp 175-179.
- [2] ERIKSSON, S. and PRIOR, M., 1990, The briquetting of agricultural wastes for fuel, *FAO Environment and Energy Paper 11*, FAO of the UN, Rome, Italy. Available on www.fao.org
- [3] PIETSCH, W., 2002, Agglomeration processes – phenomena, technologies, equipment, Wiley-VCH, Weinheim, England.
- [4] GOURMAUD, J. et GOULAMHOUSSEN, A., 2009, Bois d'usage quotidien et opportunités d'exportation vers Madagascar, *Projet de licence professionnelle Commerce, Management et Marketing de réseaux de distribution*, ENACOM, Nantes, France, 79 pages
- [5] ALAKANGAS, E., VALTANEN, J. and LEVLIN, J-K., 2006, CEN technical specification for solid biofuels – Fuel specification and classes, *Biomass and Bioenergy*, 30, pp 907-914.
- [6] LEQUEUX, P., CARRE, J., HEBERT, J., LACROSSE, L. et SCHENKEL, Y., 1991, *Energie et Biomasse : La densification*, Presse Agronomique de Gembloux, France.
- [7] TCHOUATE, P. et JEANMART, H., 2005, *La densification de la biomasse, Formation et sensibilisation à la biomasse énergie*, Ouagadougou, Burkina Faso, Présentation personnelle.
- [8] KALIYAN, N. and MOREY, R.V., 2009, Factors affecting strength and durability of densified products, *Biomass and Bioenergy*, 33, pp 337-359.
- [9] GROVER, P. D. and MISHRA, S.K., 1996, *Biomass briquetting: Technology and practices*, Food and Agricultural Organisation of the United Nations, Bangkok, Thailand.
- [10] CATTANEO, D., 2003, Le briquetage: une technique à redécouvrir, *Bois énergie* n°2, pp 43-45.
- [11] 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.
- [12] THOMAS, M., van ZUILICHEM, D.J. and van der POEL, A.F.B., 1997, Physical quality of pelleted animal feed, *Contribution of processes and its conditions*, *Animal Feed Science and Technology*, 64, pp 173 – 192.
- [13] GUNNERMAN, R. W., 1977, Fuel pellets and method for making them from organic fibrous materials, US Patent n° 4,015,951, Washington
- [14] 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.
- [15] REED, T.B., TREFEK, G. and DIAZ, L., 1980, Biomass densification energy requirements in thermal conversion solid wastes and biomass, *American Chemical Society*, Washington D.C.
- [16] AQA, S. and BATTACHARYA, S.C., 1992, Densification of preheated sawdust for energy conservation, *Energy*, Volume 17, Issue 6, 575-578

- [17] CHIN, O. C. and SIDDIQUI, K. M., 2000, Characteristics of some biomass briquettes prepared under modest die pressures, *Biomass and Bioenergy*, 18, pp 223-228.
- [18] OBERNBERGER, I. and THEK, G., 2004, Physical characterization and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behavior, *Biomass and Bioenergy*, 27, pp 653 – 669.
- [19] MAIER, D.E., KELLEY, R.L. and BAKKER-ARKEMA, F.W., 1992, In-line, chilled air pellet cooling, *Feed Management*, 43, pp: 28 – 32.
- [20] TURNER, R., 1995, Bottomline in feed processing: achieving optimum pellet quality, *Feed Management*, Volume 46, pp 60-68.
- [21] FRANKE, M. and REY, A., 2006, Pelleting quality, *World Grain*, pp 78-79.
- [22] MAIER, D.E. and BAKKER-ARKEMA, F.W., 1992, The counterflow cooling of feed pellets, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 53, pp 305 – 319.
- [23] LI, Y. and LIU, H., 2000, High-pressure densification of wood residues to form an upgraded fuel, *Biomass and Bioenergy*, 19, pp 177-186.
- [24] RUMPF, H., 1962, The strength of granules and agglomeration, In: Knepper WA, editor. *Agglomeration*. New York: John Wiley; pp 379-418.
- [25] Van der PLAS, R. J., 2003, PE3- Composante énergie domestique, Banque Mondiale, Antananarivo, Madagascar, Document non publié.
- [26] RAMAMONJISOA, B.S, 1993, La ville aux mille charbonniers, Département des Eaux et Forêts, La série du Département des Eaux et Forêts N° 1, Antananarivo, Madagascar.
- [27] USAID, 2006, Étude sur la consommation et la production en produits forestiers ligneux à Madagascar, Antananarivo.
- [28] [http : //fr.wikipedia.org](http://fr.wikipedia.org)
- [29] SALES, C., 2003, Innovation technologique et valorisation des sous-produits des filières bois, *Bois et Forêts des Tropiques*, n° 277, 3, pp 35 – 43.
- [30] ADEME, 2001, Mesure des caractéristiques des combustibles bois.
- [31] WOOD, J.F., 1987, The functional properties of feed raw materials and the effect on the production and quality of feed pellets, *Animal Feed Science and Technology*, 18, pp 1-17.
- [32] AL-WIDYAN, M.I. and AL-JALIL, H.F., 2001, Stress-density relationship and energy requirement of compressed olive cake, *Applied Engineering in Agriculture*, 17, pp 749 – 753.
- [33] ASTM C 39-36, 1998, Standard test method of compressive strenght of cylindrical concrete specimens, *Annual book of ASTM Standards*, vol 04.02. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials, pp 17-21.
- [34] ASTM D 440-86, 1998, Standard test method of drop shatter test for coal, *Annual book of ASTM Standards*, vol 05.05. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials, pp 188-191.

- [35] LINDLEY, J. A. and VOSSOUGH, M., 1989, Physical properties of biomass briquettes, *Transactions of the ASAE*, 32, pp 361-366.
- [36] ASTM. D 441-86, 1998, Standard test method of tumbler test for coal, Annual book of ASTM standards, vol 05.05. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials, pp 192-194.
- [37] RESCH, H. and HOAG, M. L., 1988, Pelletizing and briquetting wood and bark fuels, Oregon State University, United States of America.
- [38] LEHTIKANGAS, P., 2000, Storage effects on pelletised sawdust, logging residues and bark, *Biomass and Bioenergy*, 19, pp 287 – 293.
- [39] RICHARDS, S. R., 1990, Physical testing of fuel briquettes, *Fuel Processing Technology*, 25, pp 89 -100.

Annexes

Annexe 1 : Relevés massiques pour la granulométrie des matières premières

Pin			T3	T2	T1	T0.5	R	P
Copeaux	M = 80 g	g	64	4	4	2	3	3
		%	80	5	5	2,5	3,75	3,75
Sciure	M = 100 g	g	0	2	37	38	17	6
		%	0	2	37	38	17	6
Poussière	M = 100 g	g	0	0	0	4	95	1
		%	0	0	0	4	95	1
Palissandre			T3	T2	T1	T0.5	R	P
Copeaux	M = 100 g	g	70	11	8	4	3	4
		%	70	11	8	4	3	4
Sciure	M = 100 g	g	0	5	25	39	30	1
		%	0	5	25	39	30	1
Poussière	M = 100 g	g	0	0	0	3	97	0
		%	0	0	0	3	97	0

Annexe 2 : Statistique descriptive de la taille des copeaux

Pin

Statistique	L (mm)	I (mm)	S (mm2)
Nb. d'observations	200	200	200
Minimum	5,000	3,000	15,000
Maximum	55,000	23,000	1081,000
Eff. du minimum	4	3	2
Eff. du maximum	1	1	1
Amplitude	50,000	20,000	1066,000
1er Quartile	15,000	8,000	120,000
Médiane	20,000	12,000	240,000
3ème Quartile	24,000	17,000	429,750

Palissandre

Statistique	L (mm)	I (mm)	S (mm2)
Nb. d'observations	264	264	264
Minimum	3,000	3,000	12,000
Maximum	22,000	18,000	396,000
Eff. du minimum	1	48	2
Eff. du maximum	1	1	1
Amplitude	19,000	15,000	384,000
1er Quartile	10,000	4,000	39,750
Médiane	12,000	5,000	60,000
3ème Quartile	15,000	7,250	96,000
Somme	3109,000	1596,000	20042,000
Moyenne	11,777	6,045	75,917

Annexe 3 : Masse volumique en vrac des matières premières

Pin									
Copeaux									
Essai	M boîte	M totale	M (g)	H (cm)	V (cm3)	ρ (g/cm3)	ρ moy (g/cm3)	SD	ρ moy (kg/m3)
1	84	109	25	5,5	496,375	0,0504	0,0546	0,0049	54,60
2	84	112	28	5,5	496,375	0,0564			
3	84	113	29	5,5	496,375	0,0584			
4	84	115	31	5,5	496,375	0,0625			
5	84	109	25	5,5	496,375	0,0504			
6	84	112	28	5,5	496,375	0,0564			
7	84	112	28	5,5	496,375	0,0564			
8	84	108	24	5,5	496,375	0,0484			
9	84	113	29	5,5	496,375	0,0584			
10	84	108	24	5,5	496,375	0,0484			
Sciure									
Essai	M boîte	M totale	M (g)	H (cm)	V (cm3)	ρ (g/cm3)	ρ moy (g/cm3)	SD	ρ moy (kg/m3)
1	84	205	121	5,5	496,375	0,2438	0,242	0,006	242
2	84	199	115	5,5	496,375	0,2317			
3	84	204	120	5,5	496,375	0,2418			
4	84	206	122	5,5	496,375	0,2458			
5	84	207	123	5,5	496,375	0,2478			
6	84	200	116	5,5	496,375	0,2337			
7	84	201	117	5,5	496,375	0,2357			
8	84	206	122	5,5	496,375	0,2458			
9	84	207	123	5,5	496,375	0,2478			
10	84	204	120	5,5	496,375	0,2418			
Poussière									
N°	M boîte	M totale	M (g)	H (cm)	V (cm3)	ρ (g/cm3)	ρ moy (g/cm3)	SD	ρ moy (kg/m3)
1	84	240	156	5,5	496,375	0,3143	0,3121	0,0059	312,06
2	84	234	150	5,5	496,375	0,3022			
3	84	239	155	5,5	496,375	0,3123			
4	84	241	157	5,5	496,375	0,3163			
5	84	242	158	5,5	496,375	0,3183			
6	84	235	151	5,5	496,375	0,3042			
7	84	236	152	5,5	496,375	0,3062			
8	84	241	157	5,5	496,375	0,3163			
9	84	242	158	5,5	496,375	0,3183			
10	84	239	155	5,5	496,375	0,3123			

Pal

Copeaux										
Essai	M boîte	M totale	M (g)	H (cm)	V (cm3)	ρ (g/cm3)	ρ moy (g/cm3)	SD	ρ moy (kg/m3)	
1	84	128	44	5,5	496,375	0,0886	0,0858	0,0038	85,82	
2	84	128	44	5,5	496,375	0,0886				
3	84	125	41	5,5	496,375	0,0826				
4	84	124	40	5,5	496,375	0,0806				
5	84	127	43	5,5	496,375	0,0866				
6	84	124	40	5,5	496,375	0,0806				
7	84	126	42	5,5	496,375	0,0846				
8	84	129	45	5,5	496,375	0,0907				
9	84	129	45	5,5	496,375	0,0907				
10	84	126	42	5,5	496,375	0,0846				
Sciure										
Essai	M boîte	M totale	M (g)	H (cm)	V (cm3)	ρ (g/cm3)	ρ moy (g/cm3)	SD	ρ moy(kg/m3)	
1	84	237	153	5,5	496,375	0,3082	0,327	0,0097	327,0	
2	84	241	157	5,5	496,375	0,3163				
3	84	247	163	5,5	496,375	0,3284				
4	84	243	159	5,5	496,375	0,3203				
5	84	247	163	5,5	496,375	0,3284				
6	84	253	169	5,5	496,375	0,3405				
7	84	246	162	5,5	496,375	0,3264				
8	84	251	167	5,5	496,375	0,3364				
9	84	249	165	5,5	496,375	0,3324				
10	84	249	165	5,5	496,375	0,3324				
Poussière										
Essai	M boîte	M totale	M (g)	H (cm)	V (cm3)	ρ (g/cm3)	ρ moy (g/cm3)	SD	ρ moy(kg/m3)	
1	84	237	153	5,5	496,375	0,3082	0,3084	0,0044	308,4	
2	84	234	150	5,5	496,375	0,3022				
3	84	239	155	5,5	496,375	0,3123				
4	84	241	157	5,5	496,375	0,3163				
5	84	238	154	5,5	496,375	0,3102				
6	84	237	153	5,5	496,375	0,3082				
7	84	236	152	5,5	496,375	0,3062				
8	84	235	151	5,5	496,375	0,3042				
9	84	235	151	5,5	496,375	0,3042				
10	84	239	155	5,5	496,375	0,3123				

Annexe 4 : Calcul densité des briquettes CFS

Eucal							
N°	L (mm)	D (mm)	M (g)	V (mm3)	V (cm3)	MV (g/cm3)	MV (kg/m3)
1	51	40	30,8	64056	64,056	0,481	480,829
2	47	40	31,7	59032	59,032	0,537	536,997
3	50	40	30,9	62800	62,8	0,492	492,038
4	48	40	30,4	60288	60,288	0,504	504,246
5	50	40	29,8	62800	62,8	0,475	474,522
6	48	40	29	60288	60,288	0,481	481,024
Moy.	49		30,43			0,495	494,943
SD	1,55		0,940			0,023	23,123

Pin							
N°	L (mm)	D (mm)	M (g)	V (mm3)	V (cm3)	MV (g/cm3)	MV (kg/m3)
1	47	40	30,6	59032	59,032	0,518	518,363
2	51	40	34	64056	64,056	0,531	530,786
3	52	40	33,6	65312	65,312	0,514	514,454
4	43	40	28,4	54008	54,008	0,526	525,848
5	50	40	29,8	62800	62,8	0,475	474,522
6	45	40	28,5	56520	56,52	0,504	504,246
Moy.	48		30,82			0,511	511,370
SD	3,58		2,46			0,020	20,266

Pal							
N°	L (mm)	D (mm)	M (g)	V (mm3)	V (cm3)	MV (g/cm3)	MV (kg/m3)
1	47	40	26,6	59032	59,032	0,451	450,603
2	50	40	33,8	62800	62,8	0,538	538,217
3	52	40	30	65312	65,312	0,459	459,334
4	51	40	30,1	64056	64,056	0,470	469,901
5	53	40	29,8	66568	66,568	0,448	447,663
Moy.	50,6		30,06			0,473	479,514
SD	2,30		2,551			0,037	39,923

Annexe 5 : Déperdition de masse, longueur et masse volumique des briquettes par composition.

Fabriquées le mardi 11 août et mardi 12 août 2009

Pal CFC	M (g)																
Id	03-S.	04-S.	07-S.	08-S.	09-S. am	09-S. pm	11-S.	12-S.	14-S.	28-S.	M finale	S (mm2)	L (mm)	V (mm3)	V (cm3)	MV (g/cm3)	MV (kg/m3)
1	133,9	131,7	128,6	128,4	128,8	127,6	127,6	127,4	127,2	125,7	127,2	1962,5	140	274750	274,75	0,463	462,966
2	131,6	129,1	125,1	125	125,2	123,9	124	123,8	123,3	121,7	121,7	1962,5	140	274750	274,75	0,443	442,948
3	134,8	132,2	127,4	127,4	127,4	126,2	126,2	126	125,6	123,8	123,8	1962,5	140	274750	274,75	0,451	450,591
4	127,1	125,6	123,7	124,3	124,4	123,1	123,3	123,2	123	121,5	121,5	1962,5	140	274750	274,75	0,442	442,220
5	139,9	136,7	129,4	128,7	128,3	126,8	126,2	125,8	125,2	123,4	123,4	1962,5	140	274750	274,75	0,449	449,136
6	127,2	126,7	126	126,2	126,6	125,3	125,1	124,8	124,8	123,6	123,6	1962,5	140	274750	274,75	0,450	449,864
7	138,8	135,6	128,4	127,3	127,7	126,5	125,9	125,6	124,9	123,5	123,5	1962,5	140	274750	274,75	0,449	449,500
8	138,5	135,1	126	124,3	123,6	122,3	120,7	119,9	118,8	118,6	118,6	1962,5	140	274750	274,75	0,432	431,665
9	143,1	140	131,5	129,8	129	127,7	125,9	125,1	123,7	121,1	121,1	1962,5	140	274750	274,75	0,441	440,764
10	141,8	138,9	131,1	130,1	129,6	128,5	127,6	127,1	126,2	124	124	1962,5	140	274750	274,75	0,451	451,319
11	146	143,7	138,8	138,6	138,7	137,6	137,3	137	136,1	134,3	134,3	1962,5	155	304187,5	304,1875	0,442	441,504
12	131,5	129,1	123,2	122,1	122,3	121,2	120,5	120,2	119,6	117,3	117,3	1962,5	140	274750	274,75	0,427	426,934
13	138,1	135,4	127,9	126,1	126,3	125,1	123,6	123,1	122,2	120,9	120,9	1962,5	140	274750	274,75	0,440	440,036
14	136	134	128	126,8	127,2	126,3	125,4	125,3	124,8	123	123	1962,5	140	274750	274,75	0,448	447,680
15	124,7	124	122,6	122,1	122,8	122,1	121,6	121,5	121,2	119,9	119,9	1962,5	140	274750	274,75	0,436	436,397
16	124,3	124	122,6	122	122,8	122	122	121,8	121,4	120,1	120,1	1962,5	140	274750	274,75	0,437	437,125
17	134,3	131,6	124,6	122,5	122,7	121,8	121,6	121	120,2	120	120	1962,5	140	274750	274,75	0,437	436,761
18	134,1	131,1	123,6	121,2	121,7	120,8	120,7	119,5	118,8	119,1	119,1	1962,5	140	274750	274,75	0,433	433,485
19	131,1	128	121,8	120,6	121,2	120,4	120	119,4	118,4	118,7	118,7	1962,5	145	284562,5	284,5625	0,417	417,132
20	123,3	122,8	122	121,7	121,7	121,7	121,5	121,1	120,8	117,8	117,8	1962,5	135	264937,5	264,9375	0,445	444,633
21	129,7	127,3	122,5	121,9	121,8	121,6	120,6	120,4	119,9	118,6	118,6	1962,5	144	282600	282,6	0,420	419,674
22	127,5	125,9	123,6	123,4	123,8	123,1	122,8	122,5	122,1	120,8	120,8	1962,5	140	274750	274,75	0,440	439,672
23	131,8	130,5	128,9	128,7	129,2	128,4	128,3	127,6	127	126,3	126,3	1962,5	145	284562,5	284,5625	0,444	443,839
24	126,9	124,2	119,1	118,3	118,8	117,8	117,6	117	116,3	115,5	115,5	1962,5	140	274750	274,75	0,420	420,382
25	125,6	124,5	123,5	123,3	123,9	123,3	123	122,4	122,1	121,1	121,1	1962,5	131	257087,5	257,0875	0,471	471,046

Annexe 5

26	129,6	128,8	127,8	127,8	128,3	127,7	127,4	126,6	126,2	125,2	125,2	1962,5	145	284562,5	284,5625	0,440	439,974	
A	122,4	122,3	122	121,7	122,6	121,7	121,6	121,1	120,8	120,1	120,1	1962,5	143	280637,5	280,6375	0,428	427,954	
B	117,5	117,2	117	116,5	117,6	116,5	116,6	116,4	115,9	115,5	115,5	1962,5	145	284562,5	284,5625	0,406	405,886	
C	114,1	113,9	113,7	112,9	114,3	113	113,3	112,9	112,5	112,5	112,5	1962,5	143	280637,5	280,6375	0,401	400,873	
D	118	118	117,8	117,2	118,3	117,1	117,3	117	116,6	116	116	1962,5	141	276712,5	276,7125	0,419	419,208	
E	132,8	132,7	131,9	131,6	132,6	131,6	131,4	131,1	130,56	129,9	129,9	1962,5	143	280637,5	280,6375	0,463	462,875	
H	129	128,8	128,4	128,2	129,1	128,2	128	127,6	126,9	126,5	126,5	1962,5	140	274750	274,75	0,460	460,419	
First	104,8	104,8	104,5	104,1	105,1	104,1	104,2	104,1	103,6	103,2	103,2	1962,5	137	268862,5	268,8625	0,384	383,839	
										Moy.	120,93	Moy.	140,97			Moy.	0,437	437,221
										SD	5,40	SD	3,76			SD	0,018	18,423

Fabriquées le Jeudi 13 Août et Vendredi 14 Août 2009

Pin CFC		M (g)										M	S	L	MV		
Id	03-S.	04-S.	07-S.	08-S.	09-S.	09-S.	11-S.	14-S.	18-S.	28-S.	finale	(mm2)	(mm)	V (mm3)	V (cm3)	(g/cm3)	(kg/m3)
1	124,6	123,6	122,3	121,4	122,6	121,1	121,4	120,9	120,8	120,3	120,3	1962,5	160	314000	314	0,383	383,12
2	123,1	121,7	119,7	118,8	120,1	118,6	118,7	118,4	118,1	117,6	117,6	1962,5	165	323812,5	323,8125	0,363	363,17
3	124,7	121,6	117,8	116,8	118,1	116,4	116,6	116,2	116	115,4	115,4	1962,5	160	314000	314	0,368	367,52
4	121,5	120,9	120,1	119,3	120,4	119,1	119,1	118,7	118,5	117,9	117,9	1962,5	157	308112,5	308,1125	0,383	382,65
5	124,1	121,4	118,3	117,2	118,7	116,9	117	116,7	116,4	115,9	115,9	1962,5	162	317925	317,925	0,365	364,55
6	133,3	131,4	128,9	128,3	129,4	127,7	127,9	127,3	127,1	126,3	126,3	1962,5	162	317925	317,925	0,397	397,26
7	136,9	133,3	126,7	125,7	126,7	125,1	124,9	124,1	123,8	123,3	123,3	1962,5	172	337550	337,55	0,365	365,28
8	135,5	133,9	131,3	130,7	131,4	130,4	130,1	129,3	129	128,3	128,3	1962,5	168	329700	329,7	0,389	389,14
9	124,4	122,5	119,5	119	120	118,9	118,7	118,1	117,8	117,1	117,1	1962,5	162	317925	317,925	0,368	368,33
10	133,6	132	129,5	129,1	130,2	128,9	128,6	128,1	127,8	127	127	1962,5	160	314000	314	0,404	404,46
11	123,2	121,4	120,7	118,5	119,4	118,2	118	117,4	117,2	116,6	116,6	1962,5	148	290450	290,45	0,401	401,45
13	113,1	110,2	104,9	104,3	105,1	103,8	103,8	103	102,8	102,8	102,5	1962,5	169	331662,5	331,6625	0,309	309,05

Annexe 5

14	145,6	144,2	141,7	141,5	142	140,9	140,7	139,8	139,4	138,7	138,7	1962,5	157	308112,5	308,1125	0,450	450,16	
15	140,5	138,9	136,3	136,1	136,7	135,7	135,4	134,6	134,3	133,6	133,6	1962,5	161	315962,5	315,9625	0,423	422,83	
16	110,7	107,6	102,5	101,8	102,8	101,6	101,5	100,6	100,6	90,7	100	1962,5	160	314000	314	0,318	318,47	
17	122,9	122,6	121,9	121,4	122,4	121,1	121,2	120,6	120,4	120	120	1962,5	160	314000	314	0,382	382,17	
18	132,2	131,8	130,7	130,5	131,3	130,1	130,1	129,5	129,2	128,7	128,7	1962,5	165	323812,5	323,8125	0,397	397,45	
19	117,8	116,9	115,4	115,2	115,9	115	114,7	113,6	113,7	113,2	113,2	1962,5	155	304187,5	304,1875	0,372	372,14	
20	138,2	137,5	136	136	136,6	135,6	135,3	134,3	133,9	133,6	133,6	1962,5	167	327737,5	327,7375	0,408	407,64	
21	127,9	127,4	126,2	126,2	126,9	126,1	125,6	124,4	124,5	124	124	1962,5	152	298300	298,3	0,416	415,69	
22	135,1	134,5	133,2	133	133,9	132,8	132,6	131,3	131,1	130,8	130,8	1962,5	165	323812,5	323,8125	0,404	403,94	
23	117	116,9	116,8	116,2	117,2	116	116	115,6	115,3	115,1	115,1	1962,5	146	286525	286,525	0,402	401,71	
24	113,8	113,7	113,4	113	114	112,7	112,8	112,4	112,1	111,7	111,7	1962,5	141	276712,5	276,7125	0,404	403,67	
25	105,4	105,3	105	104,4	105,6	104,2	104,3	103,9			104	1962,5	140	274750	274,75	0,379	378,53	
26	103,9	103,9	103,4	102,8	104	102,7	102,6	102,3			102,4	1962,5	140	274750	274,75	0,373	372,70	
27	117,4	117,4	117	116,2	117,6	116	116,2	115,6	115,5	115,2	115,2	1962,5	154	302225	302,225	0,381	381,17	
28	111,5	111,4	111,1	110,5	111,6	110,3	110,4	109,6	109,6	109,3	109,3	1962,5	152	298300	298,3	0,366	366,41	
29	111,8	111,5	111	110,7	111,7	110,4	110,4	109,9	109,6	109,3	109,3	1962,5	160	314000	314	0,348	348,09	
30	115,1	114,8	114,1	113,9	115	113,7	113,6	113,4	113	112,8	112,8	1962,5	146	286525	286,525	0,394	393,68	
31	114,2	114,3	113,6	112,9	114,4	112,9	113	112,7	112,4	112,1	112,1	1962,5	155	304187,5	304,1875	0,369	368,52	
32	104,7	104,6	104,4	103,7	105	103,5	103,7	103,1			103,4	1962,5	150	294375	294,375	0,351	351,25	
33	109,8	109,7	109,2	108,9	109,6	108,7	108,6	107,7	107,7	107,4	107,4	1962,5	150	294375	294,375	0,365	364,84	
34	104,2	103,9	103,5	103	103,9	103	102,9	102,3	102,1	102	102	1962,5	148	290450	290,45	0,351	351,18	
35	105,1	105,1	104,9	104,1	105,3	104,1	104,2	103,5	103,4	103,3	103,3	1962,5	155	304187,5	304,1875	0,340	339,59	
											Moy.	116,44	Moy.	156,59		Moy.	0,379	379,05
											SD	10,37	SD	8,40		SD	0,029	28,68

Fabriquées le vendredi 7 août et le lundi 10 août 2009

Pin CFS	M (g)																
Identification	03-S.	04-S.	07-S.	08-S.	09-S. am	09-S. pm	11-S.	12-S.	14-S.	28-S.	M finale	S (mm2)	L (mm)	V (mm3)	V (cm3)	MV (g/cm3)	MV (kg/m3)
1	104,5	103,3	102,4	101,6	102,9	101,3	101,3	100,8	100,8	100,2	100,2	1962,5	140	274750	274,75	0,365	364,70
2	105,2	104,2	103,3	102,5	103,4	102,3	102,2	101,8	101,7	101,1	101,1	1962,5	142	278675	278,675	0,363	362,79
3	108,8	107,1	103,5	102,9	103,5	102,6	102,3	101,5	101,4	100,7	100,7	1962,5	135	264937,5	264,9375	0,380	380,09
4	107,8	106	102,7	102,1	102,8	101,5	101,6	101	100,9	100,2	100,2	1962,5	145	284562,5	284,5625	0,352	352,12
5	93,4	92,6	91,8	91,2	92,2	90,9	91	90,5	90,6	89,4	89,4	1962,5	125	245312,5	245,3125	0,364	364,43
6	121,1	119,7	118	118,2	118,5	116,9	116,7	116,4	116	115,3	115,3	1962,5	162	317925	317,925	0,363	362,66
7	109,7	109,5	109,5	108,9	109,9	108,5	108,5	108,1	107,9	107,3	107,3	1962,5	158	310075	310,075	0,346	346,05
8	106,9	105,1	102,5	101,9	102,9	101,5	101,3	100,7	100,7	99,9	99,9	1962,5	135	264937,5	264,9375	0,377	377,07
9	102	100,5	98,9	98,4	99,1	98,1	98	97,6	97,4	96,7	96,7	1962,5	140	274750	274,75	0,352	351,96
10	112,5	110,6	107,1	106,3	107,2	106,1	105,7	105,3	105,2	104,5	104,5	1962,5	144	282600	282,6	0,370	369,78
11	114,4	101	109	108,6	109,4	108,1	107,8	107,3	107,1	106,3	106,3	1962,5	147	288487,5	288,4875	0,368	368,47
12	103,2	102,8	102,3	101,8	102,7	101,5	101,4	100,8	100,4	100	100	1962,5	145	284562,5	284,5625	0,351	351,42
14	123,9	122	119,3	118,5	119,6	118,1	117,9	117,4	117	116,1	116,1	1962,5	165	323812,5	323,8125	0,359	358,54
15	106,7	106,6	106,1	105,6	106,6	105,4	105,3	104,7	104,6	104,1	104,1	1962,5	157	308112,5	308,1125	0,338	337,86
16	92	91,5	90,9	90,6	91,5	90,5	90,3	89,7	89,5	89,6	89,6	1962,5	137	268862,5	268,8625	0,333	333,26
17	108,7	107,3	105,6	105	106,1	104,8	104,6	104,3	104,1	103,5	103,5	1962,5	140	274750	274,75	0,377	376,71
18	89,5	89	88,4	87,7	88,8	87,6	87,6	87,3	87,2	87,3	87,3	1962,5	128	251200	251,2	0,348	347,53
19	112,9	111,1	108,8	108	109,3	107,8	107,7	107,4	106,2	106,4	106,4	1962,5	150	294375	294,375	0,361	361,44
20	112,3	110,1	106,2	105,3	106,4	105	104,9	104,3	103,9	103,4	103,4	1962,5	144	282600	282,6	0,366	365,89
21	94,4	94,2	94,2	93,4	94,7	93,2	93,4	93	92,8	91,4	91,4	1962,5	140	274750	274,75	0,333	332,67
22	101,1	101,1	100,7	100,2	101	100	99,9	99,6	99,4	98,6	98,6	1962,5	138	270825	270,825	0,364	364,07
23	93,7	93,9	93,8	93,4	94,1	93,1	93,1	92,6	92,5	91,4	91,4	1962,5	137	268862,5	268,8625	0,340	339,95
24	101	101	100,9	100,4	101,4	100,3	100,3	100	99,6	99,4	99,4	1962,5	140	274750	274,75	0,362	361,78
25	101,9	101,8	101,6	101,1	102,1	100,9	100,9	100,7	100,1	99,9	99,9	1962,5	143	280637,5	280,6375	0,356	355,98
26	95	94,6	94,3	93,8	94,8	93,5	93,5	93,2	93	92,4	92,4	1962,5	130	255125	255,125	0,362	362,18
27	108,9	106,9	103,8	103,4	104,1	103	102,9	102,4	102,1	101,4	101,4	1962,5	136	266900	266,9	0,380	379,92

Annexe 5

28	98,1	96,7	95	94,6	95,4	94,4	94,3	93,9	93,3	93,1	93,1	1962,5	130	255125	255,125	0,365	364,92	
29	110,3	108,9	106,9	106,4	107,3	106,2	106,2	105,8	105,3	104,7	104,7	1962,5	140	274750	274,75	0,381	381,07	
30	108,5	106,9	105,3	104,9	105,8	104,6	104,5	104	103,7	103,1	103,1	1962,5	140	274750	274,75	0,375	375,25	
31	88,2	86,9	85,8	85,4	86,3	85,2	85,1	85	84,4	84,8	84,8	1962,5	130	255125	255,125	0,332	332,39	
32	103,8	103,7	103,2	102,4	103,8	102,3	102,4	101,9	101,6	101,4	101,4	1962,5	142	278675	278,675	0,364	363,86	
33	117,6	115,7	113,6	112,7	113,9	112,6	112,5	112,2	111,4	110,9	110,9	1962,5	147	288487,5	288,4875	0,384	384,42	
34	124,4	124,3	124,1	123,4	124,7	123,2	123,2	122,8	122	121,5	121,5	1962,5	145	284562,5	284,5625	0,427	426,97	
35	99,6	99,5	99,4	98,6	100	98,6	98,7	98,3	98,1	97,9	97,9	1962,5	140	274750	274,75	0,356	356,32	
36	103,5	103,1	102,2	101,4	102,8	101,4	101,6	101,3	100,9	100,6	100,6	1962,5	143	280637,5	280,6375	0,358	358,47	
37	102,7	101,9	101,6	100,8	102,2	100,7	101	100,7	100,1	100	100	1962,5	143	280637,5	280,6375	0,356	356,33	
38	92,4	91,9	91,4	91,1	92,2	91	91,1	90,7	90,6	90,3	90,3	1962,5	133	261012,5	261,0125	0,346	345,96	
										Moy.	100,40	Moy.	141,51			Moy.	0,361	361,49
										SD	7,96	SD	8,79			SD	0,018	17,70

Annexe 6 : Résultats bruts du test de compression

Pin CFS				
Ech n°	daN	N	kgf	kN
31	260	2600	265,2	2,6
16	260	2600	265,2	2,6
18	270	2700	275,4	2,7
Moy.	263,33	2633,33	268,60	2,63
SD	5,77	57,74	5,89	0,06

Pin CFC				
Ech n°	daN	N	kgf	kN
32	200	2000	204	2
25	150	1500	153	1,5
26	180	1800	183,6	1,8
Moy.	176,67	1766,67	180,20	1,77
SD	25,17	251,66	25,67	0,25

Pal CFC				
Ech n°	daN	N	kgf	kN
8	260	2600	265,2	2,6
18	260	2600	265,2	2,6
19	270	2700	275,4	2,7
Moy.	263,33	2633,33	268,60	2,63
SD	5,77	57,74	5,89	0,06

Annexe 7 : Résultats bruts des tests de résistance à l'impact

PinCFS			
Ech n°	Mi (g)	Mf (g)	D (%)
2	101,3	101,3	100
4	99,8	99,8	100
26	92,8	92,8	100
36	100,4	100,3	99,9
		Mean	99,98
		SD	0,04

Pin CFC			
Ech n°	Mi (g)	Mf (g)	D (%)
2	117,9	117,9	100
4	118,2	117,4	99,6
5	116,2	116,2	100
30	113,1	113	99,9
		Moy.	99,87
		SD	0,20

Pal CFC			
Ech n°	Mi (g)	Mf (g)	D (%)
2	121,5	121,5	100
4	121,1	121,1	100
9	121,1	120,8	99,75
25	121,3	121	99,75
		Moy.	99,88
		SD	0,14

Annexe 8 : Résultats bruts du test de résistance à l'abrasion

Pin CFS			
Ech n°	Mi (g)	Mf (g)	A (%)
21	92,3	91,4	99,02
23	92	91,4	99,35
5	90,1	89,4	99,22
		Moy.	99,20
		SD	0,16
Pin CFC			
Ech n°	Mi (g)	Mf (g)	A (%)
34	102	100,7	98,73
13	102,5	99,5	97,07
16	100	90,7	90,70
		Moy.	95,50
		SD	4,24
Pal CFC			
Ech n°	Mi (g)	Mf (g)	A (%)
12	118,5	117,2	98,90
17	119,1	116,8	98,07
20	120,8	117,6	97,35
		Moy.	98,11
		SD	0,78

Annexe 9 : Calcul de l'énergie utile

Pin CFS							
T initiale	T éb	T éb-Tin	M ini	M évap	Ch accu	Ch La	EU
23,1	94	70,9	1,57	0,45	465,29	1015,65	1480,94
25,2	94	68,8	1,57	0,49	451,51	1105,93	1557,44
25,5	94	68,5	1,57	0,51	449,54	1151,07	1600,61
24,6	94	69,4	1,57	0,49	455,44	1105,93	1561,37
						Moy.	1550,089
						SD	50,051
						CV (%)	3,229
Pin CFC							
T initiale	T éb	T éb-Tin	M ini	M évap	Ch accu	Ch La	EU
23,1	94	70,9	1,57	0,38	465,288	857,66	1322,95
24,5	94	69,5	1,57	0,4	456,101	902,8	1358,90
22,8	94	71,2	1,57	0,39	467,257	880,23	1347,49
22	94	72	1,57	0,35	472,507	789,95	1262,46
						Moy.	1322,95
						SD	43,03
						CV (%)	3,25
Pal CFC							
T initiale	T éb	T éb-Tin	M ini	M évap	Ch accu	Ch La	EU
24,5	94	69,5	1,57	0,415	456,10	936,7	1392,76
24	94	70	1,57	0,352	459,38	794,5	1253,85
24,1	94	69,9	1,57	0,379	458,73	855,4	1314,13
21,6	94	72,4	1,57	0,42	475,13	947,9	1423,07
						Moy.	1345,95
						SD	76,67
						CV (%)	5,70
Bois							
T initiale	T éb	T éb-Tin	M ini	M évap	Ch accu	Ch La	EU
24,6	94	69,4	1,57	0,273	455,44	616,16	1071,61
26,4	94	67,6	1,57	0,25	443,63	564,25	1007,88
24,4	94	69,6	1,57	0,21	456,76	473,97	930,73
25	94	69	1,57	0,22	452,82	496,54	949,36
						Moy.	989,89
						SD	63,62
						CV (%)	6,43

T éb : Température d'ébullition, °C

M évap : Masse d'eau évaporée, grammes

Tin : Température initiale de l'eau, °C

Ch accu : Chaleur accumulée, kilojoules

M ini : Masse initiale de l'eau, grammes

Ch La : Chaleur latente, kilojoules

Annexe 10 : Coût de la tonne de brique**Presse à vis****Intrants**

Désignation	Unité	Quantité	PU (Ar)	Montant (Ar/jr)	Montant Ar/an
Eau	m3	0,72	800	576	149760
Liant	kg	128	4000	512000	133120000
					133269760

Investissements**Amortissement**

Désignation	Quantité	PU (Ar)	Montant (Ar)	Durée vie (ans)	Valeur (Ar/an)
Balance	1	70000	70000	4	17500
Sacs en polypropylène GM	10	1500	15000	1	15000
Brouettes	2	60000	120000	3	40000
Marmite	3	50000	150000	5	30000
Sotrobe	4	2000	8000	5	1600
Sachets	500	100	50000	1	50000
Presse	3	1230000	3690000	10	369000
Moule et piston	24	120000	2880000	10	288000
Démouleur*	1	50000	50000	10	5000
Maintenance matériels	3	100000	300000		300000
		Total Invest	7333000		1116100

Charges salariales

Nombre	Salaire unitaire	Montant (Ar/mois)	Montant (Ar/an)
8	120000	960000	11520000

Récapitulation

Désignation	Montant (Ar/an)	%
Intrants	133269760	91,34
Amortissement	1116100	0,76
Salaire	11520000	7,90
Total	145905860	100,00
Brique (tonnes/an)	125.54	
Coût production (Ar/tonne)	1162200	
Coût production (Ar/kg)	1162.2	

Presse à levier**Intrants**

Désignation	Unité	Quantité	PU (Ar)	Montant (Ar/jr)	Montant Ar/an
Eau	m3	0,72	800	576	149760
Liant	kg	128	4000	512000	133120000
					133269760

Investissements**Amortissement**

Désignation	Quantité	PU (Ar)	Montant (Ar)	Durée vie (ans)	Valeur (Ar/an)
Balance	1	70000	70000	4	17500
Sacs en polypropylène GM	10	1500	15000	1	15000
Brouettes	2	60000	120000	3	40000
Marmite	3	50000	150000	5	30000
Sotrobe	4	2000	8000	5	1600
Sachets	500	100	50000	1	50000
Presse	2	6200000	12400000	10	1240000
Moule et piston	24	120000	2880000	10	288000
Démouleur*	1	50000	50000	10	5000
Maintenance matériels	2	100000	200000		200000
Total Invest			15943000		1887100

Charges salariales

Nombre	Salaire unitaire	Montant (Ar/mois)	Montant (Ar/an)
6	120000	720000	8640000

Récapitulation

Désignation	Montant (Ar/an)	%
Intrants	133269760	92,68
Amortissement	1887100	1,31
Salaire	8 640 000,00	6,01
Total	143796860	100,00
Briquelette (tonnes/an)	125.54	
Coût production (Ar/tonne)	1154401	
Coût production (Ar/kg)	1154.4	

Presse semi hydraulique**Intrants**

Désignation	Unité	Quantité	PU (Ar)	Montant (Ar/jr)	Montant Ar/an
Eau	m3	0,72	800	576	149760
Liant	kg	128	4000	512000	133120000
					133269760

Investissements**Amortissement**

Désignation	Quantité	PU (Ar)	Montant (Ar)	Durée vie (ans)	Valeur (Ar/an)
Balance	1	70000	70000	4	17500
Sacs en polypropylène GM	10	1500	15000	1	15000
Brouettes	2	60000	120000	3	40000
Marmite	3	50000	150000	5	30000
Sotrobe	4	2000	8000	5	1600
Sachets	500	100	50000	1	50000
Presse	1	15200000	15200000	10	1520000
Moule et piston	24	120000	2880000	10	288000
Démouleur*	1	50000	50000	10	5000
Maintenance matériels	1	500000	500000		500000
		Total Invest	19043000		2467100

Charges salariales

Nombre	Salaire unitaire	Montant (Ar/mois)	Montant (Ar/an)
5	120000	600000	7200000

Récapitulation

Désignation	Montant (Ar/an)	%
Intrants	133269760	93,24
Amortissement	2467100	1,73
Salaire	7200000	5,04
Total	142936860	100,00
Briquelette (tonnes/an)	125.54	
Coût production (Ar/tonne)	1138550	
Coût production (Ar/kg)	1138,55	