

Etude de la transformation du charbon de terre de la Sakoa en combustible domestique

Jean de Dieu Ramaroson (1), Jaconnet Oliva Andrianaivoravelona (2), Rijalalaina Rakotosaona (2), Jean Luc Rasoanaivo (3), Phillipe Andrianary (2), Lala Andrianaivo (2), Hery Mikaela Ratsimbazafy (1),

(1) Centre National de Recherches Industrielle et Technologique, Département Matériaux et Génie Civil, BP 6294
Fiadanana/Tsimbazaza Antananarivo ; E-mail : ddramaro@yahoo.fr

(2) École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, BP 1500 Antananarivo 101

(3) Centre National de Recherches Industrielle et Technologique, Département Energétique, BP 6294 Fiadanana/Tsimbazaza
Antananarivo

Résumé

La présente recherche propose du combustible domestique qui pourrait substituer le charbon de bois et le bois de chauffe. Les matières premières utilisées sont le charbon de terre, la fine de charbon de bois et la fécule de manioc. Le procédé de transformation consiste à la cokéfaction de la houille à 900 °C, pendant 12 heures. Le coke ou semi-coke ainsi obtenu est mélangé avec des fines de charbon de bois et de féculés de manioc. Le mélange est, ensuite, pressé avec une force de 8.000 kgf pour obtenir la brique de charbon de terre.

Des enquêtes et essais de cuisson ont été menés auprès des utilisateurs pour déterminer leur degré de satisfaction vis-à-vis du nouveau produit. Enfin, l'analyse environnementale a été réalisée pour cerner les enjeux environnementaux du projet.

Mots clés: Charbon de terre, combustible domestique, cokéfaction, brique de charbon, gaz à effet de serre

1. INTRODUCTION

Madagascar rencontre aujourd'hui des difficultés face à la crise énergétique, que ce soit au niveau de l'électricité, au niveau du prix du carburant ou au niveau des combustibles domestiques.

La hausse de prix du pétrole, y compris le gaz naturel, est la principale cause de l'inflation et de l'insuffisance de l'offre d'énergie par rapport à la demande. Ce sont des blocages pour le démarrage et le développement de notre économie.

La situation économique actuelle de Madagascar la situe parmi les pays les plus pauvres de la planète. C'est pourquoi, le recours aux combustibles de substitution tels que le gaz, le pétrole lampant et l'électricité, n'est pas envisageable pour la majorité des ménages.

Les effets néfastes de ces crises se font sentir sur l'environnement. En effet, face à une ressource énergétique trop chère, les consommateurs n'ont de recours que l'utilisation des ressources naturelles telles que le charbon de bois ou le bois de chauffe.

Ainsi, les pressions sur nos ressources forestières sont de plus en plus fortes pour satisfaire les besoins de chaque ménage en énergie.

Le constat de la situation nous a donné l'idée de la valorisation du charbon de terre de la Sakoa à des fins domestiques. En effet, Madagascar dispose d'énormes ressources naturelles minérales. Le gisement de charbon de terre de la Sakoa en fait partie. Il se trouve dans l'ancienne province de Toliara, région de l'Atsimo-Andrefana, district de Betioky-Atsimo, commune rurale de Soamanonga.

Aussi, nous avons étudié dans le cadre de ce travail, la possibilité de la transformation du charbon de terre de la Sakoa en combustible domestique.

Objectif

Le but de cette étude est la maîtrise technologique de la transformation du charbon de terre de la Sakoa en combustible domestique et son utilisation par les ménages. Par conséquent, il serait utile de faire des analyses socio-économiques et environnementales du projet, afin de démontrer les avantages de la technologie sur ces deux plans.

2. MATERIELS ET METHODES

2.1. Démarche adoptée pour l'étude de la transformation du charbon en combustible domestique

Pour atteindre notre objectif, nous avons effectué l'étude de la transformation du charbon de terre en combustible en deux étapes :

Première étape : Étude de la transformation du charbon de terre en combustible domestique. Elle comporte les travaux suivants :

- l'étude du processus de transformation du charbon de terre en combustible domestique ;
- l'étude, la conception et la réalisation des équipements de laboratoire pour la distillation du charbon de terre ;
- les essais de distillation ;
- le test sur le liant et les amorces ;
- les essais de compactage ;
- les essais de séchage

Deuxième étape: Test des produits obtenus. Elle comporte les travaux suivants :

- le *Drop Test* ;
- le test de la résistance à la compression ;

2.2. Matériels

Compte tenu du caractère pluridisciplinaire de l'étude, la méthode a été celle de la compilation de différents documents, ainsi que les travaux de recherche sur terrain et aux laboratoires pour la maîtrise du procédé de fabrication des combustibles.

Aussi, divers matériels et équipement ont été conçus et réalisés pour la réalisation des essais de fabrication des combustibles. Il s'agit de :

- distillateur artisanal dont les caractéristiques techniques sont données dans le tableau 1 suivant

Tableau 1 : Caractéristiques techniques du distillateur artisanal

Désignation	Module
Capacité	30 litres
Source d'énergie	Charbon de bois
Echangeur de chaleur	Plaque tubulaire
Réacteur	<ul style="list-style-type: none"> - Parois en TPN 50/10 - Forme cylindrique - poids : 32 kg - diamètre : 300 mm - hauteur : 400 mm
Four	<ul style="list-style-type: none"> - Tirage inversé - Garniture en brique réfractaire - diamètre : 800 mm - hauteur : 750 mm



Figure 1 : Distillateur artisanal

- matériel de compactage dont les caractéristiques techniques sont données dans le tableau 2 suivant

Tableau 2 : Caractéristiques techniques de la presse de compactage

Désignation	Module
Construction :	Mécano-soudé en tôle de forte épaisseur de 10 et 15 mm
Poids de l'ensemble:	48 kg
Système de rappel :	double ressort de traction à 8 spires de 5 mm de diamètre chacune
Plateau guide	en translation verticale de 200 mm x 350 mm x 12 mm
Source de pression	cric bouteille de 10 tonnes
Course maximum	120 mm
Dimension	Longueur : 450 mm
	Largeur : 210 mm
	Hauteur : 750 mm
Capacité :	3 kg/jour



Figure 2 : Presse de compactage

Les essais de résistance à la compression (tableau 2) des briquettes de charbon de terre ont été réalisés avec la presse hydraulique (figure 3) du bloc technique de l'ESPA à Ambohitsaina.



Figure 3 : La presse utilisée pour la mesure de la résistance à la compression

2.3. Méthodologie de l'étude de l'utilisation des briquettes de charbon de terre

Une étude de l'utilisation des briquettes de charbon ainsi fabriquées a été réalisée auprès de certains ménages.

Le but de cette étude est de :

- recueillir les appréciations des utilisateurs sur la qualité des produits mis au point au cours des essais de fabrication ;
- déterminer le choix final du produit à développer sur le marché parmi les 3 produits mis au point.

Le test a été effectué dans la région Atsimo-Andrefana, plus précisément, dans le district de Toliara I, Toliara II et Betioky-Atsimo, donc en milieu urbain et rural.

La méthodologie adoptée consiste à :

- sélectionner les utilisateurs qui pourront effectuer les tests. Les critères de sélection sont :
 - o les habitudes de cuisson ;
 - o la classe socio-professionnelle des ménages ;
- distribuer 2 kg de produit et un questionnaire aux ménages ;
- donner aux établissements de restauration 3 kg de produit, plus un questionnaire ;
- donner des directives sur l'utilisation des briquettes :
 - o l'allumage (Figure 4) et l'entretien du feu ;
 - o le type et la quantité d'aliment à cuire ;
 - o les mesures à effectuer lors du test ;
- donner des directives sur le remplissage du questionnaire ;
- collecter les données recueillies par l'utilisateur sur l'utilisation des briquettes ;
- analyser les données recueillies.



Figure 4 : Essai de démarrage du feu avec les briquettes de charbon de terre

4. RESULTATS ET DISCUSSIONS

4.1. Etude de la transformation du charbon en combustible domestique [Ramahalitsirofo 2008]

4.1.1. Essais de cokéfaction [Hebden & Straud, 1981 Loison, 1986]

Nous avons effectué des essais afin de déterminer les paramètres de cokéfaction du charbon. Les essais sont, évidemment, menés avec le distillateur artisanal. Pour des raisons économiques et de sécurité, le combustible utilisé était le charbon de bois. La température de cokéfaction a été fixée à 900°C. Les paramètres ainsi déterminés sont :

- la granulométrie du charbon ;
- la durée de la cokéfaction ;
- la quantité de condensat obtenue ;
- le rendement de distillation.

a) Conduite des essais

L'évolution de la température en fonction de la durée de la cokéfaction est donnée par la figure 5 suivante :

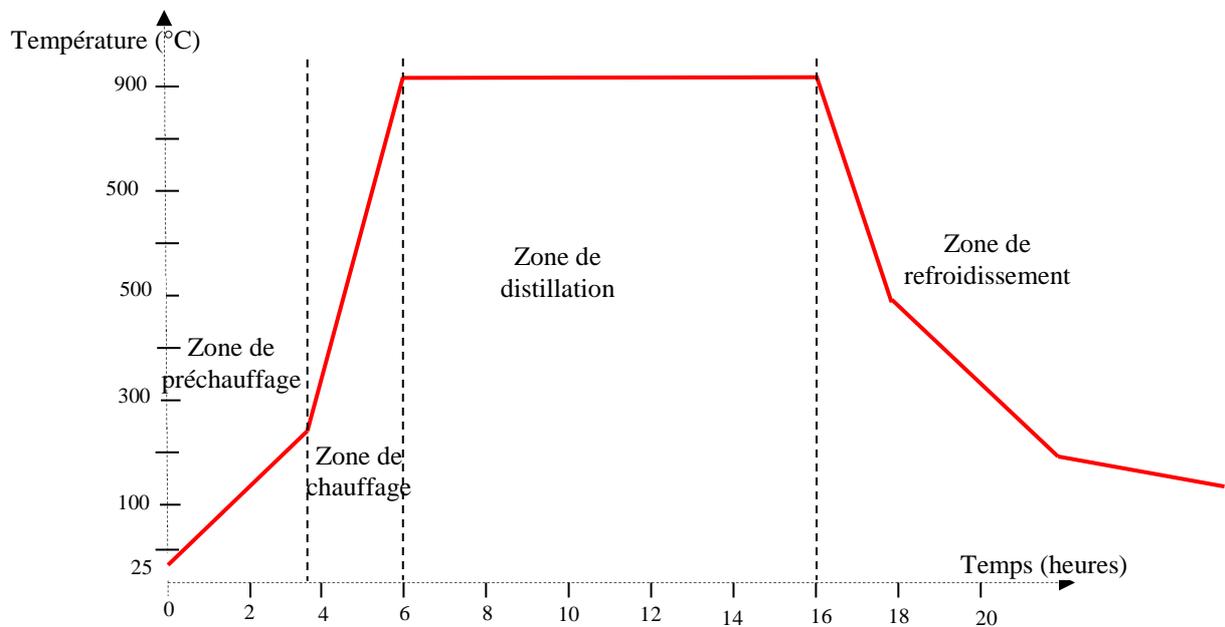


Figure 5 : Évolution de la température en fonction de la durée de cokéfaction

Le graphe ci-dessus montre l'évolution de la température s'effectue en quatre étapes : le préchauffage, le chauffage, la distillation et le refroidissement :

- Le préchauffage dure environ 3 heures 30 minutes. Il consiste à sécher et préchauffer le charbon jusqu'à une température de 250°C. L'élévation de la température s'effectue progressivement, dans cette zone.
- Le chauffage dure environ 2 heures 30 minutes. Il consiste à élever la température de 250 à 900°C. La pente de la droite est très importante, ce qui traduit ici une élévation plus rapide de la température que dans la zone de préchauffage.
- La distillation dure 8 à 15 heures. La température est maintenue à 900°C, pendant la durée de la distillation.
- Le refroidissement est tout de suite effectué une fois le temps de la distillation écoulé, c'est-à-dire qu'on stoppe séance tenante le chauffage du distillateur.

b) Résultats et discussions

❖ *Granulométrie du charbon*

Afin de déterminer l'effet de la granulométrie du charbon de terre sur la qualité du semi-coke, donc des briquettes de charbon, nous avons effectué 18 essais de cokéfaction. La durée de chaque essai a été fixée à 12 heures pour une température de cokéfaction de 900°C. La figure 6 suivante montre la teneur en matières volatiles du semi-coke obtenu en fonction de la granulométrie du charbon :

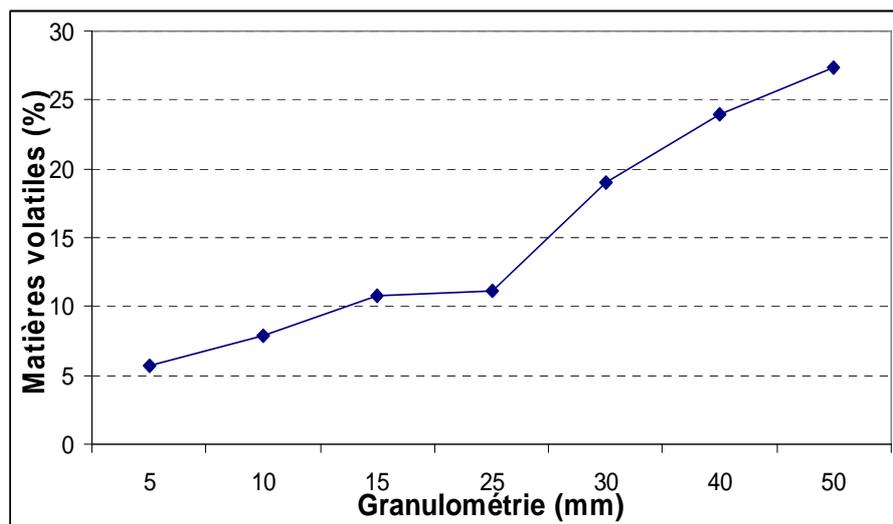


Figure 6 : Évolution de la teneur en matières volatiles du semi-coke en fonction de la granulométrie du charbon

Le graphique montre que, plus la granulométrie est petite, plus la teneur en matières volatiles du semi-coke obtenu est faible. Donc, la qualité du semi-coke est meilleure, c'est-à-dire que son pouvoir calorifique inférieur est élevé. Ce que montre le graphique (figure 7) suivant :

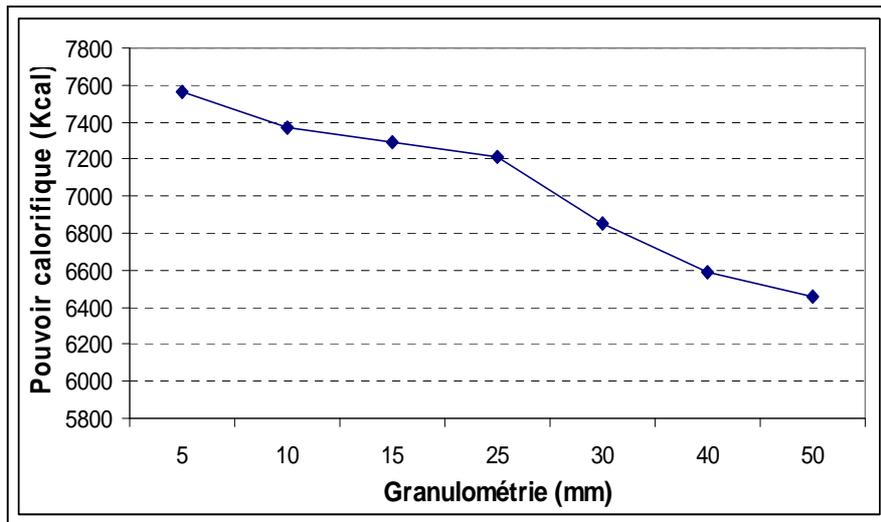


Figure 7 : Évolution du pouvoir calorifique du semi-coke en fonction de la granulométrie du charbon

L'allure de la courbe est peu accentuée pour la granulométrie comprise entre 10 et 25mm. Puis, elle devient plus importante lorsque la granulométrie du charbon augmente, c'est-à-dire que le pouvoir calorifique du semi-coke diminue rapidement quand la granulométrie du charbon augmente.

❖ *La durée de la cokéfaction*

La durée de la distillation a été réglée entre 8 et 15 heures. Nous avons effectué 10 essais de cokéfaction. Nous avons calculé le rendement en semi-coke en fonction de la durée des essais.

Le résultat obtenu est montré par les graphiques (figures 8 et 9) suivants :

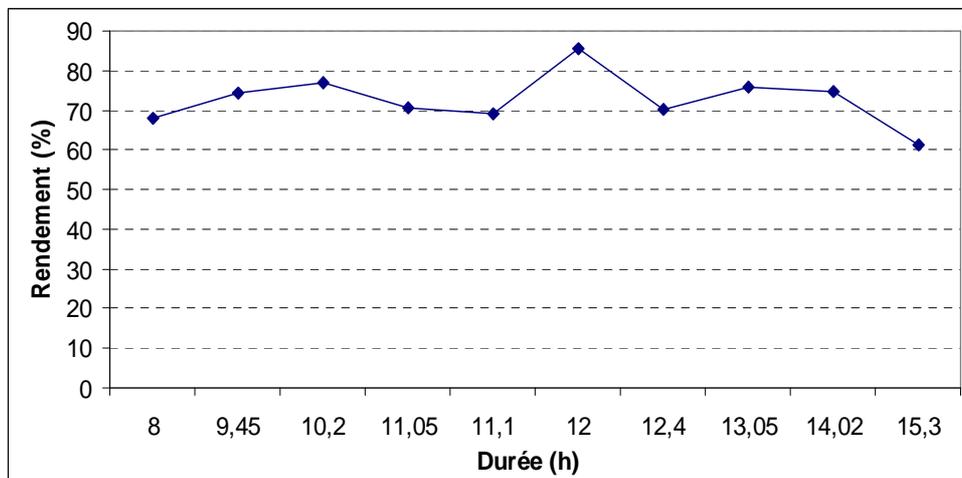


Figure 8 : Évolution du rendement de la cokéfaction en fonction de sa durée

Le graphique ci-dessus montre que le rendement optimal en semi-coke est obtenu après 12 heures de cokéfaction. Le rendement maximal ainsi obtenu est de 80%. Si on augmente encore la durée de la cokéfaction, le rendement diminue. Il descend jusqu'à 60% après 15 heures de distillation.

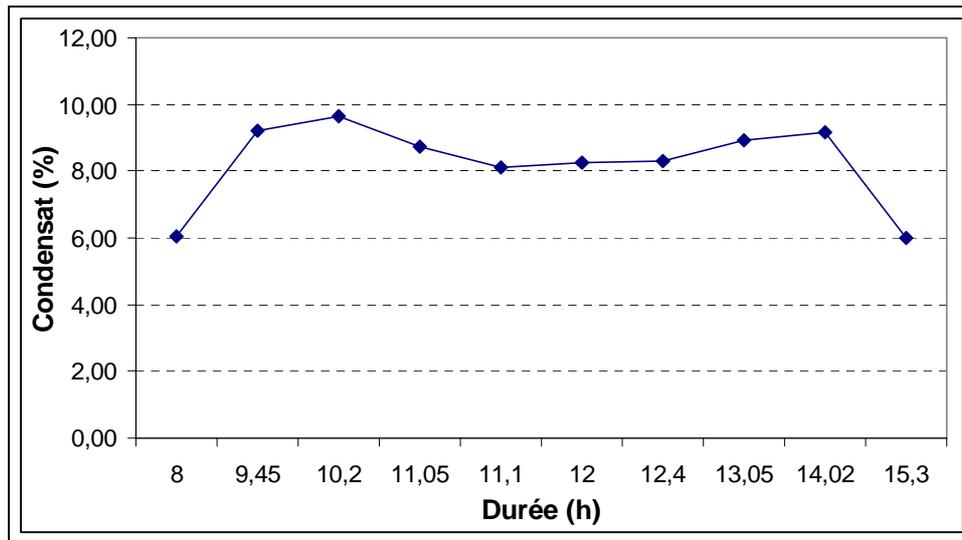


Figure 9 : Évolution de la quantité de condensat obtenue en fonction de la durée de cokéfaction

La figure 9 montre que le rendement en condensat est optimal après 10 heures de cokéfaction. Le rendement ainsi obtenu est de 9,67%. Si on continue, encore, d'augmenter la durée de la distillation, le rendement diminue. Il atteint 6% après 15 heures de distillation.

❖ Caractéristiques du semi-coke obtenu

Le tableau 3 suivant montre les caractéristiques du semi-coke obtenu par la cokéfaction du charbon de terre de la Sakoa.

Tableau 3 : Caractéristiques du semi-coke

Échantillon	Densité	Humidité (%)	Matières volatiles (%)	Cendres (%)	Carbone fixe (%)	PCI (Kcal/kg)
N°1	1,15	0,77	12,06	19,11	68,06	7 062
N°2	1,04	0,70	10,02	18,95	70,22	7 286

Source : Laboratoire OMNIS

❖ Conclusion

Afin d'obtenir un rendement de distillation optimal en coke, les paramètres de cokéfaction à adopter sont :

- température : 900°C
- granulométrie : 10 à 25mm
- durée : 12 heures

Le rendement ainsi obtenu est de l'ordre de 80% de semi-coke.

4.1.2. Adjuvants [Prudhon, 1986]

a) Liant

Le semi-coke, à la sortie du distillateur, se trouve sous forme pulvérulente. Pour les mettre sous forme d'aggloméré solide, on doit utiliser un liant pour assurer la cohésion des éléments de l'aggloméré entre eux.

Afin de déterminer le type de liants adapté au produit et à son utilisation, on a effectué plusieurs tests et analyses avec divers types de liant, tels que la farine de manioc, la fécule de manioc, l'argile. Les résultats de l'étude sont donnés dans le tableau 4 suivant :

Tableau 4 : Tableau Comparatif des liants

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

Source : Essai au labo du CNRIT, Avril 2007

Les résultats des essais montrent que la fécule présente le moins de difficultés à l'usage tant à chaud qu'à froid. Son efficience, c'est-à-dire son rapport cohésion/prix, est la plus avantageuse. Elle offre le plus de résistance aux différentes sollicitations. La briquette contenant la fécule est la plus robuste. C'est pour ces raisons que la fécule de manioc a été choisie comme l'un des liants de la briquette à utiliser pour le test d'acceptabilité du produit fini.

b) Amorce

La mise en forme du semi-coke en briquette nécessite un liant approprié. En plus, il faut lui conférer un temps d'inflammabilité avoisinant celui du charbon de bois. Car la briquette de charbon de terre, constituée essentiellement par le semi-coke, est un produit difficilement inflammable. Cela est dû au processus de cokéfaction, responsable du départ des matières volatiles qui entretiennent la chaleur. D'où la nécessité d'un élément que nous appelons « amorce » qui améliorera l'inflammabilité des briquettes.

Pour atteindre cet objectif, nous avons effectué des essais sur onze (11) types d'amorce tels que le tourteau de jatropha, la cire, le goudron, les fines de charbon de bois, la résine de pin, le pétrole, le kérosène, le papier, les copeaux de bois, la paraffine, la fine de charbon de bois.

Les tests (tableau 5) ont été effectués en fonction de trois critères, à savoir :

- L'inflammabilité ;
- La commodité d'usage ;
- L'aptitude à résister aux sollicitations pendant le transport et la manutention.

Tableau 5 : Résultats du test sur les amorces

Amorce	Temps d'inflammabilité (mn)	Emanation		Résistance à la cassure
		Odeur	Fumée	
Cire	6	Légère	Beaucoup	Très bonne
Pétrole	7	Hydrocarbure	Au début	Mauvaise
Goudron	8	Écœurante	Beaucoup	Bonne
Tourteaux de jatropha	32	Légère	Moyenne	Bonne
Paraffine	6	Légère	Légère	Bonne
Kérosène	9	Hydrocarbure	Au début	mauvaise
Papier	28	Inodore	Faible	Bonne
Résine de pin	44	Légère	Au début	Mauvaise
Fine de charbon	6	Légère	Au début	Très bonne
Morceaux de charbon de bois	8	Inodore	Néant	Très bonne
Copeaux de bois	9	Inodore	Au début	Mauvaise

Source : Essai au laboratoire du CNRIT, Avril 2007

Parmi les onze (11) types d'amorce testés, cinq (5) ont été retenus, à cause de la rapidité du démarrage du feu (temps d'inflammabilité inférieur ou égal à 8 minutes). Ce sont la cire, le pétrole, le goudron, la paraffine et la fine de charbon de bois.

Cependant, le pétrole est éliminé à cause de l'odeur d'hydrocarbure durant la combustion et la difficulté de séchage du produit obtenu. En outre, nous avons arrêté les essais sur la paraffine étant donné qu'elle est chère et importée.

Ainsi, pour la suite de notre étude, nous avons retenu les trois amorces suivantes :

- le goudron ;
- la cire ;
- la fine de charbon de bois.

4.1.3. Optimisation de la teneur en liant

Afin de déterminer la teneur optimale en liant pour les briquettes, nous avons effectué deux tests tels que le *drop-test* et la résistance à la compression.

a) Drop test

Ce test constitue un moyen de déterminer l'aptitude d'un combustible à résister aux sollicitations provoquant sa fragmentation en menus morceaux. Il consiste à laisser tomber une masse quelconque de combustible, plusieurs fois sur plusieurs facettes, à partir d'une certaine hauteur. On mesure ensuite le nombre des combustibles qui se sont cassés après les chutes.

Les conditions d'expérimentation sont les suivantes :

- Hauteur : 1 m ;
- Fréquence : journalière ;
- Stockage du combustible : dans une armoire métallique fermée.

Les résultats du test sont les suivants :

- les briquettes ayant une teneur en liant inférieur à 3% accusent un coefficient de friabilité élevé : indice 11 ; 89% des briquettes ont été endommagées (16 briquettes sur 18 sont cassées) ;
- les briquettes ayant une teneur en liant de 6% montrent plus de résistance : indice 79 ; 21% des briquettes sont cassées (4 briquettes sur 19 ont été endommagées),
- les briquettes ne s'effritent pratiquement plus avec une teneur en liant de 10% : indice 97 ; 3% des briquettes ont cassées (seule 1 briquette sur 30, a été endommagée).

L'étude a mis en relief une nette corrélation entre la teneur en liant et l'aptitude du produit à résister à l'effritement. Une teneur en liant de 10% donne aux briquettes une propriété apte à résister aux sollicitations diverses au cours de son transport et sa manipulation.

À titre indicatif, le charbon de bois a un indice de *drop-test* de 80 à 90, suivant l'âge et la nature du bois utilisé pour sa fabrication. Cette constatation a été faite d'après les essais effectués au laboratoire du CNRIT.

b) Résistance à la compression

La résistance à la compression reflète l'aptitude d'un produit à s'opposer aux sollicitations qui lui sont appliquées lors de son transport et sa manutention. C'est en quelque sorte un test d'efficience de plusieurs critères dont :

- la bonne conduite du séchage ;
- le choix adéquat du liant et sa teneur optimale ;
- la force de compactage optimale.

Toutes ces considérations peuvent être vérifiées à l'aide du test destructif ou test de résistance à la compression. La résistance à la compression donne aussi, une idée de base sur l'aptitude des produits à résister aux différentes sollicitations qu'ils peuvent subir durant leur utilisation. Elle constitue également une référence en matière d'efficacité du compactage.

Pour une pression de compactage de 39,8 MPa, soit une force de compactage de 5 000 kgf, les valeurs obtenues lors des mesures sont les suivantes (Figure 10):

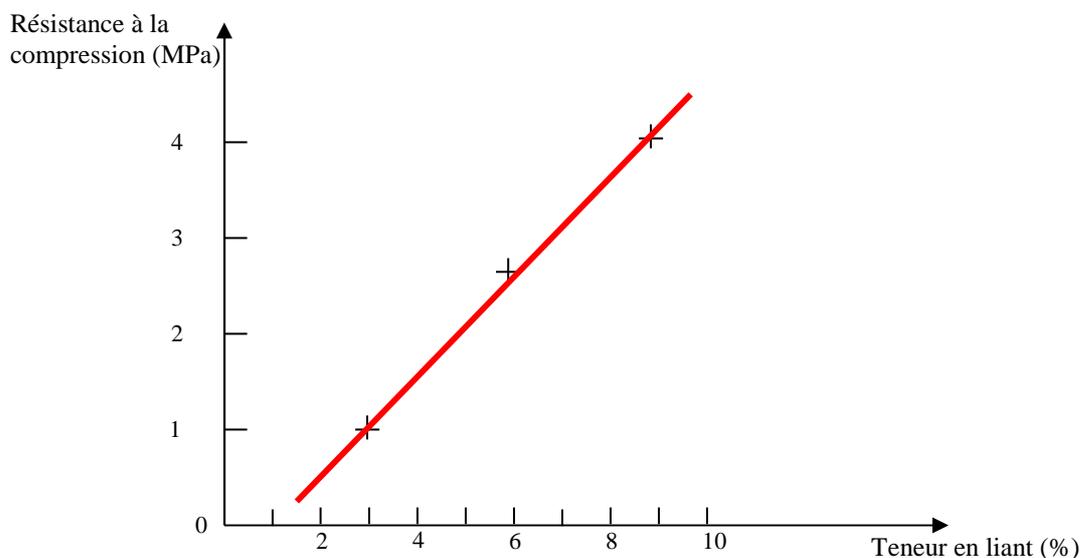


Figure 10 : Résistance à la compression des briquettes en fonction de la teneur en liant

- 0,5 MPa pour une briquette liée à 3 % de féculé de manioc comme liant ;
- 1,25 MPa pour une briquette à 6 % de féculé de manioc ;
- 2,0 MPa pour une briquette à 9 % de féculé de manioc.

La résistance à la compression des briquettes est proportionnelle à la teneur en liant. Au cours de l'essai, la teneur en féculé de manioc de 9% a donné le meilleur résultat. Toutefois, le coût de production d'un tel charbon s'avérera très élevé, à cause du prix de la féculé de manioc. C'est pourquoi, nous avons fixé la teneur en liant des biquettes à 6% de féculé de manioc.

4.1.4. Essais de compactage [Pieters 1938]

Nous avons effectué des essais de compactage afin de déterminer la force de compactage optimale des briquettes.

Nous avons effectué 12 essais de compactage afin de déterminer la force de compactage optimale, à utiliser pour la mise en forme des briquettes. La masse des matières à compacter a été fixée à 90 g. Nous avons tout d'abord étudié la variation de la hauteur des briquettes en fonction de la force de compactage. Le résultat des essais est donné par le graphique (Figure 11) suivant.

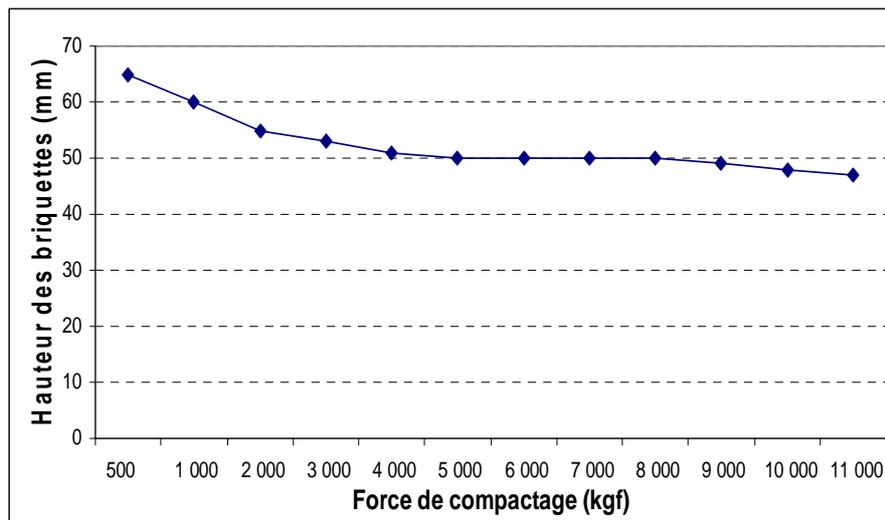


Figure 11 : Évolution de la hauteur des briquettes en fonction de la force de compactage

Le graphique ci-dessus montre que la hauteur des briquettes diminue rapidement (65 à 50mm) pour des forces de pression allant de 500 à 5 000 kgf. Ce qui montre que les briquettes sont, faiblement, compactées si la force de compactage est inférieure à 5 000 kgf.

Elle se stabilise ensuite à la hauteur de 50 mm, pour une force de compactage de 5 000 à 8.000 kgf. En effet, à partir de 5.000 kgf, le mélange de semi-coke, liant et eau présente une structure assez compacte. Ainsi, l'augmentation de la force de compactage de 5 000 à 8 000kgf, ne modifie plus sa structure. Ce qui explique la stabilité de la hauteur des briquettes entre cet intervalle de force de compactage à 50 mm.

Enfin, elle diminue lentement jusqu'à la hauteur de 47 mm avec une force de 9 000 à 11 000 kgf. La force est suffisamment grande pour provoquer un petit changement de structure des briquettes.

On a remarqué trois gammes de coupure bien distinctes au cours des essais de compactage :

- Pour une force de compactage $F < 500$ kgf, le produit contient encore trop d'eau ;
- Si la force de compactage est entre 500 et 5 000 kgf, le produit est homogène. Mais, son aptitude à résister aux diverses sollicitations relatives à la manutention et au transport reste moindre.
- Pour une force de compactage supérieure à 5 000 kgf, une petite partie du liant peut être évacuée en même temps que l'eau, sans créer de préjudice à la résistance mécanique. Avec une force de compactage élevée, un maximum d'eau est évacué. Dès la phase de compactage, cela engendre un gain de temps pour l'opération de déshydratation.

Si l'on tient compte du comportement de la briquette durant la combustion (l'utilisation) et le transport, la force de compactage optimale est évaluée à 5 000 kgf, soit une pression de compactage de 39,8 MPa. Le diamètre de la briquette correspondante est de 40 mm.

4.1.5. Essais de séchage

Afin d'assurer une meilleure distribution du liant et de l'amorce à l'intérieur du produit à agglomérer, il faut utiliser l'eau sous forme d'empois. Cette eau devrait être évacuée durant l'opération de déshydratation, autrement dit, le séchage.

Cette opération est capitale car de sa bonne conduite dépend la qualité finale du produit fini. Trop court, le séchage engendre un produit inapte à faire face aux sollicitations durant le transport et la manutention. Trop long, il engendre un coût de production élevé, réduisant la marge bénéficiaire. Il faut donc trouver un juste équilibre, qui peut être atteint de deux manières :

- le séchage à l'air libre ;
- le séchage sous atmosphère contrôlée.

a) Séchage à l'air libre

En moyenne, le séchage à l'air libre dure 15 jours. Mais dans de très mauvaises conditions météorologiques, il peut aller jusqu'à 21 jours, comme le montre le graphique (Figure 12) ci-après :

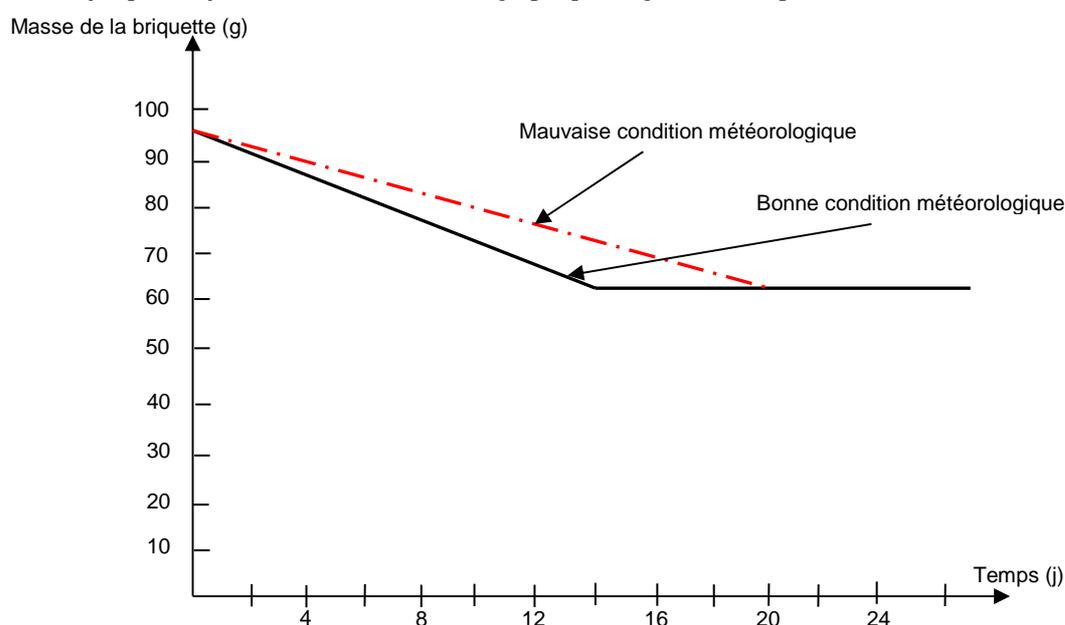


Figure 12 : Courbe de séchage à l'air libre

La masse initiale des briquettes est de 90 g. Cette masse diminue progressivement pour atteindre les 60 g en 15 à 21 jours, suivant les conditions météorologiques. Puis elle reste constante.

b) Séchage en atmosphère contrôlée

Le séchage à l'air libre est trop long (15 à 21 jours) et nécessite une aire de séchage large, donc un investissement assez important.

Pour gagner du temps, le séchage peut être réalisé en étuve. Les briquettes ont été arrangées sur des claies. La source de chaleur que nous avons utilisée est l'énergie électrique. Dans la pratique, cependant, on peut utiliser d'autres sources d'énergie telles que les combustibles gazeux (butane) ou liquide (fuel, gasoil, huile), ainsi que le bois-énergie.

La chaleur provenant du processus de cokéfaction, plus précisément du refroidissement du semi-coke, pourrait aussi être utilisée pour le séchage des briquettes, en pratique.

Dans ce cas, il est impératif de laisser les briquettes à sécher à l'ombre pendant au moins 12 heures (l'exposition direct au soleil génère des fissures). Puis, on les déshydrate en étuve, à la température de 100°C pendant 24 heures. Ensuite, on les laisse refroidir pendant 6 heures.

Tout ceci se traduit par la courbe à l'allure suivante (Figure 13) :

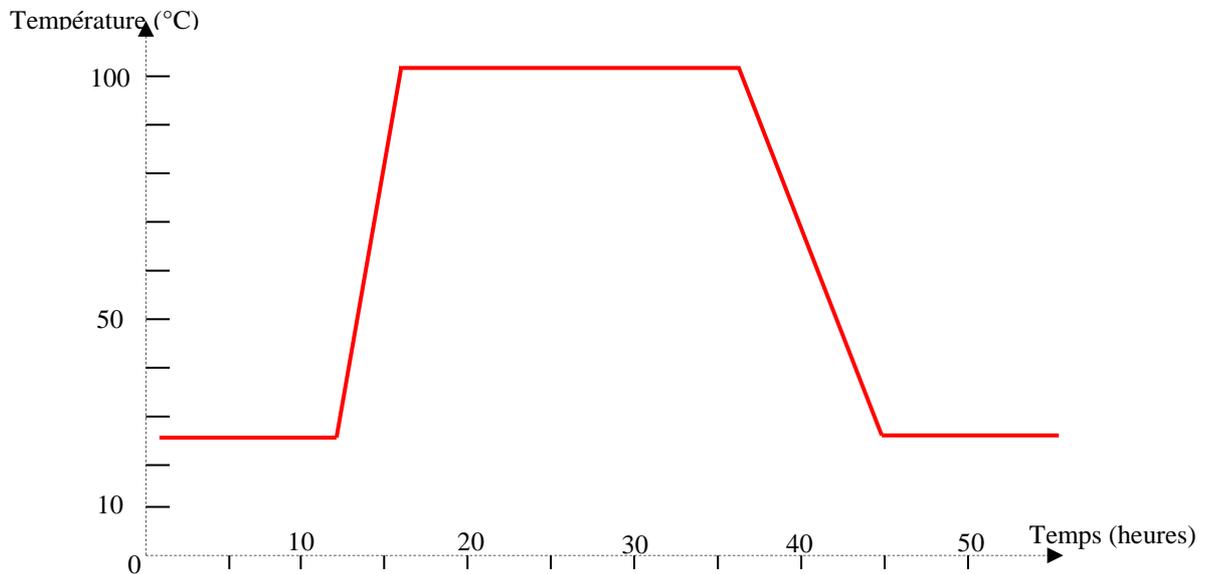


Figure 13 : Courbe de séchage en atmosphère contrôlée

Le séchage se fait en 45 heures soit moins de deux jours, avec cette technique.

4.2. Caractéristiques des briquettes de charbon obtenues

Trois types de produits (Figure 14) ont été obtenus selon l'amorce utilisée :

- Le produit P₁ est une briquette de charbon de terre dont le liant est à base de féculé de manioc et l'amorce est du goudron ;
- Le produit P₂ est une briquette de charbon de terre à liant à base de féculé de manioc et amorcée avec de la fine de charbon de bois ;
- Le produit P₃ est une briquette de charbon de terre liée avec de la féculé de manioc et amorcé avec de la cire.

Diverses raisons ont motivé ce choix :

- Le Produit P₁, « féculé + Goudron », vise à optimiser la valorisation des sous-produits de distillation du charbon. Cependant, il se peut que la quantité de goudron produite qui est de 35 kg/t de charbon de terre soit insuffisante pour l'approvisionnement en goudron du processus de fabrication.
- Le produit P₂, « féculé + fine de charbon de bois », vient en option complémentaire. Toutefois, cette option nécessite un reboisement en bois énergie, pour approvisionner le processus de production. Cela évite aussi la destruction de la couverture forestière de la zone d'étude. En effet, le produit P₂ n'est éligible qu'à condition qu'il y ait production durable de charbon de bois entreprise par le promoteur, nécessitant la plantation d'arbres à bois énergie.

- Le Produit P₃ « féculé + cire » est une option intermédiaire pour résoudre le problème de disponibilité en goudron et la nécessité de protection de la couverture forestière de la zone d'étude. Dans ce cas, on peut le qualifier de produit de transition.

Les caractéristiques des produits obtenus sont les suivants (Tableaux 6 à 10 et Figure 14):

4.2.1. Composition

Tableau 6 : Composition des briquettes de charbon de terre

Désignation	Teneur (%)	Origine
Matière première : semi-coke	79 à 84	Bassin houiller de la Sakoa
Liant : féculé de manioc	6	Fabrication locale
Amorce : goudron, fine de charbon de bois ou cire	10 à 15	Production locale ou achat

4.2.2. Morphologie

Tableau 7 : Caractéristiques physiques des briquettes

Forme	Cylindrique
Dimensions	Hauteur : 5 cm
	Diamètre : 4 cm
Masse	60 g

4.2.3. Caractéristiques thermiques

Tableau 8 : Caractéristiques thermiques des briquettes

Paramètres	P ₁	P ₂	P ₃
Temps d'inflammabilité (mn)	8	8	6
Temps d'ébullition d'un litre d'eau (mn)	21	19	18
Pouvoir calorifique inférieur (kcal)	6 601	6 607	6 604

Source : Auteurs & Labo OMNIS

4.2.4. Caractéristiques chimiques

Tableau 9 : Caractéristiques chimiques des briquettes

Paramètres	P ₁	P ₂	P ₃
Teneur en matières volatiles (%)	11,02	10,31	10,95
Humidité (%)	0,84	0,77	0,80
Teneur en carbone fixe (%)	64,80	65,46	64,85
Teneur en cendre (%)	23,34	23,46	23,40
Total (%)	100	100	100

Source : Laboratoire de l'OMNIS

4.2.5. Caractéristiques mécaniques

Tableau 10 : Caractéristiques mécaniques des briquettes

Paramètres	Valeurs
Force de compactage	5000 kgf
Pression de compactage	39,8 MPa
Résistance à la compression	1,25 MPa



Source : Auteur

Figure 14 : Briquettes de charbon de terre

4.2.7. Conclusion

La transformation du charbon de terre de la Sakoa en combustible domestique est faisable du point de vue technologique.

Tous les paramètres de transformation ont été déterminés au niveau pilote, à savoir les paramètres de distillation, de compactage et de séchage, ainsi que les caractéristiques techniques et physico-chimiques des produits finis.

Ainsi, en partant d'une tonne de charbon de terre (à transformer), on peut obtenir à la fin du processus de transformation :

- 880 kg de briquettes de charbon ;
- 34 kg de goudron ;
- 6,8 kg de matières huileuses (huiles légère, moyenne, lourde) ;
- 9,7 kg de sulfate d'ammonium ;
- 335 kg de gaz de ville.

Les produits obtenus à la fin du processus de transformation comprennent les briquettes de charbon, le goudron, les huiles légère, moyenne et lourde, le sulfate d'ammonium et le gaz de ville.

Les briquettes de charbon sont les produits principaux. Le reste est constitué de sous-produits ou produits secondaires : à savoir, le goudron, les matières huileuses, le sulfate d'ammonium et le gaz de ville

La production d'environ 250 kg de briquettes a été effectuée avec les matériels réalisés, afin de satisfaire aux tests d'utilisation de celles-ci comme combustible domestique.

Les matériels et équipements nécessaires au processus de transformation du charbon de terre en combustible domestique à l'échelle industrielle ont été déterminés à partir des résultats des tests. Ils peuvent être réalisés localement, ce qui réduirait le coût d'acquisition de ces matériels, donc de l'investissement nécessaire à la mise en place de l'usine de transformation.

4.3. Etude de l'utilisation des briquettes de charbon de terre comme combustible domestique

Le but de cette étude est de :

- recueillir les appréciations des utilisateurs sur la qualité des produits mis au point précédemment ;
- déterminer le choix final du produit à développer sur le marché parmi les 3 produits mis au point précédemment.

Le test a été effectué dans la région Atsimo-Andrefana, plus précisément, dans le district de Toliara I, Toliara II et Betioky-Atsimo, donc en milieu urbain et rural.

4.3.1. Déroulement du test d'acceptabilité

a) Betioky Atsimo

Le déroulement du test d'acceptabilité des produits, mis au point précédemment, dans le district de Betioky-Atsimo est le suivant :

- L'échantillon est constitué de six (6) établissements de restauration classés en deux (2) catégories (restaurant et gargote) et dix-huit (18) ménages repartis en trois (3) classes (aisée, moyenne et laborieuse).
- On a distribué un type de produit pour les six (6) établissements de restauration, dont trois restaurants et trois gargotes.
- On a distribué un type de produit pour deux (2) ménages de chaque classe socio-professionnelle.

b) Toliara

Le test d'acceptabilité de Toliara s'est déroulé comme suit :

- L'échantillon est constitué de 36 utilisateurs dont 9 établissements de restauration et 27 ménages.
- Les établissements de restauration sont répartis en trois (3) catégories telles que le grand hôtel, le restaurant et la gargote.
- Les ménages sont repartis en trois (3) classes : la classe aisée, la classe moyenne et la classe laborieuse.
- On a distribué les 3 types de produit pour chaque catégorie d'établissement de restauration.
- On a distribué chaque type de produit pour trois (3) ménages de chaque classe socioprofessionnelle.

4.3.2. Résultat des tests

a) Appréciation des produits

L'appréciation des produits par les utilisateurs dans les deux localités est résumée dans le tableau 11 suivant.

Tableau 11 : Appréciation des produits P₁, P₂ et P₃ à Betioky et Toliara

Catégorie d'utilisateur	Localité	P ₁ (%)		P ₂ (%)		P ₃ (%)	
		Semi-coke + goudron		Semi-coke + fine de charbon de bois		Semi-coke + Cire	
Établissement de restauration	Betioky	47,5	42,08	50	67,50	48,5	45,91
	Toliara	36,67		85		43,33	
Ménages aisés	Betioky	42,5	47,91	52,5	56,25	35	37,50
	Toliara	53,33		60		40	
Ménages moyens	Betioky	51	43,83	67,5	53,75	41	35,50
	Toliara	36,67		40		30	
Ménages laborieux	Betioky	39	31,16	53,5	51,75	32,5	32,91
	Toliara	23,33		50		33,33	
Ensemble			41,24		57,31		37,95

Source : Enquête effectuée en avril 2007

Le tableau 11 ci-dessus montre que les utilisateurs qui ont accepté de tester les produits P₁, P₂ et P₃, dans les deux localités, apprécient modérément le produit P₂, avec un taux d'appréciation moyen de 57,31%. Les deux autres produits n'ont pas été appréciés à cause de la présence du goudron ou de la cire, qui dégagent de la fumée et de l'odeur lors de la combustion.

b) Satisfaction des utilisateurs

Le taux de satisfaction des utilisateurs qui ont accepté de tester les produits P₁, P₂ et P₃, dans les deux localités, est donné dans le tableau 16 suivant.

Tableau 16 : Satisfaction des utilisateurs

Catégorie d'utilisateur	Localité	P ₁ (%)		P ₂ (%)		P ₃ (%)	
Établissements de restauration	Betioky	50	41,66	50	75	50	58,33
	Toliara	33,33		100		66,67	
Ménages aisés	Betioky	0	33,33	100	83,33	0	16,67
	Toliara	66,67		66,67		33,33	
Ménages moyens	Betioky	100	66,67	100	66,67	0	0
	Toliara	33,33		33,33		0	
Ménages laborieux	Betioky	0	0	100	83,33	0	16,67
	Toliara	0		66,67		33,33	
Ensemble			35,42		77,08		22,92

Source : Enquête effectuée en avril 2007

Le tableau ci-dessus montre que 77% des utilisateurs qui ont accepté de tester les briquettes, dans les deux localités, ont été satisfaits par le produit P₂. Ce produit est constitué de semi-coke lié par la fécule de manioc et amorcé par de la fine de charbon de bois.

4.4. Test d'ébullition d'eau [Ravoninjatovo, 2004]

4.4.1. Méthodologie

Le Test d'ébullition d'eau, constitue une évaluation rapide de la qualité des combustibles par les ménages. Il fournit, surtout, un ordre d'idée pour apprécier la puissance d'un foyer. Il donne, également, un indice sur l'aptitude du combustible et sa performance durant la cuisson ou le réchauffage des plats.

Il consiste à chauffer jusqu'à ébullition un litre d'eau avec 3 morceaux de briquettes de charbon (180 g). On mesure ainsi le temps requis pour cette opération, à comparer avec les résultats obtenus avec les combustibles usuels comme le bois de chauffe ou le charbon de bois.

4.4.2. Résultat du test

Le résultat des essais est donné dans le tableau 12 suivant :

Tableau 12 : Test d'ébullition d'eau

Combustibles	Temps d'ébullition un litre d'eau (mn)	Quantité de combustible utilisée (g)	Quantité de combustible consommée (g)
Brique de charbon de terre	18,25	480	180
Charbon de bois	14,03	500	233
Bois de chauffe	13,17	500	467

Source : Auteurs

Le tableau ci-dessus montre qu'il faut plus de temps pour porter un litre d'eau à ébullition avec les briquettes de charbon de terre. Cela est dû au démarrage trop lent du feu.

4.5. Test de cuisine contrôlé [Ravoninjatovo, 2004]

4.5.1. Définition

Le test de cuisine contrôlée est une simulation simple et courte de la cuisson de repas déterminés. Sa réalisation tient compte de la nature des aliments de base (plat prédominant dans la localité), qui sont eux-mêmes fonctions des potentialités agricoles locales, des habitudes culinaires et des goûts.

Il consiste à effectuer différentes cuissons avec des plats typiquement locaux, en particulier le haricot, le manioc séché, la soupe au jarret (pied de bœuf) et surtout, le riz blanc. Les briquettes de charbon de terre sont testées en utilisant des foyers améliorés courants, de type « fatana mitsitsy ». On mesure la quantité de combustible consommée et le temps requis pour la cuisson. On compare les résultats obtenus avec les combustibles usuels tels que le charbon de bois et le bois de chauffe, pour les mêmes plats.

4.5.2. Résultats du test

Les résultats des tests sont portés dans le tableau 13 suivant. Ils fournissent une idée globale de la consommation énergétique pour la cuisine, et le temps requis pour la cuisson des repas, suivant les simulations :

Tableau 13 : Résultats du Test de cuisine contrôlée

Nature de la cuisson	Briquettes		Durée de cuisson par les briquettes de charbon	Durée de cuisson par le	
	Utilisées (g)	Consumée (g)		charbon de bois	Le bois de chauffe
Lentilles (500 g)	720	300	2h 15 min	1h 55mn	2h 40mn
Maïs sec (1 000 g)	720	720	4h 15mn	3h 40mn	4h 30mn
Haricot sec (500 g)	720	360	3 h 30 min	2h 55mn	3h 40mn
Pied de bœuf (1 500 g)	720	720	4h 30mn	3h 50mn	4h 45mn
Manioc sec (1 550 g)	720	600	3h30 min	3h 05mn	3h 50mn
Melon (1 900 g)	720	180	27 min	18mn	42mn
Riz (1 425 g)	720	480	2 h 05 min	1h 25mn	1h 55mn

Source : Auteurs

Globalement, le test a fait ressortir que les briquettes de charbon de terre libèrent la chaleur d'une manière plus lente. Cette caractéristique est liée avec l'âge du charbon, en rapport, donc, avec sa compacité (densité). En effet, la combustion d'un produit compact est beaucoup plus difficile que pour un autre, moins dense. C'est ce qui explique la durée plus longue de la cuisson menée avec les briquettes de charbon de terre par rapport au charbon de bois.

Toutefois, la cuisson effectuée avec les briquettes de charbon de terre requiert moins de temps qu'avec le bois de chauffe. Particulièrement pour les repas nécessitant une longue cuisson, tels que le haricot, le jarret de bœuf ou le maïs.

4.6. **Proposition de solutions aux problèmes liés à l'utilisation des briquettes de charbon de terre**

Les utilisateurs ont relevé quelques problèmes liés à l'usage des briquettes de charbon de terre. Il s'agit de :

- la difficulté de démarrage du feu ;
- l'arrêt intempestif du feu ;
- l'émission de fumée et d'odeur ;
- la lenteur de la cuisson ;
- désagrégation du combustible ;
- la consommation trop rapide du combustible.

Aussi, si nous souhaitons que les briquettes soient acceptées plus facilement par le consommateur, nous devons apporter quelques améliorations.

Ainsi, les solutions proposées pour plus de commodité dans l'usage des briquettes de charbon de terre sont :

- L'augmentation du taux d'amorce dans les briquettes, afin d'améliorer la vitesse de démarrage du feu ;
- L'utilisation d'un foyer adapté au charbon de terre (le foyer amélioré, par exemple) pour éviter l'extinction involontaire du feu ;
- L'ajout de combustible au moment opportun, suivant l'évolution de la cuisson : ne pas attendre que les briquettes soient près de se consumer. Cela évitera l'arrêt du feu ;

- La soumission du foyer à un courant d'air : une bonne ventilation accroît la vitesse de cuisson ;
- Le contact direct de la marmite avec les briquettes, combiné à l'action du feu au fond du foyer, crée une pression qui favorise la désagrégation rapide du combustible, donc, à éviter.

4.7. Conception et adaptation de foyers

Les briquettes obtenues à partir de charbon de terre cokéfié ont la particularité d'être pauvres en matières volatiles. Cette spécificité a un impact significatif sur la commodité d'utilisation, surtout lors du démarrage et de l'entretien du feu.

La solution que nous avons préconisée est donc de lui associer un foyer adapté aux caractéristiques du charbon de terre. Toutefois, nous avons évité de bouleverser les habitudes des utilisateurs sur l'usage du foyer classique. Toutes ces raisons nous ont poussées à mettre au point de nouveaux types de foyer. Ceux-ci ne présentent pas beaucoup de différences côté design, ou du point de vue pondéral, comparés aux foyers déjà existants sur le marché. Les matériaux utilisés pour leur fabrication est le fer pour un premier, et la céramique pour un second, comme le montrent les illustrations suivantes (Figure 15):



Figure 15 : Configuration de nouveaux foyers adaptés aux briquettes de charbon de terre

Que ce soit à Toliara ou à Betioky-Atsimo, les ménages utilisent le foyer métallique fabriqué à partir des fûts de récupération. Ces équipements sont les mieux adaptés au contexte local.

Les foyers que nous avons mis au point comportent, évidemment, des modifications par rapport aux foyers existants sur le marché. Par exemple, l'aménagement d'une entrée d'air secondaire. Nous ne pouvons donner de détails techniques pouvant avoir des implications commerciales.

Les essais effectués avec ces nouveaux foyers ont montré une nette amélioration dans l'usage du charbon de terre. À savoir :

- La facilité de démarrage du feu ;
- La baisse de la durée de cuisson ;
- L'amélioration de la combustion des briquettes ;
- La facilité du suivi et de l'entretien du feu. En effet, la cuisson ne nécessite plus une surveillance permanente du feu et de la ventilation.

4.8. Conclusion

Transformé en combustible domestique, sous certaines conditions, le charbon de terre de la Sakoa s'adapte à l'usage domestique. Toutefois, cette utilisation du charbon de terre en tant que combustible domestique connaît quelques inconvénients inhérents aux caractéristiques physico-chimiques de la houille : dégagements de fumée et d'odeur, difficulté de démarrage du feu, longue durée de la cuisson...

Ces inconvénients ternissent, un peu, l'image du charbon de terre par rapport au charbon de bois. Ils ont influé sur l'appréciation du charbon de terre par les utilisateurs qui ont accepté de tester nos produits. Et c'est pour cela que nous avons décidé de confectionner de nouveaux foyers plus adaptés au charbon de terre, en parallèle à la production des briquettes.

Le résultat du *test d'acceptabilité* a montré que le produit P₂, composé de charbon de terre lié avec de la fécule et amorcé avec de la fine de charbon de bois, est le mieux apprécié par les utilisateurs qui ont essayé les produits dans les districts de Betioky-Atsimo et de Toliara. Le taux d'appréciation moyen est de 57,31%. Ainsi, 77% des utilisateurs ont été satisfaits du produit P₂.

Le reste, c'est-à-dire le produit P₁, composé de charbon de terre lié avec la fécule de manioc et amorcé avec du goudron, et le produit P₃, composé de charbon de terre lié avec de la fécule de manioc et amorcé avec de la cire, n'ont pas satisfait les utilisateurs. La raison en est le dégagement de fumée et d'odeur insupportables, lors de la combustion.

On peut noter comme caractéristique spécifique des ménages du sud, leur tendance à cuire plus longtemps, comparés à ceux des autres régions. Cette spécificité s'explique par leur habitude culinaire. Leur nourriture de base est essentiellement composée de céréales et de tubercules secs.

Par ailleurs, nous avons constaté que la population enquêtée, avec leur habitude de cuisiner à l'extérieur, possède la faculté naturelle de supporter la fumée dégagée par le combustible. Du coup, la ventilation, nécessaire à la combustion des briquettes, est grandement facilitée.

5. ECONOMIE DE FORET

Actuellement, le bois et le charbon de bois constituent les principales sources d'énergie des ménages et des services à Madagascar.

Les pressions sur nos ressources forestières sont de plus en plus fortes pour satisfaire les besoins de chaque ménage en énergie. La substitution du charbon de bois ou du bois de chauffe par les briquettes de charbon de terre peut atténuer ces pressions.

5.1. Méthodologie

Elle consiste à :

- déterminer l'équivalent en charbon de bois des briquettes de charbon de terre selon leur pouvoir calorifique ;
- évaluer l'équivalent en biomasse verte des charbons de bois ainsi consommés suivant le mode de carbonisation artisanale utilisé par les charbonniers actuels ;
- estimer la superficie de forêt conservée par la substitution du charbon de bois par les briquettes de charbon de terre.

5.2. Equivalent en charbon de bois des briquettes [International resources group, 2001]

Les paramètres utilisés pour l'estimation de l'équivalent en charbon de bois des briquettes de charbon de terre sont les pouvoirs calorifiques de chaque produit. Le rapport des pouvoirs calorifiques des briquettes et du charbon est de $6600/4500 = 1,47$, c'est-à-dire qu'une tonne de briquettes équivaut à 1,47 tonne de charbon de

bois. Le tableau 14 suivant montre l'équivalent en charbon de bois des briquettes de charbon de terre produites pendant les dix premières années de production :

Tableau 14 : Equivalent en charbon de bois des briquettes de charbon de terre produites pendant les 10 premières années

Désignation	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5	Année 6	Année 7	Année 8	Année 9	Année 10
Briquette de charbon de terre (1000 t)	45,00	56,50	79,75	113 000	150,00	223,00	231,50	231,50	231,50	231,50
Équivalent en charbon de bois (1000 t)	66,07	82,95	117,09	165,91	220,23	327,41	339,89	339,89	339,89	339,89

La réserve totale de 170 millions de tonnes de charbon de terre exploitables du gisement de la Sakoa, équivaut 181 289 157 tonnes de charbon de bois.

5.3. Equivalent en biomasse verte des briquettes de charbon [Boufeldja, 1994]

Le paramètre essentiel à la détermination de l'équivalent en forêt des briquettes de charbon est le rendement de carbonisation. D'après les études effectuées par le CNRIT dans les régions Atsimo-Andrefana, Androy et Anosy, le rendement moyen du procédé de carbonisation artisanal actuel est de 10%, à partir de la biomasse verte. Ainsi on peut convertir à partir de cette valeur l'équivalent en biomasse verte des briquettes de charbon. Le tableau 15 suivant montre le résultat de la conversion :

Tableau 15 : Équivalent en biomasse verte des briquettes de charbon de terre

Désignation	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5	Année 6	Année 7	Année 8	Année 9	Année 10
Équivalent en charbon de bois des briquettes (t)	66 070	82 955	117 091	165 909	220 233	327 414	339 893	339 893	339 893	339 893
Équivalent en biomasse verte des briquettes (x1000 t)	661	830	1 171	1 659	2 202	3 274	3 399	3 399	3 399	3 399

Source : Auteur

La réserve totale de 170 millions de charbon de terre exploitable du gisement de la Sakoa, est équivalente à 1 812 891 566 tonnes de biomasse verte.

5.4. Superficie des forêts conservées

La quantité de biomasse verte ainsi conservée par la substitution du charbon de bois par les briquettes de charbon de terre peut être convertie en superficie de forêt. Le paramètre de conversion est la densité de forêt de 57,6 tonnes de biomasse verte par hectare [CIRAD, 2006]. Le résultat de la conversion est donné dans le tableau 16 suivant :

Tableau 16 : Superficie des forêts conservées pendant les dix premières années de production

Désignation	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5	Année 6	Année 7	Année 8	Année 9	Année 10
Équivalent en biomasse verte des briquettes (x1000 t)	661	830	1 171	1 659	2 202	3 274	3 399	3 399	3 399	3 399
Équivalent en forêt des briquettes (ha/an)	11 470	14 402	20 328	28 804	38 235	56 843	59 009	59 009	59 009	59 009
Forêt détruite par exploitation de la mine (ha)	13	16	23	33	44	65	68	68	68	68
Forêt détruite pour la culture de manioc (ha)	1 800	2 260	3 190	4 520	6 000	8 920	9 260	9 260	9 260	9 260
Déforestation évitée (ha)	9 657	12 125	17 115	24 251	32 191	47 858	49 682	49 682	49 682	49 682
Superficie cumulée des forêts conservées (ha)	9 657	21 783	38 898	63 148	95 340	143 197	192 879	242 561	292 242	339 184

La déforestation évitée par la substitution du charbon de bois par les briquettes de charbon de terre en 10 ans d'activité est estimée à 339 184ha de forêts, soit 2,56% de la couverture forestière de la Grande île en 2003, qui est estimée à 13 260 000ha.[Ministère de l'énergie et des Mines]

La réserve de 170 millions de tonnes de charbon de terre équivaut 27 058 083 ha de forêt.

5.5. Capacité de séquestration de carbone des forêts préservées [International resources group, 2001]

La capacité de séquestration de carbone des forêts est obtenue en multipliant la superficie des forêts conservées par le facteur de séquestration. Le tableau 21 suivant donne le résultat des opérations.

Tableau 21 : Capacité de séquestration de carbone des forêts préservées

Désignation	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5	Année 6	Année 7	Année 8	Année 9	Année 10
Déforestation évitée (ha)	8.876	11.144	15.730	22.289	29.587	43.986	45.663	45.663	45.663	45.663
Capacité de séquestration des forêts conservées (x1000t de CO ₂)	278	349	492	697	926	1 376	1 429	1 429	1 429	1 429
Capacité de séquestration cumulée des forêts conservées (x1000 t de CO ₂)	278	627	1 119	1 816	2 742	4 118	5 547	6 976	8 405	9 834

La capacité de séquestration de gaz à effet de serre (GES) des forêts préservées en dix ans d'activité est estimée à 9 834 000 tonnes d'équivalent en CO₂.

La capacité de séquestration des GES de l'équivalent en forêt de la réserve de charbon de terre de la Sakoa (170 millions de tonnes) est évaluée à 769 888 000 tonnes d'équivalent en CO₂.

5.6. Conclusion

Les analyses effectuées dans ce paragraphe ont montré que le bilan écologique du projet est positif. En effet :

- l'utilisation du charbon de terre comme combustible domestique ne présente pas de risque pour la santé des utilisateurs ;
- la substitution du bois-énergie par les briquettes de charbon de terre pourrait entraîner la conservation de la forêt de la région d'implantation du projet et ses environs ;
- le projet pourrait contribuer à la diminution des GES par la séquestration de carbone des forêts conservées. Elle atténue l'impact des GES sur le changement climatique ;

6. CONCLUSION GENERALE

Les études et analyses effectuées dans le cadre de ce travail, ont démontré que la transformation du charbon de terre de la Sakoa en combustible domestique est faisable sur le plan technique et social.

L'étude de la transformation du charbon de terre en combustible domestique a été entamée par l'étude du processus de transformation, suivie de l'étude, la conception et la réalisation des matériels et équipements. Puis, nous avons effectué différents essais de transformation afin de déterminer les meilleures conditions d'obtention des produits finis. Nous avons ainsi mis au point trois types de produit dont les caractéristiques sont les suivantes :

- P₁ : semi-coke lié par de la fécule de manioc, amorcé par du goudron ;
- P₂ : semi-coke lié par de la fécule de manioc, amorcé par de la fine de charbon de bois ;
- P₃ : semi-coke lié par de la fécule de manioc, amorcé par de la cire.

À partir des conditions ainsi déterminées, nous avons effectué la production de quelques quantités de produits P₁, P₂ et P₃ qui ont été distribués auprès des utilisateurs potentiels, à savoir, les établissements de restauration et les ménages, pour être soumis à des essais de cuisson. Le but de cette étude est de :

- étudier le comportement de ces produits au cours de la cuisson ;
- recueillir les appréciations des utilisateurs sur la qualité des produits mis au point au cours de l'étude ;
- déterminer le choix du produit final à développer parmi les trois produits mis au point, précédemment.

Cette étude a montré que les briquettes de charbon de terre s'adaptent à la cuisson de différents types de menu, sous certaines conditions. Toutefois, celles-ci sont liées à quelques inconvénients inhérents aux caractéristiques physico-chimiques de la houille, tels que le dégagement de fumée et d'odeur, la difficulté de démarrage du feu. Le résultat du test d'acceptabilité a montré que le produit P₂ est le mieux apprécié par les 77% des utilisateurs qui ont testé les produits, avec un taux d'appréciation moyen de 57,31%.

Enfin, nous avons terminé notre travail par l'analyse environnementale du projet qui nous a permis de dégager un bilan écologique positif car :

- l'utilisation des briquettes de charbon de terre comme combustible domestique ne présente pas de risque pour la santé humaine ;
- la substitution du bois-énergie par les briquettes de charbon de terre pourrait entraîner la préservation de 339 184 ha de forêt en 10 ans d'activité ;
- le projet pourrait contribuer à la diminution de 2 704 000 tonnes de GES par la séquestration de carbone des forêts ainsi conservées, en 10 ans de production.

En bref, les travaux menés dans cette étude ont permis de formuler les conditions visant à donner au projet le maximum de chance d'efficacité durable vis-à-vis des impératifs de préservation de la biodiversité et vis-à-vis des impératifs de développement régional auxquels il doit répondre.

En conclusion, l'installation de ce projet est vivement sollicitée, pour le développement économique, social et environnemental de la partie sud de Madagascar, à savoir les régions Atsimo-Andrefana, Anosy et Androy.

BIBLIOGRAPHIE

- Boufeldja B (1994) « *Guide biomasse énergie* » Collection Etudes et filières IEPF – Québec (Canada).
- CIRAD, Département forêt (2006) « *Etude de faisabilité pour la plantation et l'exploitation sécurisée d'essences forestières destinées à l'approvisionnement des utilisateurs de Toliara ville* » Rapport d'étude WWF – Antananarivo.
- Hebden D. & Straud H.J.F. (1981) « *Coal gasification process* » *Chemistry of coal utilization* » Edition John Wiley and Sons ; Elliot.
- International Ressources Group. (2001) « *Support de formation en Mécanisme de Développement Propre* » Ministère de l'environnement/USAID, Antananarivo.
- Loison R. (1986) « *Gazéification du charbon* » Technique de l'Ingénieur J 4, J 5410.Paris
- Pieters J. (1938) « *La production économique des agglomérés de charbon de bois grâce à la récupération économique des sous produits* » Bruxelles.
- Prudhon G. (1986) « *Combustibles solides. Caractéristiques. Propriétés. Analyse.* » Technique de l'Ingénieur 5, A3, A1712, A 1714-.
- Ramahalitsirofo H.2008 « *Contribution des méthodes scientifiques dans la faisabilité d'une étude de projet : Cas de l'utilisation du charbon de terre pour usages domestiques* » Mémoire de DEA Ingénierie de projet ESPA – Antananarivo.
- Ravoninjatovo A. O. (2004) « *Contribution à l'étude et à la valorisation de la biomasse à Madagascar* » Thèse de docteur ingénieur ESPA – Antananarivo.