

## SOMMAIRE

SOMMAIRE .....	I
LISTE DES ANNEXES .....	III
LISTE DES TABLEAUX .....	III
LISTE DES FIGURES .....	V
LISTE DES PHOTOS .....	VI
ACRONYMES ET ABRÉVIATIONS .....	VI
INTRODUCTION .....	1
PREMIERE PARTIE: GÉNÉRALITÉS ET BIBLIOGRAPHIE .....	3
1. DÉFINITION DU CHARBON DE TERRE .....	4
2. ORIGINE ET FORMATION DU CHARBON DE TERRE .....	4
3. COMPOSITION ET TYPES DE CHARBON DE TERRE ; .....	7
3.1. <i>Composition physique</i> .....	7
3.2. <i>Composition chimique</i> .....	8
4. CLASSIFICATION DU CHARBON; .....	9
4.1. <i>Classification selon la composition</i> .....	9
4.2. <i>Classification selon le pouvoir calorifique</i> .....	11
5. CARACTÉRISATION DU CHARBON DE TERRE .....	11
5.1. <i>L'indice de matières volatiles</i> .....	11
5.2. <i>Le pouvoir calorifique</i> .....	12
5.3. <i>L'humidité</i> .....	12
5.4. <i>La teneur en cendres</i> .....	12
5.5. <i>La teneur en soufre</i> .....	12
5.6. <i>La granulométrie</i> .....	13
5.7. <i>L'indice de gonflement</i> .....	13
6. UTILISATIONS DU CHARBON DE TERRE .....	13
7. RESSOURCES, RÉSERVES ET PRODUCTION DE CHARBON DE TERRE ; .....	14
7.1. <i>Ressources</i> .....	14
7.2. <i>Réserves mondiales</i> .....	15
7.3. <i>Production mondiale</i> .....	16
8. ÉTUDES EFFECTUÉES SUR LE CHARBON DE LA SAKOA .....	18
8.1. <i>Les gisements houillers de la Sakoa</i> .....	18
8.2. <i>Cadre historique</i> .....	19
8.3. <i>Cadre géographique et géologique</i> .....	20
8.4. <i>Réserves</i> .....	23
9. CARACTÉRISTIQUES DU CHARBON DE TERRE DE L'AFRIQUE DU SUD .....	23
9.1. <i>Origine et formation</i> .....	23
9.2. <i>Caractéristiques</i> .....	23
DEUXIÈME PARTIE : ÉTUDE DES CARACTÉRISTIQUES DU CHARBON DE TERRE DE LA SAKOA	25
1. ÉTUDE DES CARACTÉRISTIQUES DU CHARBON DE LA SAKOA .....	26
1.1. <i>Secteur de Namboreko</i> .....	27
1.2. <i>Secteur d'Andreby</i> .....	28
1.3. <i>Secteur d'Andranomanintsy</i> .....	29
2. POSSIBILITÉ D'UTILISATION .....	30
2.1. <i>Source d'énergie dans la production des matériaux de construction</i> .....	30
2.2. <i>Source d'énergie dans la centrale thermique</i> : .....	31
2.3. <i>Source d'énergie dans la chaufferie</i> .....	31
2.4. <i>Source d'énergie de navire</i> .....	31
2.5. <i>Source d'énergie pour les locomotives</i> .....	32
2.6. <i>Source d'énergie dans les ménages</i> .....	32
CONCLUSION .....	32

TROISIÈME PARTIE : ÉTUDE DE LA TRANSFORMATION DU CHARBON DE TERRE EN COMBUSTIBLE DOMESTIQUE .....	34
1. ÉTUDE DE LA TRANSFORMATION DU CHARBON DE TERRE EN COMBUSTIBLE DOMESTIQUE .....	36
1.1. <i>Processus de transformation du charbon de terre en combustible domestique</i> .....	36
1.2. <i>Étude, conception et élaboration des matériel et équipements</i> .....	40
1.3. <i>Cokéfaction du charbon</i> .....	44
1.4. <i>Essais de cokéfaction du charbon</i> .....	47
1.5. <i>Adjuvant</i> .....	51
1.6. <i>Optimisation de la teneur en liant</i> .....	54
1.7. <i>Essais de compactage</i> .....	57
1.8. <i>Essais de séchage</i> .....	59
2. CARACTÉRISTIQUES DES BRIQUETTES DE CHARBON .....	61
2.1. <i>Composition</i> .....	62
2.2. <i>Morphologie</i> .....	62
2.3. <i>Caractéristiques thermiques</i> .....	62
2.4. <i>Caractéristiques chimiques</i> .....	62
2.5. <i>Caractéristiques mécaniques</i> .....	63
CONCLUSION.....	63
QUATRIÈME PARTIE : ÉTUDE DE L'UTILISATION DES BRIQUETTES DE CHARBON DE TERRE COMME COMBUSTIBLE DOMESTIQUE.....	65
1. DÉROULEMENT DU TEST D'ACCEPTABILITÉ .....	67
1.1. <i>Betioky Atsimo</i> .....	67
1.2. <i>Toliara</i> .....	67
2. RÉSULTATS DES TESTS.....	69
2.1. <i>Betioky-Atsimo</i> .....	69
2.2. <i>Toliara</i> .....	74
2.3. <i>Récapitulation des résultats du test d'acceptabilité</i> .....	81
3. TEST D'ÉBULLITION D'EAU (TEE) .....	83
3.1. <i>Définition</i> .....	83
3.2. <i>Résultat du test</i> .....	83
4. TEST DE CUISINE CONTRÔLÉE (TCC) .....	83
4.1. <i>Définition</i> .....	83
4.2. <i>Résultat du test</i> .....	83
5. PROPOSITION DE SOLUTIONS AUX PROBLÈMES LIÉS À L'UTILISATION DES BRIQUETTES DE CHARBON DE TERRE.....	84
6. CONCEPTION ET ADAPTATION DES FOYERS .....	85
CONCLUSION.....	86
CINQUIÈME PARTIE : ÉVALUATION TECHNICO-ÉCONOMIQUE ET FINANCIÈRE .....	88
1. BUSINESS PLAN .....	89
1.1. <i>Orientation stratégique de l'entreprise</i> .....	89
1.2. <i>Plan marketing</i> .....	90
1.3. <i>Plan de production</i> .....	103
2. ÉVALUATION FINANCIÈRE DU PROJET .....	109
2.1. <i>Investissements initiaux</i> .....	109
2.2. <i>Plan de financement du projet</i> .....	110
2.3. <i>Tableaux de remboursement des emprunts</i> .....	112
2.4. <i>Compte des résultats prévisionnels</i> .....	113
2.5. <i>Bilan prévisionnel</i> .....	115
2.6. <i>Analyse du prix de revient des briquettes de charbon de terre et des produits secondaires</i> .....	116
2.7. <i>Analyse des prix des produits concurrents</i> .....	119
2.8. <i>Analyse des critères de rentabilité financière du projet</i> .....	119
CONCLUSION.....	123
SIXIÈME PARTIE : ANALYSE ENVIRONNEMENTALE.....	125

1	DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE .....	126
2	ZONE D'IMPLANTATION DE L'USINE DE TRANSFORMATION.....	127
3	BILAN MATIÈRES DU PROCESSUS DE FABRICATION .....	127
4	NUISANCES GÉNÉRÉES PAR LE PROCESSUS DE TRANSFORMATION .....	129
5	IDENTIFICATION DES IMPACTS DU PROCESSUS DE TRANSFORMATION SUR L'ENVIRONNEMENT .....	129
5.1.	<i>Impacts sur le milieu physique</i> .....	129
5.2.	<i>Impacts sur le milieu biologique</i> .....	130
5.3.	<i>Impacts sur le milieu humain</i> .....	132
6.	RÉCAPITULATION DES IMPACTS POTENTIELS IDENTIFIÉS .....	134
7	ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX ET SOCIAUX DU PROJET .....	134
7.1.	<i>Analyse des risques sur l'utilisation des briquettes de charbon de terre comme combustible domestique</i> .....	135
7.2.	<i>Analyse de la radioactivité du charbon de terre</i> .....	136
7.3.	<i>Économie de forêt (Déforestation évitée)</i> .....	136
7.4.	<i>Biodiversité et processus écologique</i> .....	139
7.5.	<i>Bilan d'émission/séquestration de GES du projet</i> .....	140
8.	MESURES D'ATTÉNUATION DES IMPACTS NÉGATIFS ET DE RÉDUCTION DES NUISANCES GÉNÉRÉES PAR LE PROJET .....	146
8.1.	<i>Gestion des rejets liquides</i> .....	146
8.2.	<i>Gestion des rejets atmosphériques</i> .....	149
8.3.	<i>Gestion des déchets solides</i> .....	152
8.4.	<i>Bruits</i> .....	153
8.5.	<i>Gestion des forêts</i> .....	153
	CONCLUSION.....	155
	CONCLUSION GÉNÉRALE .....	157
	BIBLIOGRAPHIE .....	I
	ANNEXES.....	VI

### LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Dosage du carbone et du soufre.....	VII
Annexe 2 : Teneur en matières volatiles .....	VIII
Annexe 3 : Pouvoir calorifique.....	IX
Annexe 4 : Analyse et caractéristiques des cendres .....	XI
Annexe 5 : Teneur en eau .....	XIII
Annexe 6 : Masse volumique .....	XV
Annexe 7 : Protocole scientifique pour le test d'inflammabilité du charbon de terre de la Sakoa.....	XVI
Annexe 8 : Processus de fabrication de la fécule de manioc.....	XVIII
Annexe 9 : Résultat d'analyse de la radioactivité du charbon.....	XX

### LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Variétés de houille .....	10
Tableau 2 : Classification du charbon selon le PCI.....	11
Tableau 3 : Évolution des ressources mondiales de charbon.....	14
Tableau 4 : Répartition des ressources par continent.....	15
Tableau 5 : Réserves mondiales de charbon.....	16
Tableau 6 : Les pays principaux producteurs de charbon .....	17
Tableau 7 : les groupes miniers producteurs de charbon .....	18
Tableau 8 : Caractéristique du charbon de l'Afrique du Sud.....	24
Tableau 9 : Coordonnées GPS des secteurs.....	26
Tableau 10 : Caractéristiques physico-chimique de la houille de Namboreko .....	28
Tableau 11 : Caractéristiques physico-chimiques de la houille d'Andremby.....	28
Tableau 12 : Caractéristiques physico-chimiques de la houille d'Ankinany.....	29
Tableau 13 : Résultats d'analyse macroscopique de la houille d'Andranomanintsy .....	30
Tableau 14 : Caractéristiques physico-chimiques par couches de la houille d'Andranomanintsy.....	30

Tableau 15 : Consommation en charbon de terre de Holcim.....	30
Tableau 16 : Consommation en charbon de la chaufferie .....	31
Tableau 17 : Pouvoir calorifique de quelques combustibles .....	32
Tableau 18 : Caractéristiques techniques du distillateur artisanal .....	42
Tableau 19 : Caractéristiques techniques de la presse de compactage .....	44
Tableau 20 : Caractéristiques du semi-coke .....	51
Tableau 21 : Tableau Comparatif des liants.....	52
Tableau 22 : Résultat du test sur les amorces .....	54
Tableau 23 : Composition des briquettes de charbon de terre .....	62
Tableau 24 : Caractéristiques de forme des briquettes .....	62
Tableau 25 : Caractéristiques thermiques des briquettes .....	62
Tableau 26 : Caractéristiques chimiques des briquettes .....	62
Tableau 27 : Caractéristique mécanique des briquettes.....	63
Tableau 28 : Répartition des échantillons pour l'enquête à Betioky-Atsimo .....	67
Tableau 29 : Répartition des échantillons pour les établissements de restauration à Toliara .....	68
Tableau 30 : Répartition des échantillons par ménage à Toliara.....	68
Tableau 31 : Appréciation du produit P <sub>1</sub> par les établissements de restauration à Betioky-Atsimo .....	69
Tableau 32 : Appréciation du produit P <sub>2</sub> par les établissements de restauration à Betioky-Atsimo .....	69
Tableau 33 : Appréciation du produit P <sub>3</sub> par les établissements de restauration à Betioky-Atsimo .....	69
Tableau 34 : Raisons du choix des restaurateurs.....	70
Tableau 35 : Raisons du choix des gargotes .....	71
Tableau 36 : Appréciation du produit P <sub>1</sub> par les ménages de Betioky-Atsimo.....	71
Tableau 37 : Appréciation du produit P <sub>2</sub> par les ménages de Betioky-Atsimo.....	72
Tableau 38 : Appréciation du produit P <sub>3</sub> par les ménages de Betioky-Atsimo.....	73
Tableau 39 : Satisfaction des ménages de Betioky-Atsimo .....	73
Tableau 40 : Appréciation du produit P <sub>1</sub> par les établissements de restauration de Toliara .....	74
Tableau 41 : Appréciation du produit P <sub>2</sub> par les établissements de restauration à Toliara .....	75
Tableau 42 : Appréciation du produit P <sub>3</sub> par les établissements de restauration de Toliara .....	76
Tableau 43 : Taux de satisfaction des établissements de restauration à Toliara .....	76
Tableau 44 : Appréciation du produit P <sub>1</sub> par les ménages de Toliara.....	78
Tableau 45 : Appréciation du produit P <sub>2</sub> par les ménages de Toliara.....	79
Tableau 46 : Appréciation du produit P <sub>3</sub> par les ménages de Toliara.....	80
Tableau 47 : Satisfaction des catégories des ménages ayant utilisées les 3 produits à Toliara .....	81
Tableau 48 : Appréciation des produits P <sub>1</sub> , P <sub>2</sub> et P <sub>3</sub> à Betioky et Toliara.....	82
Tableau 49 : Satisfaction des utilisateurs.....	82
Tableau 50 : Test d'ébullition d'eau.....	83
Tableau 51 : Résultat du test de cuisine contrôlée .....	84
Tableau 52 : Critères d'évaluation de la demande.....	92
Tableau 53 : Évolution de la population des trois régions de 2007 à 2013 .....	92
Tableau 54 : Évolution du nombre de ménages de 2007 à 2013 .....	92
Tableau 55 : Évolution de la consommation de charbon de bois de 2007 à 2013 .....	92
Tableau 56 : Évolution de la consommation de bois de chauffe.....	93
Tableau 57 : Évolution de la consommation d'énergie culinaire et son équivalent en brique de charbon de terre dans les trois régions .....	93
Tableau 58 : Les Communes et quartiers touchés par la production de charbon de bois.....	97
Tableau 59 : Forces et faiblesse des concurrents directs.....	98
Tableau 60 : Forces et faiblesses des concurrents indirects .....	99
Tableau 61 : Forces et faiblesses du produit à lancer sur le marché .....	99
Tableau 62 : Classement du prix de vente du charbon de terre (en ariary).....	101
Tableau 63 : Programme de production pendant les dix premières années du projet .....	103
Tableau 64 : Résumé du coût des immobilisations corporelles .....	109
Tableau 65 : Estimation du fonds de roulement (Ar 1 000).....	110
Tableau 66 : Résumé des investissements totaux initiaux .....	110
Tableau 67 : Plan de financement du projet (millions d'Ariary).....	111
Tableau 68 : Remboursement de l'emprunt à moyen terme (Ar 1 000).....	112
Tableau 69 : Remboursement de l'emprunt à long terme (kar) .....	113
Tableau 70 : Compte de résultats prévisionnels .....	114
Tableau 71 : Bilan prévisionnel .....	115
Tableau 72 : Coût de production des briquettes de charbon de terre.....	117
Tableau 73 : Coût de production du sulfate d'ammonium.....	118

Tableau 74 : Coût de production du gaz de ville.....	118
Tableau 75 : Ratios simples de rentabilité .....	120
Tableau 76 : Répartition des coûts fixes et variables.....	122
Tableau 77 : Résultat net cumulé pendant les 5 premières années de production .....	123
Tableau 78 : Bilan matières du processus de transformation du charbon.....	128
Tableau 79 : Equivalent en forêt des fines de charbon de bois .....	131
Tableau 80 : Consommation en bois-énergie de Toliara, Betioky et Soamanonga.....	132
Tableau 81 : Production de cendre du projet .....	133
Tableau 82 : Production de fine de charbon de terre du processus de transformation .....	133
Tableau 83 : Impacts potentiels identifiés de la transformation du charbon de la Sakoa.....	134
Tableau 84 : Caractéristiques physico-chimiques des briquettes .....	135
Tableau 85 : Teneur en métaux lourds des cendres d'incinération des briquettes.....	136
Tableau 86 : Teneur en matières radioactives du charbon de terre .....	136
Tableau 87 : Équivalent en charbon de bois des briquettes de charbon de terre produites pendant les 10 premières années.....	138
Tableau 88 : Équivalent en biomasse verte des briquettes de charbon de terre.....	138
Tableau 89 : Superficie des forêts conservées pendant les dix premières années de production.....	139
Tableau 90 : Superficie occupée par la culture de manioc .....	140
Tableau 91 : Consommation de combustible en charbon de terre du projet .....	141
Tableau 92 : Consommation en carburant du projet.....	142
Tableau 93 : Émission de CO <sub>2</sub> des briquettes pendant les dix premières années d'activité .....	142
Tableau 94 : Émissions de CO <sub>2</sub> de la combustion de la houille .....	143
Tableau 95 : Émissions de CO <sub>2</sub> des carburants .....	143
Tableau 96 : Émissions de CO <sub>2</sub> de la fabrication de fine de charbon de bois .....	143
Tableau 97 : Émission totales de CO <sub>2</sub> du projet .....	144
Tableau 98 : Capacité de séquestration de carbone des forêts préservées.....	145
Tableau 99 : Bilan d'émissions/séquestration de carbone du projet.....	146
Tableau 100 : Évaluation de la plantation d'arbres à croissance rapide.....	154
Tableau 101 : Superficie à reboiser dans le cadre du projet.....	155

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Processus de formation du charbon de terre.....	6
Figure 2 : Indice de matières volatiles des différents types de charbon de terre.....	12
Figure 3 : Évolution de la production mondiale de charbon par continent .....	17
Figure 4 : Carte géographique et géologique des bassins houillers .....	22
Figure 5 : Localisation des secteurs.....	27
Figure 6 : Processus de transformation de la houille en combustible domestique .....	37
Figure 7 : Schéma simplifié du distillateur.....	41
Figure 8 : Configuration finale du distillateur .....	41
Figure 9 : Schéma de la presse de compactage.....	43
Figure 10 : schéma simplifié de la distillation de la houille.....	45
Figure 11 : Évolution de la température en fonction de la durée de cokéfaction.....	48
Figure 12 : Évolution de la teneur en matières volatiles en fonction de la granulométrie.....	49
Figure 13 : Évolution du pouvoir calorifique en fonction de la granulométrie .....	49
Figure 14 : Évolution du rendement de cokéfaction en fonction de la durée .....	50
Figure 15 : Évolution de la quantité de condensat obtenue en fonction de la durée de cokéfaction.....	50
Figure 16 : Résistance à la compression des briquettes .....	57
Figure 17 : Évolution de la hauteur des briquettes en fonction de la force de compactage .....	58
Figure 18 : Courbe de séchage à l'air libre .....	60
Figure 19 : Courbe de séchage en atmosphère contrôlée.....	61
Figure 20 : Schéma du circuit de distribution .....	102
Figure 21 : Four à coke industriel.....	104
Figure 22 : Évolution des émissions de CO <sub>2</sub> du projet.....	144
Figure 23 : Système de lavage des gaz toxiques .....	150
Figure 24 : Schéma du pulvérisateur d'eau.....	151
Figure 25 : Schémas des types de décharge.....	153

## LISTE DES PHOTOS

Photo 1 : Couches de charbon de terre d'Ankinany.....	29
Photo 2 : Distillateur artisanal.....	42
Photo 3 : Presse de compactage .....	44
Photo 4 : Presse utilisée pour la mesure de la résistance à la compression.....	56
Photo 5 : Briquettes de charbon de terre .....	63
Photo 6 : Essai de démarrage du feu avec les briquettes de charbon de terre .....	66
Photo 7 : Configuration de nouveaux foyers adaptés aux briquettes de charbon de terre .....	86
Photo 8 : Localisation des fournisseurs de charbon de bois pour la ville de Toliara .....	95
Photo 9 : Sites de distribution de charbon de bois .....	96
Photo 10 : Rizières à transformer en réservoir d'eau.....	107
Photo 11 : Vue partielle de la forêt Sakoa en période sèche .....	130

## ACRONYMES ET ABRÉVIATIONS

ABETOL	: Approvisionnement en Bois Energie de Toliara
AIE	: Association Internationale de l'Energie
AIEA	: Association Internationale de l'Energie Atomique
ANGAP	: Association Nationale de Gestion des Aires protégées
BGR	: Institut Allemand des Géosciences et des Matériaux
BRGM	: Bureau des Ressources Géologiques et Minières
CEE	: Comité Economique Européenne
CEG	: Collège d'Enseignement Général
CIRAD	: Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
CIREEF	: Circonscription Régionale de l'Environnementale et des Eaux et Forêts
CISCO	: Circonscription Scolaire
CNRIT	: Centre National de Recherches Industrielle et Technologique
DBO	: Demande Biochimique en Oxygène
DCO	: Demande Chimique en Oxygène
ECAR	: Eglise Catholique Romaine
EIE	: Étude d'Impact Environnemental
ESPA	: Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo
FJKM	: Fianganon'i Jesoa Kristy Eto Madagasikara
FLM	: Fiangoanana Loterana Malagasy
FOFIFA	: Foibe Fikarohana momba ny Fampandrosoana ny eny Ambanivohitra
Gcal	: Giga calorie
GES	: Gaz à Effet de Serre
GM	: Grand Modèle
INSTAT	: Institut National de la Statistique
INSTN	: Institut National des Sciences et des Techniques Nucléaires
kcal	: kilocalorie
kVA	: kilo-Volt-Ampère
kWh	: kilo-Watt-heure
MEC	: Mise en Conformité
MECIE	: Mise en Compatibilité des Investissements avec l'Environnement
MES	: Matières en suspension
MPa	: Méga Pascal

MW	: Mégawatt
Nm <sup>3</sup> /t	: Nanomètre cube par tonne
OCDE	: Organisation de Coopération et de Développement économique
ONE	: Office National pour l'Environnement
ONG	: Organisations Non Gouvernementales
OMNIS	: Office des Mines Nationales et des Industries Stratégiques
PCI	: Pouvoir calorifique inférieur
PM	: Petit Modèle
PNEBE	: Programme National d'Economie de Bois Energie
RFA	: République Fédérale d'Allemagne
RSA	: Republic of South Africa
Tec	: Tonne équivalent charbon
Tep	: Tonne équivalent pétrole
VAN	: Valeur Actuelle Nette
WWF	: World Wildlife Fund
ZP	: Zandarimariam-Pirene

Rapport-Gratuit.com

## 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 du 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 malgaches.

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 étudierons dans ce travail, la possibilité de transformation du charbon de terre de la Sakoa en combustible domestique.

Le but de cette étude est donc 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.

Compte tenu de ces faits, le présent rapport comprendra les parties suivantes :

- Première partie : généralités et bibliographie, qui nous rappellent quelques notions et données techniques, essentielles pour la compréhension du travail ;
- Deuxième partie : étude des caractéristiques du charbon de terre de la Sakoa, qui consiste à déterminer les caractéristiques physico-chimiques et énergétiques de la houille de quelques secteurs de la région de la Sakoa ;
- Troisième partie : étude de la transformation du charbon de terre en combustible domestique : le but de cette partie est de déterminer les conditions optimales pour l'obtention de briquettes de charbon de terre possédant de bonnes propriétés mécaniques et énergétiques ;

- Quatrième partie : étude de l'utilisation des briquettes de charbon de terre comme combustible domestique. Les objectifs de cette étude sont de recueillir les appréciations des utilisateurs sur la qualité des produits et de déterminer le choix final du produit à développer sur le marché parmi les 3 proposés mis au point dans la partie précédente. Le test a été effectué dans la région de l'Atsimo Andrefana, plus précisément, dans le district de Toliara I et Betioky-Atsimo, donc en milieu urbain et rural.
- Cinquième partie : évaluation technico-économique et financière du projet qui permettra d'estimer l'intérêt qu'il représente dans le contexte socio-économique actuel du pays. Aussi, l'analyse se focalisera sur la mise en place et la rentabilité socio-économique et financière d'une entreprise de transformation du charbon de terre (houille) en combustible domestique dans la commune rurale de Soamanonga, district de Betioky-Atsimo, région de l'Atsimo Andrefana
- Sixième partie : analyse environnementale du projet. Elle permettra de cerner les enjeux environnementaux rattachés ou influant sur le fonctionnement de l'installation de transformation du charbon de terre en combustible domestique, et facilitant la mise en œuvre des mesures, afin que celle-ci respecte les dispositions environnementales. Et aussi de relever les avantages environnementaux et sociaux que pourraient apporter le projet dans la zone d'étude.

Nous clorons le rapport par une conclusion générale.

**PREMIÈRE PARTIE :**  
**GÉNÉRALITÉS ET BIBLIOGRAPHIE**

Cette partie nous rappelle quelques notions et données techniques, essentielles à la compréhension de la suite de notre travail.

## 1. DÉFINITION DU CHARBON DE TERRE

Derrière le mot « charbon » se cache une large famille de produits énergétiques. D'une façon générale, on appelle *charbon*, toute roche sédimentaire d'origine organique contenant au moins 50% de carbone, de matières volatiles (hydrogène et hydrocarbures) et des impuretés.

Quand le charbon brûle, les matières volatiles s'enflamment et le carbone constitue la masse solide incandescente. Les impuretés (essentiellement des schistes, grès, calcaire et sulfures) se trouvent dans les cendres et les fumées.

## 2. ORIGINE ET FORMATION DU CHARBON DE TERRE

Le charbon de terre provient de la transformation lente des végétaux qui se sont trouvés immergés à certaines époques géologiques, généralement très anciennes (plusieurs millions d'années).

En effet, à des époques géologiques reculées, et surtout pendant l'époque carbonifère, une grande partie du globe fut couverte d'une végétation luxuriante qui poussa dans les marais. Nombre de ces plantes étaient des fougères, certaines aussi hautes que les arbres. Cette végétation mourut et se retrouva sous l'eau où elle se décomposa progressivement. Lors du processus de décomposition, la matière végétale perdit des atomes d'oxygène et d'hydrogène, laissant un dépôt à forte teneur en carbone. C'est ainsi que se formèrent des tourbières. Avec le temps, des couches de sable et de boue en suspension dans l'eau sédimentèrent sur certains dépôts de tourbe. La pression de ces couches sous-jacentes, mais aussi les mouvements de la croûte terrestre et parfois la chaleur des volcans, agirent pour comprimer et durcir les dépôts, produisant du charbon.

Durant cet enfouissement, le carbone organique s'est transformé en carbone minéral par action de micro-organismes (carbonatation), l'eau a été expulsée en forte proportion et la roche s'est indurée.

La plus grande partie du charbon que nous employons, actuellement, s'est formée à la période carbonifère, il y a 250 à 350 millions d'années. Si à l'échelle d'âge supposé de la terre (4 à 5 milliards d'années), cette période n'est pas énorme, elle est par contre gigantesque une fois rapportée à l'histoire de l'humanité (quelques dizaines de milliers d'années). Le charbon, né de dépôts organiques végétaux, a donc eu tout loisir de se transformer et de subir de multiples bouleversements géologiques.

Il y a environ 250 ou 350 millions d'années, les continents étaient encore entièrement recouverts de végétaux, constituant la plus vaste et la plus importante forêt équatoriale de tous les temps. Ces plantes géantes profitent du climat tropical qui règne sur la terre : beaucoup de chaleur, beaucoup d'humidité et des pluies abondantes. Toutes ces plantes vont vivre, mourir et se déposer sur ce sol humide, en quantité si importante qu'à certains endroits vont se former d'immenses tourbières.

Des cuvettes naturelles où l'eau et les végétaux se mélangent et forment une boue de feuilles, de troncs et de tiges en décomposition, un peu comme pour le compost qu'on trouve au fond du jardin, mais en quantité énorme.

Normalement, les petites bactéries décomposent cette matière. D'une certaine manière, elles la « mangent » et la font disparaître. C'est ce qui se passe à notre époque, en tout cas. À l'ère carbonifère, c'est un peu différent. Ces petits organismes n'étaient pas encore assez « gourmands », pas assez évolués pour décomposer toute cette masse végétale présente en quantité bien trop importante. Ces immenses cuvettes marécageuses vont ensuite être englouties par les brusques changements du niveau des océans ou les périodes de pluies intenses, recouvertes par les boues, les poussières, les sédiments marins...

Quand l'eau se retire, la végétation reprend immédiatement sa place sur ce sol, y pousse, grandit et meurt. Elle forme de nouvelles tourbières, des cuvettes marécageuses qui seront à leur tour recouvertes. Ces couvertures successives de matières vont se retrouver emprisonnées dans le sous-sol. Elles deviendront des couches souterraines. Elles vont lentement se tasser, se compacter et subir la pression et la chaleur des profondeurs du sous-sol. C'est ainsi que ces « boues végétales » vont se transformer. À l'intérieur de ces poches visqueuses, les plantes contiennent encore beaucoup de carbone. Ce carbone va se « fossiliser », devenir solide et former des poches de gaz, gaz provenant de sa décomposition même.

Ce cycle durera plusieurs dizaines de millions d'années, jusqu'à ce que la grande période carbonifère se termine et avec elle, la plus grande accumulation de végétaux de notre histoire. Par la suite, le charbon a continué, et continue encore, de se former, mais en quantité beaucoup moins importante. La terre de nos jardins, ou le sol de nos forêts, de couleur très sombre, presque noire, deviendront peut-être dans quelques centaines de millions d'années, du carbone pratiquement pur.

Pendant tout ce temps, le sous-sol continuera lui aussi de se constituer par couches successives : un empilement de plusieurs centaines de mètres de poussière, de particules minérales, végétales ou animales formeront des couches sédimentaires.

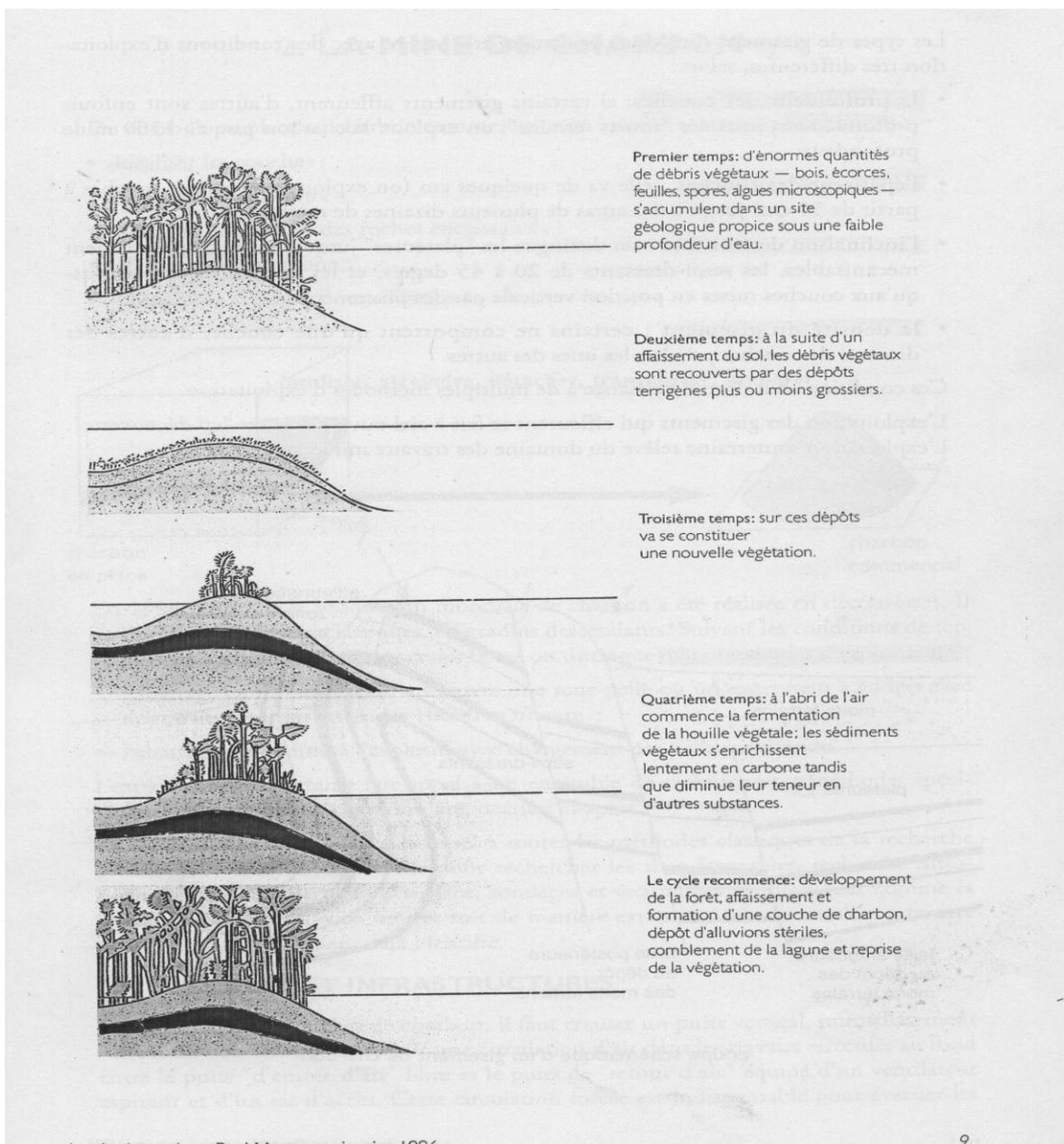
Les poches de ce « charbon » devenu solide vont devenir de la « houille ». On entend par là que ledit *charbon* contient une quantité définie de carbone (70 à 90%). S'il en contient moins, c'est du lignite (60%) ou de la tourbe (moins de 50%). S'il en contient 93% ou plus, le charbon devient de l'antracite. (*Un dérivé de cette matière, d'apparence plus visqueuse, sera découvert dans d'autres gisements et appelé plus tard « huile minérale » : le pétrole.*)

La tourbe, moins riche en carbone, présente encore un aspect « végétal ». On y distingue encore des formes de branches ou de racines. Elle met aussi moins de temps à se former (10.000 à 15.000 ans), et se trouve donc souvent près de la surface du sol. Il suffit de la découper en blocs pour l'extraire. Progressivement, la tourbe pourra se transformer en lignite, puis en charbon, plus dur, plus riche en carbone, et donc beaucoup plus ancien (environ 350 millions d'années).

Ces matières riches en carbone ont la capacité de produire beaucoup d'énergie en brûlant, on peut donc les appeler des combustibles. Leur teneur en carbone leur permettra aussi de brûler longtemps. Comme il leur a fallu des dizaines et même des centaines de millions d'années pour

se former, on les classe parmi les matières dites « fossiles ». De ces résidus d'anciens végétaux, il ne reste que le carbone, et ils sont ainsi devenus des minéraux. Voilà pourquoi, on appelle ces produits, des combustibles fossiles.

Le processus en quatre temps décrit dans le schéma suivant est le plus communément admis pour expliquer la formation du charbon :



Source : Le charbon de J.P. MUSSANO [1]

**Figure 1 : Processus de formation du charbon de terre**

Les bassins houillers se sont formés soit en bordure de mer, dans des zones lagunaires ressemblant, probablement, à la mangrove tropicale, soit dans des lacs peu profonds situés à l'intérieur des terres.

L'alternance de phases d'enfoncement des terrains et d'émergence a pu se produire des dizaines de fois au cours de la période carbonifère : les terrains houillers peuvent atteindre 1.500 à 3.000 m d'épaisseur au total. En général, ils sont constitués par une alternance de schiste et de grès avec des strates de charbon plus ou moins nombreuses. On appelle « toit » le rocher situé au dessus de la couche et « mur » celui situé en dessous.

Les terrains ont, ensuite, subi de multiples avatars géologiques qui ont conduit à la formation des continents tels que nous les connaissons actuellement : phases d'érection des massifs montagneux avec les plissements et les poussées qui les ont accompagnées, phases d'érosion, phases de nouveaux dépôts de sédiments... Il est donc peu fréquent que les couches de charbon soient régulières, altérées qu'elles ont été par les mouvements tectoniques qui les ont fait basculer en leur donnant des inclinaisons variables, qui les ont cassées en compartiments délimités par des failles.

### 3. COMPOSITION ET TYPES DE CHARBON DE TERRE ; [2] ; [3] ; [4] ; [5]

#### 3.1. Composition physique

Le charbon de terre est constitué physiquement de :

- matières minérales ;
- matières organiques ;
- eau ;
- matières volatiles.

##### 3.1.1. Les matières minérales

Les minéraux sont des morceaux de roches, de tailles diverses, sédimentés en même temps que la matière organique. Ce sont des silico-aluminates : grès, schistes, tufs volcaniques, etc. Après combustion, ces minéraux constituent les cendres et les scories. L'analyse des cendres révèle des éléments majeurs (silice, aluminium, calcium, magnésium) et des traces d'éléments tels que le soufre, le chlore, le fluor, le sodium ou le phosphore, des substances qui font l'objet de limites dans les spécifications contractuelles, en raison de leur incidence sur l'environnement ou les procédés.

##### 3.1.2. Les matières organiques

Le charbon au sens strict est la partie de couleur noire et d'origine organique. Suivant son aspect macroscopique, on distingue :

- Le fusain, fibreux, qui dérive de produits ligneux ;
- Le durain, mat, provenant de spores et de feuilles ;
- Le clarain, semi-brillant, de même provenance que le durain ;
- Le vitrain, brillant, formé d'une gelée cellulosique amorphe.

La minéralogie comporte deux constituants principaux: l'inertite et la vitrinite dont les proportions correspondent à une évolution vers des stades de plus en plus avancés. Le pouvoir réflecteur (R) de la vitrinite permet de classer les charbons en « *low rank* » (lignites) où  $R < 0,6\%$  et « *High rank* » (charbons bitumineux et anthracites) où  $R > 0,6\%$ .

### **3.1.3. L'eau**

La teneur en eau caractérise l'évolution des charbons et varie en raison inverse de leur pouvoir calorifique. Lors de leur enfouissement progressif, les débris végétaux sont soumis à une pression et à une température croissantes (100 bars et 50°C à 1 000 mètres), qui se traduit par une compression (10 m donnent 1 à 2 m de charbon), principalement par expulsion d'eau.

On distingue l'eau libre (*free moisture*) et l'eau liée (*inherent moisture*). L'eau libre est, par définition, celle qui s'évapore à la température ordinaire, l'eau liée celle qui s'évapore dans un courant d'air à 105°C. Elle représente la plus grande partie de l'humidité, notamment dans les lignites, l'eau liée, ou de constitution, est en général, moins de 10%.

### **3.1.4. Les matières volatiles**

Les matières volatiles sont des gaz adsorbés durant la formation des charbons et emprisonnés dans ceux-ci à une pression partielle voisine de celle de leur formation. Il s'agit essentiellement de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), de méthane ( $\text{CH}_4$ ) et autres hydrocarbures, ainsi qu'un peu d'argon (Ar) et d'hydrogène ( $\text{H}_2$ ). La teneur en matières volatiles diminue avec l'évolution du charbon en raison des conditions thermodynamiques croissantes, les gaz expulsés migrant vers la surface et pouvant être à l'indice de certains gisements pétroliers.

Le pouvoir calorifique de ces matières volatiles n'est pas nul mais inférieur à celui du charbon *sensu stricto*. Un charbon dévolatilisé (coke par exemple) a donc un pouvoir calorifique supérieur à celui du charbon dont il dérive.

Lorsque les charbons sont mis à l'atmosphère, les pressions partielles des gaz ont tendance à s'équilibrer avec cette dernière : on obtient ainsi un dégagement de gaz, notamment du méthane c'est-à-dire du grisou. La teneur en méthane est en moyenne de l'ordre de 5  $\text{Nm}^3/\text{t}$ . Elle peut atteindre plus de 10  $\text{Nm}^3/\text{t}$  dans les gisements souterrains, alors qu'elle est pratiquement nulle dans les carrières, le méthane s'étant échappé avant leur exploitation.

## **3.2. Composition chimique [2]**

En général, la composition chimique moyenne du charbon est la suivante :

- carbone : 78% ;
- cendres : 7,3% ;
- oxygène : 6,4% ;
- hydrogène : 5% ;
- azote : 1,4% ;

- humidité : 1,2% ;
- soufre : 0,7%.

#### 4. CLASSIFICATION DU CHARBON; [2]. ; [3] ; [6] ; [4] ; [5]

##### 4.1. Classification selon la composition

On classe le charbon de terre en différents types selon leur composition :

##### 4.1.1. La tourbe

La tourbe est de formation récente (moins de 2 millions d'années). Elle est de couleur noirâtre ou brune, sa matière fibreuse légère retient fortement l'eau. Elle est due à l'accumulation peu compacte des végétaux dont l'état de décomposition est assez inégal.

Les caractéristiques de la tourbe sont :

- teneur en eau très faible ;
- densité voisine de l'unité ;
- teneur en carbone faible : 50 à 60% ;
- forte teneur en matières volatiles : 60% ;
- sa combustion dégage beaucoup de fumée et peu de chaleur (3 000 kcal/kg).

##### 4.1.2. Le lignite

Le lignite est de formation plus ancienne que la tourbe (ère tertiaire, 40 à 140 millions d'années). Il est de couleur noire ou brune noirâtre. Sa structure fibreuse laisse apparaître des rameaux et de grosses branches. Il est peu riche en carbone et en hydrogène et contient souvent de la pyrite qui dégage du  $\text{SO}_2$  et du  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .

Les caractéristiques du lignite sont :

- teneur en eau assez forte ;
- densité plus faible que celle de la houille ;
- teneur en carbone plus élevée que celle de la tourbe ;
- teneur élevée des matières volatiles : 50% ;
- faible pouvoir calorifique inférieur : 4 000 à 6 000 kcal/kg car il contient de nombreuses impuretés génératrices de pollution.

### 4.1.3. La houille

La houille est le charbon le plus ancien, s'étant formée durant l'ère primaire. On ne peut y déceler la trace des éléments végétaux qui le constituent qu'au microscope. C'est du charbon de qualité.

Les caractéristiques de la houille sont :

- teneur en eau réduite : de 2 à 7% ;
- densité : 1,2 à 1,5 ;
- haute teneur en carbone : 70 à 90% ;
- teneur en matières volatiles plus faible que pour le lignite : 10 à 40% ;
- haut pouvoir calorifique inférieur : 5 970 à 7 000 kcal/kg.

L'analyse des diverses houilles a montré qu'elles contiennent de 70 à 94% de carbone. Suivant leurs teneurs en carbone et en matières volatiles, on distingue les variétés suivantes :

**Tableau 1 : Variétés de houilles**

Variétés de houille	Teneur en carbone (%)	Teneur en matières volatiles (%)
Anthracite	97	< 8
Houille maigre	86 à 93	8 à 26
Houille grasse	81 à 85	26 à 45
Houilles à gaz ( <i>channel-coal, bogheads</i> )	70 à 80	45 à 66

Source : D. RAMAMPIHERIKA [3]

### 4.1.4. L'anthracite

L'anthracite est une variété supérieure de la houille. Il est issu de la transformation métamorphique de la houille sous l'action de la pression et de la température. C'est un charbon contenant 90 à 95% de carbone libre ou combiné à d'autres éléments H, S, etc. C'est un solide brillant, dur, qui s'enflamme difficilement mais brûle en laissant très peu de cendre. Il est très apprécié comme combustible des poêles et des chaudières des petites installations de chauffage central.

Les caractéristiques de l'anthracite sont :

- densité élevée : 1,7 ;
- teneur en carbone très élevée : 90 à 95% ;
- teneur en matières volatiles très faible : 5% ;
- pouvoir calorifique inférieur très élevé.

## 4.2. Classification selon le pouvoir calorifique

Les classifications des charbons s'appuient sur différents caractères et varient donc suivant les caractères principaux choisis. Le tableau ci-dessous présente la classification arrêtée par le groupe de travail charbon de la CEE, en regard de la dénomination utilisée par l'AIEA et par la France. Cette classification retient le pouvoir calorifique inférieur sur sec (séché à 105°C) comme paramètre principal.

On peut remarquer que compte tenu de l'humidité des charbons et de leur pouvoir calorifique respectif, le pouvoir calorifique réel des charbons varie dans des proportions considérables. Un lignite de 4 000 kcal/kg sur sec avec 30% d'eau libre n'a qu'une valeur calorifique de  $4\ 000 \times 0,7 = 2\ 800$  kcal/kg à l'extraction, soit en ordre de grandeur, le tiers d'un anthracite.

**Tableau 2 : Classification du charbon selon le PCI**

Classe	Tourbe	Lignite	Flambant sec	Flambant gras	Gras	Anthracite
Rang	Low	Low	Medium	Medium	High	High
PCI (kcal/kg)	1 000-1 500	3 500-4 500	4 500-6 500	6 500-7 800	6 500-7 800	7 800-8 500
Humidité %	>50%	25-50%	14-25%	5-10%	5-10%	1-6%
Matières volatiles %	>75%	50%	25-50%	30-40%	15-25%	<10%
Teneur en cendres	50%	30-50%	20-30%	10-20%	10-20%	0-10%
Réflexion vitrinite (indice)	<0,30.	0,30.	0,35-0,45	0,5-1,25	1,5-2,0	2,0-5,0

Source : [www.planete-energie.com/contenu/charbon/](http://www.planete-energie.com/contenu/charbon/) [6]

Le « charbon-vapeur » utilisé par les centrales correspond typiquement (mais non exclusivement) aux charbons flambants de la classification ci-dessus.

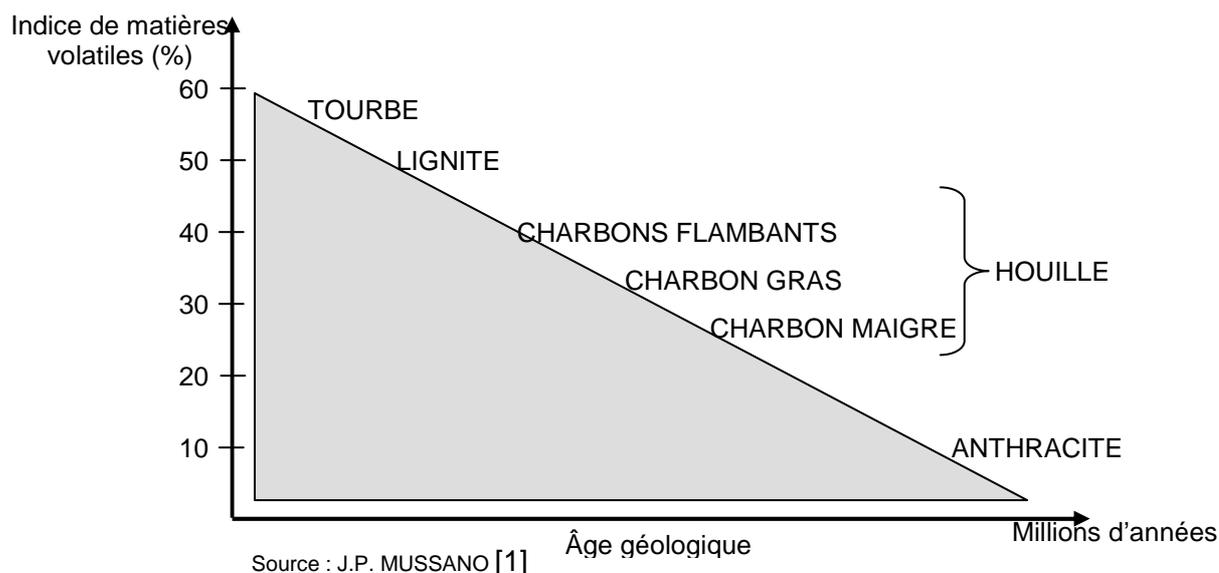
## 5 CARACTÉRISATION DU CHARBON DE TERRE [21]

Les charbons sont caractérisés par un ensemble de critères qu'on doit vérifier pour s'assurer que le produit correspond bien aux spécifications des installations d'utilisation. On peut distinguer sept principaux critères pour déterminer la qualité d'un charbon :

### 5.1. L'indice de matières volatiles

Il détermine la rapidité de la combustion. Il est exprimé en %.

Sous l'effet de la chaleur, certains constituants du charbon dégagent des gaz, hydrogène et hydrocarbures, qui s'enflamment. Le charbon riche en matières volatiles subit une combustion rapide, alors que le charbon pauvre en matières volatiles a une combustion lente.



**Figure 2 : Indice de matières volatiles des différents types de charbon de terre**

### 5.2. Le pouvoir calorifique

Il indique la quantité de chaleur dégagée par la combustion d'une masse définie de charbon. Il s'exprime en kilocalorie par kilogramme (kcal/kg). Le pouvoir calorifique augmente du lignite à l'anhracite : certains lignites pauvres ont un pouvoir calorifique inférieur à 3 000 kcal/kg, les houilles atteignant 8 000 kcal/kg. Afin de pouvoir effectuer la comparaison entre pays et entre combustibles minéraux solides, on utilise la notion de tonne équivalent charbon (Tec), une moyenne de l'ensemble des charbons qui correspond à un pouvoir calorifique de 28 109 Joules ou de 6 700 kcal/kg. On notera qu'une tonne équivalent pétrole (Tep) vaut 1,5 tonne équivalent charbon (Tec).

### 5.3. L'humidité

L'indication du pouvoir calorifique doit aussi être assortie du pourcentage d'humidité, en général, de quelques points. En effet, on ne peut éliminer toute l'humidité du charbon, car environ 2% font partie intrinsèque de la matière carbonée. Par ailleurs, le transport, la manutention et la préparation des charbons impliquent, souvent, une addition d'eau au produit brut.

### 5.4. La teneur en cendres

C'est le pourcentage de résidu de la combustion du charbon. Par ailleurs, la composition de ces cendres a une caractéristique importante vis-à-vis des chaudières. Elle définit leur température de fusion, qui peut varier de quelques centaines à 1 300°C. La teneur en cendres a aussi des effets sur l'abrasivité du produit.

### 5.5. La teneur en soufre

La teneur en soufre est un point important vis-à-vis de l'environnement et du stockage (risque d'auto-inflammation par catalyse). Lors de la combustion du charbon, le soufre se mélange avec

l'oxygène de l'air et donne de l'anhydride sulfureux, gaz toxique pouvant contribuer à la formation de pluie acide.

### **5.6. La granulométrie**

Elle conditionne le transport, le stockage et la manutention du charbon. On distingue les «classés» de 2 à 8 cm, les « grains » de 5 à 20 mm, les « fines » de 1 à 10 mm, les « pulvérisés » broyés à moins de 100 µm pour des utilisations particulières, mais aussi les « tout-venant », mélanges peu homogènes de 1 à 20 mm avec plus de cendres, les « mixtes » produits contenant 20 à 30% de cendres, qui ne peuvent être brûlés que dans les grandes centrales thermiques...

### **5.7. L'indice de gonflement**

L'indice de gonflement donne une indication sur la capacité du charbon à se transformer en coke. Certains charbons, portés à haute température, peuvent augmenter de volume d'une manière importante : jusqu'à 8 fois. Cet indice est aussi lié au pouvoir agglutinant des particules de charbon entre elles.

## **6. UTILISATIONS DU CHARBON DE TERRE [2] ; [3]**

Toutes les classes de charbon ont de la valeur et un usage. Depuis des siècles, on alimente les feux de cheminée avec de la tourbe et plus récemment avec des briquettes de tourbe et de lignite que l'on brûle dans des fourneaux. Les centrales électriques, ainsi que l'industrie tous secteurs confondus, sont les plus gros consommateurs de charbon. Les producteurs d'acier utilisent la houille métallurgique, ou coke, combustible obtenu par distillation en vase clos du coaltar ou goudron de houille. Celui-ci ne contient que très peu de matières volatiles, et est produit à environ 1 000°C. Il est composé principalement d'hydrocarbures aromatiques, de phénols et de quelques composés à base d'azote, de soufre et d'oxygène. Le procédé de production du coke donne de divers sous-produits chimiques, qui sont utilisés dans la fabrication de nombreux autres produits.

Entre l'aube du XIX<sup>e</sup> siècle et la période de la Seconde guerre mondiale, le charbon fut, également utilisé dans la production de gaz combustibles. De même, des huiles minérales peuvent être produites suivant des techniques de liquéfaction de la houille. La transformation de cette dernière en gaz combustibles et autres produits a diminué une fois le gaz naturel disponible en grande quantité. Toutefois, dans les années 1980, la gazéification et les nouvelles technologies de la houille propre ont connu un regain d'intérêt auprès des pays industrialisés.

Certains produits issus de la combustion du charbon ont des effets nuisibles sur l'environnement. Calciner du charbon génère, entre autres des sous-produits et du gaz carbonique. D'après certains scientifiques, en raison de l'usage très répandu du charbon et d'autres combustibles fossiles, la quantité de gaz carbonique dans l'atmosphère terrestre pourrait croître au point de provoquer des changements climatiques. Lors de la combustion, le soufre et l'azote présents dans le charbon forment aussi des oxydes pouvant provoquer des pluies acides. Les émissions d'anhydride sulfureux (SO<sub>2</sub>) générées par les nouvelles

installations fonctionnant au charbon sont contrôlées depuis les années 1970, en application des dispositions gouvernementales mises en place par les différents pays industrialisés. Résultat : les émissions de SO<sub>2</sub> ont baissé, même si la consommation de charbon a augmenté.

7. RESSOURCES, RÉSERVES ET PRODUCTION DE CHARBON DE TERRE ; [2]. [3] ; [4]. [5] ; [6] ;

### 7.1. Ressources

Le terme « ressource » a plusieurs acceptions suivant le pays considéré. Théoriquement il s'agit des quantités de charbon estimées à l'intérieur de bassin charbonnier, sur la base d'informations de qualités diverses, conduisant à leurs caractérisations en prouvées, probables ou possibles, suivant l'erreur d'estimation. Les auteurs appliquent aux volumes géologiques des contraintes telles que puissance minimum de la couche ou profondeur maximum, de façon à ne pas comptabiliser des ressources qui ne pourraient en aucune façon, et même partiellement, être exploitées dans les conditions technico-économiques envisageables.

L'institut allemand des géosciences et des matériaux (BGR) a récemment effectué un inventaire planétaire de ces ressources (Hanovre 1998). Celles-ci sont de 5 508 milliards de Tec de charbon et de 1 160 milliards de Tec de lignites.

Si l'on note que 1 tonne équivalent charbon (Tec) contient 7 000 kcal/kg et qu'en moyenne 1 tonne de charbon correspond à 0,8 Tec et 1 tonne de lignite à 0,3 Tec, on arrive à une ressource mondiale de 4 754 milliards de tonnes brutes.

Une meilleure reconnaissance et l'internationalisation des échanges conjuguent leurs effets pour diminuer, chaque année, cet inventaire de réserves :

**Tableau 3 : Évolution des ressources mondiales de charbon**

Année	Ressources (milliards de Tec)
1980	11.062
1988	8.034
1993	7.608
1997	6.668

Source : Institut allemande des géosciences et des matériaux (BGR) 2001 [6]

Bestougeff (1978) considère que 20% des gisements se sont formés durant l'ère carbonifère, 35% à l'ère permienne, 17% à l'ère jurassique, 13% au crétacé et 13% à l'ère tertiaire.

Bien que la quasi-totalité des pays soit dotée de ressources en charbon, la répartition par continent est inégale :

**Tableau 4 : Répartition des ressources par continent**

Continent ou sous-continent	Ressources (%)
Amérique du Nord	11
Asie	41
Ex-URSS	37
Europe	5
Australie-Océanie	3
Afrique	2
Amérique du Sud	1
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>

Source : Institut allemande des géosciences et des matériaux (BGR) 2001 [6]

L'hémisphère boréal (93%) est mieux doté que l'hémisphère austral (7%). (Source : BGR).

On doit souligner que les ressources comptabilisées dans les différents pays ne sont pas de « qualité » équivalente : les États-Unis, par exemple, disposent d'un inventaire précis et réactualisent périodiquement leur ressources. Ce qui n'est sans doute pas le cas de l'ex-URSS ou de la Chine. Ce qui explique en particulier, la faiblesse relative des ressources de l'Amérique du Nord.

Les plus grands bassins, en ordre d'importance décroissant, sont les suivants:

- Bassin permo-carbonifère de Russie du Dombass et du Kazakhstan ;
- Plateforme jurassique crétacée de Sibérie ;
- Bassin de l'Ouest américain et du Canada (jurassique et tertiaire) ;
- Plateforme chinoise et Mongolie extérieure (permo-carbonifère et jurassique) ;
- Carbonifère des Appalaches.
- Bassin varisque nord-européen
- Charbon du Gondwana, permo-triasique d'Australie, du sud de l'Inde, de l'Afrique et du Brésil
- Bassins crétacé et tertiaire de Colombie-Vénézuéla et du Chili.

## **7.2. Réserves mondiales [6]**

L'AIE comptabilise chaque année les réserves de charbon. Ces réserves correspondent aux quantités de charbon brut que les sociétés minières (à défaut des organismes nationaux) considèrent pouvoir extraire dans les conditions techniques et financières locales envisageables à moyen terme.

Pour un gisement dont les réserves *in situ* sont de 100, les réserves retenues sont fréquemment de l'ordre de 50 après déduction des abandons dans les stocks de sécurité ou à l'extérieur des profils de carrière, et la prise en compte du taux de défilage.

**Tableau 5 : Réserves mondiales de charbon**

<b>Réserves (millions de tonnes)</b>	<b>Charbon</b>	<b>Lignite</b>	<b>Total</b>
Amérique du Nord	116.707	139.770	256.477
Amérique du sud et centrale	7.839	13.735	21.574
Europe centrale	41.664	80.368	122.032
Ex URSS	97.476	132.702	230.178
Moyen Orient	193	0	193
Afrique	61.162	250	61.412
Australie	47.300	43.100	90.400
Chine	62.200	52.300	114.500
Autres Asie Pacifique	74.950	12.495	87.445
<b>Total Monde (tonnes métriques brutes)</b>	<b>509.491</b>	<b>474.720</b>	<b>984.211</b>
<b>Ressources (tonnes métriques brutes)</b>	<b>5.508.118</b>	<b>1.160.000</b>	<b>6.668.118</b>
<b>Ratio réserves/ressources</b>	<b>9%</b>	<b>41%</b>	<b>15%</b>

Source : Institut allemande de géosciences et des matériaux (BGR) 2001 [6]

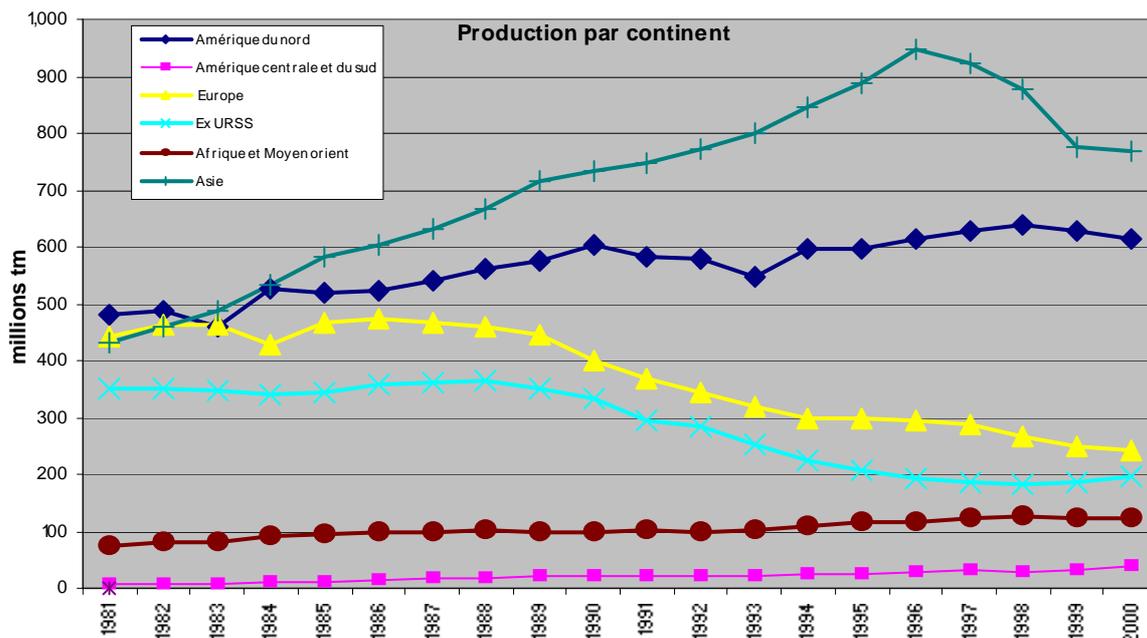
Contrairement aux ressources, on constate que ces réserves sont équitablement réparties géographiquement, à l'exception notable du Moyen-Orient qui, il est vrai, dispose d'autres ressources.

La très faible partie des ressources charbon (9%), traduite en réserve (ratio réserve/ressources), est révélatrice de l'incidence des contraintes économiques. Après privatisation de ses charbonnages, la Grande-Bretagne ne comptabilise plus que 1% de ses ressources en réserve. À l'opposé, l'Inde, où les charbonnages sont nationalisés, en comptabilise 46%. Les États-Unis et l'Australie retiennent 23 et 24% : ces pays sont dans le domaine concurrentiel mais disposent de bons gisements, et leurs ressources sont réajustées périodiquement.

### **7.3. Production mondiale [6]**

En 1999 la production mondiale de charbon s'est élevée à 4 345 millions de tonnes (2 146 millions de Tep), dont 879 millions de tonnes de lignite, 520 millions de tonnes de charbon industriel et 2 946 millions de tonne de charbon vapeur.

Après avoir crû régulièrement, depuis le début du siècle, la production semble être passée par un maximum de 4 765 millions de tonnes en 1989, pour se stabiliser, aux aléas de la croissance près, depuis. Cette décroissance relative affecte surtout l'Europe (coûts excessifs), la Chine (restructuration) et l'ex-URSS (demande moindre et dénationalisation). La production des autres pays du monde continue à croître.



Source : TEISSIE J. & al : Planète énergie 2001 [6]

**Figure 3 : Évolution de la production mondiale de charbon par continent**

Les principaux producteurs sont :

**Tableau 6 : Les principaux pays producteurs de charbon**

Pays	Production		
	(millions de t)	Millions de Tep	%
Chine	1.029	517	23
États-Unis	914	584	27
Ex URSS	350	186	9
Inde	290	145	7
Australie	225	150	7
<b>Afrique du Sud</b>	<b>223</b>	<b>118</b>	<b>5</b>

Source : TEISSIE J. : Planète énergie 2001 [6]

On notera la qualité variable des charbons produits : la Chine, première en tonnes brutes produites, est derrière les États-Unis en Tep. De plus, les États-Unis produisent 4 fois plus par habitant.

Dans l'OCDE, la production de charbon a fait l'objet de restructurations très importantes avec la constitution de grands groupes miniers spécialisés. Les dix groupes les plus importants réalisent 820 millions de tonnes par an, soit 50% de la production :

**Tableau 7 : Les groupes miniers producteurs de charbon**

<b>Groupes miniers</b>	<b>Production (millions de tonnes)</b>
Peabody Group	163
Rio Tinto	132
Arch coal	103
BHP Billiton	93
RAG international	75
Consol (RWE)	70
Anglo Coal	65
Sasol	50
Glencore/Enex	36
RAG DFK	33

Source : TEISSIE J., Planète énergie 2001 [6]

Cette restructuration est la conséquence du développement des échanges internationaux qui ne permettent qu'aux plus compétitifs de survivre dans un marché de plus en plus concurrentiel. Si l'on remarque que les productivités sont encore très disparates : 300 tonnes de charbon par ouvrier et par an en Chine, 4 000 tonnes en RSA et 8 500 aux USA (15 000 dans les meilleures exploitations) on peut conclure que les restructurations ne sont pas terminées. Dans un premier temps, des gains de productivité sont possibles, permettant aux exploitations les moins performantes d'améliorer leur situation. Dans un deuxième temps, un avantage en faveur des pays pratiquant une dévaluation compétitive devient déterminant : l'Europe disparaît, alors que la RSA, l'Indonésie et la Colombie voient leur production croître.

Le charbon est, malheureusement, la source d'énergie la plus polluante. Et cela d'autant plus que le charbon est jeune car son exploitation et sa combustion s'accompagnent d'importantes émissions atmosphériques : poussières, GES...

Madagascar dispose de gisements de charbon de terre. Ils se trouvent dans la région Atsimo-Andrefana, district de Betioky-Atsimo.

## 8. ÉTUDES EFFECTUÉES SUR LE CHARBON DE LA SAKOA [3 ;] [7] ; [8] ;[9]

### 8.1. Les gisements houillers de la Sakoa

Les principaux gîtes de charbon découverts jusqu'à présent à Madagascar sont :

- les gîtes de lignite de la région de Sambaina, dans la région du Vakinankaratra ;
- les gîtes de houille de la région de Betioky-Atsimo, dans la région Atsimo-Andrefana ;

Ces gîtes appartiennent à la famille aux assises d'Ecca du système de Karroo de l'Afrique du Sud. C'est au permio-triasique du type Gondwana.

## 8.2. Cadre historique

L'existence du charbon dans le sud-ouest de Madagascar est connue depuis 1908 dans la région de l'Imaloto, par DAUCHE, puis dans l'Ianapera par COLCANAP.

Le Service des Mines fit étudier en 1990 les régions du Ianapera et d'Imaloto par l'ingénieur EVESQUE.

En 1911 et en 1912, le professeur J. CIRAUD parcourut ces régions et soupçonna une extension plus grande.

En 1919, H. PIERRER de la BATHIE reprit l'étude de terrains sédimentaires du sud-ouest de Madagascar en établissant la stratigraphie et conseilla à son ami E. JAMET de rechercher le charbon dans la région de la Sakoa.

E. JAMET se mit au travail avec une grande obstination et en 1923 et 1924 découvrit de nombreux affleurements de charbon dans la zone Sakoa. Ces découvertes se heurtèrent à une incrédulité générale jusqu'au jour où, en 1925, le chef du service des Mines, GOURSAT, se rendit sur le lieux, fit une étude géologique et minière et conclut à l'exploitabilité du gisement.

En 1926, H. BESAIRIE procéda au lever de la carte géologique et à la prospection d'ensemble du bassin. La continuité des couches de charbon fut reconnue sur 110km.

À la même époque, la société Minerais et Métaux constitua un syndicat d'étude et commença des travaux en tranchées et descenderie qui furent terminés en 1929. La société des Charbonnages de la Sakoa fut constituée en 1931. Elle entreprit des études de mise en valeur, mais les ressources financières insuffisantes ne lui permirent pas d'aboutir.

Des permis de recherche furent accordés dans le Ianapera et transformés en concession en 1932 et 1943.

La question est reprise pendant la guerre et dès 1941, sous la direction du chef de Service des mines, EYSSAUTIER, une exploitation pilote fut ouverte par l'ingénieur SEREN. Le charbon fut d'abord transporté en charrette jusqu'à l'Onilahy, puis en pirogue jusqu'à Soalary. Bientôt, un petit chemin de fer à voie étroite fut posé sur 85km, de Soalara à Vohitsara, la jonction Vohitsara-Sakoa se faisant par camion. Cette installation fournit environ 13 000 tonnes jusqu'en 1945.

En 1945, la mission de l'Inspecteur général NORMANDIN, après une étude générale des problèmes, donna un rapport favorable dans lequel l'ingénieur en Chef SAVORNIEN déclara que « *le temps n'était plus à faire couler de l'encre mais à faire sortir du charbon.* »

Toutefois, le Fides en 1947, estimant qu'une étude plus complète devait être entreprise, le Bureau minier de la France d'outre-mer fut chargé de compléter les recherches. Ces dernières s'étalèrent de 1949 en 1957.

Les études géologiques du Bureau Minier (BLANC et MAC MATH) sont très importantes et ont abouti à l'établissement d'une carte géologique au 1/20 000, avec de nombreux documents descriptifs basés tant sur les travaux de surface ou souterrains que sur des investigations géophysiques.

De 1946 en 1972, la production totale est estimée à environ 40 000 tonnes de charbon.

En 1972, une étude de cokéfaction fut réalisée.

En 1978-1979, une étude de mise en exploitation du gisement du secteur de la Sakoa fut réalisée par la société polonaise Kopex et par la société Saarbrg Interplan (RFA). Cette dernière étude, en 1981, montra les possibilités d'utilisation du charbon de la Sakoa et analysa ses débouchés possibles.

En 1981, un syndicat belge, composé de Belgian Mining Ingeniers, de la Compagnie d'entreprise FFE et de la société Coockerill, est chargé d'étudier le développement du bassin houiller de la Sakoa.

Enfin, en février 1985, un accord portant sur l'étude des conditions d'exploitation du charbon de la Sakoa fut signé entre le gouvernement malgache et la compagnie britannique BP Coal, filiale de British Petroleum Company. Les études portent, d'une part, sur la confirmation des réserves et la quantité du charbon et, d'autre part, sur les études d'infrastructures routière et ferroviaire ainsi que sur la création d'un port minéralier dans la région de Toliara. Ces recherches devaient aboutir à une étude de faisabilité.

### **8.3. Cadre géographique et géologique**

Les bassins houillers de la Sakoa sont situés au sud-ouest de Madagascar, à 150 km du canal de Mozambique. Ils s'étendent sur plus de 110 km, suivant la direction nord-nord-est, de l'Imaloto aux sources de la Sakamena. Les affleurements se repartissent en quatre bassins qui vont du nord-est au sud-ouest :

- le bassin de l'Imaloto, situé au nord de l'Onilahy. Les couches sub-horizontales se suivent sur une dizaine de kilomètre le long de l'Imaloto et ses affluents de rive droite ;
- le bassin de Ianapera, à 40 km au Sud du bassin de l'Imaloto. Les affleurements du charbon sont irrégulièrement distribués sur la bordure du bassin ;
- le bassin de la Sakoa qui s'étend de l'Onilahy au village de Beroy, sur une soixantaine de kilomètre. On y distingue, du nord au sud, les secteurs suivants :
  - secteur de Vohibory,
  - secteur de Sahaazy,
  - secteur de la Sakoa. Compte tenu de la régularité de l'affleurement de la série houillère sur 16 km, c'est dans ce secteur que la majeure partie des travaux de recherches a été effectuée.
  - Secteur de Beroy.
- le bassin de la Sakamena, de direction parallèle à celle de la Sakoa, mais décalé de 6 km vers l'ouest. Les affleurements de la série houillère se suivent de façon continue sur 25 km.

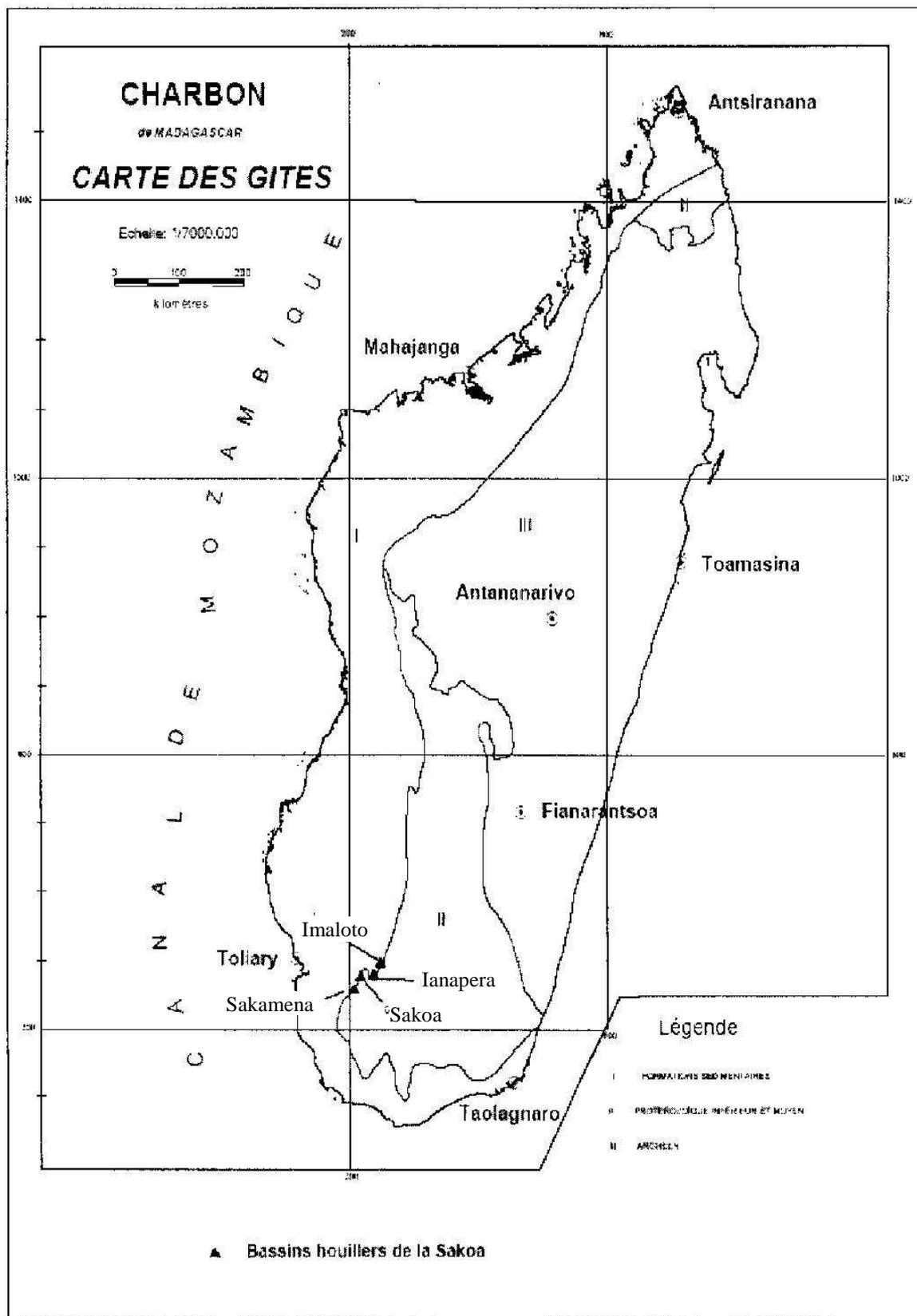
Les gisements houillers de Madagascar sont de type Gondwanien comme les gisements de l'Afrique australe. Ils sont constitués de deux bassins voisins, ceux de la Sakoa et de la Sakamena. Seul, le bassin de la Sakoa a présenté un intérêt économique dans les années 70.

De la base au sommet, la stratigraphie comprend :

- le socle cristallin précambrien pénéplaine ;
- une série détritique de base d'origine glaciaire comprenant des tillites, des schistes et des grès ;
- une série détritique, dite série rouge, composée de grès et arkoses continentaux ;
- la série houillère qui comprend plusieurs couches de charbon ;
- une série détritique continentale et laguno-marine dite série de la Sakamena.

L'ensemble sédimentaire repose en discordance sur un socle, suivant une orientation générale sud-ouest–nord-est et une pendage vers l'ouest entre 20 et 30°.

Les couches de charbon se regroupent en cinq ensembles. Seules, les couches supérieures III, IV et V sont intéressantes par leur continuité et leur épaisseur, et dont les deux dernières ont un intérêt économique valable.



5

Figure 4 : Carte géographique et géologique des bassins houillers

#### **8.4. Réserves**

Les ressources globales des bassins houillers de la Sakoa sont de l'ordre du milliard de tonnes (2 800 000 000 tonnes de charbon). Le secteur le plus intéressant, celui de la Sakoa, est allongé sur 18 km. Il y a cinq couches de charbon dont seules les trois couches supérieures (III, IV et V) sont importantes. Les réserves exploitables se situant à moins de 400 m de profondeur, sont évaluées à environ 170 millions de tonnes, pour ces trois couches.

### **9. CARACTÉRISTIQUES DU CHARBON DE TERRE DE L'AFRIQUE DU SUD [10]**

L'Afrique du Sud est le premier producteur de charbon d'Afrique, et le sixième mondial. Vu sa situation géographique, le charbon de l'Afrique du Sud pourrait être un concurrent direct du nôtre. C'est pour cette raison que nous nous intéressons à l'origine et à la qualité de son charbon.

#### **9.1. Origine et formation**

Du point de vue géologique, le charbon de l'Afrique du sud est inclus dans le système Karroo qui comprend les formations entre le Carbonifère supérieur et le Jurassique. L'épaisseur du système Karroo est de 19 000 pieds au Cap et diminue vers le nord. Elle ne dépasse pas 200 pieds dans les couches houillères de Witbank au Transvaal. Elle est encore moindre à l'est de Johannesburg.

Les charbons de la province du Cap sont situés dans les formations de Molteno (Rhetien), Ceux du Natal, du Transvaal et de l'État libre d'Orange dans les formations d'Ecce (Permien inférieur).

Enfin, on connaît des couches de charbon dans la formation Beaufort (Trias), dans les collines de Drakenberg, le long de la côte Zoulouland, dans le district de Stromberg. Mais leur qualité inférieure ne leur octroie, pour le moment, aucune valeur économique.

#### **9.2. Caractéristiques**

Les principales réserves de charbon de l'Afrique du Sud se trouvent dans les provinces du Cap, de Natal et du Transvaal. Ce dernier est le premier producteur de charbon d'Afrique du sud.

Les caractéristiques du charbon de ces principales réserves sont les suivantes :

**Tableau 8 : Caractéristiques du charbon de l’Afrique du Sud**

Province	Constituant	Teneur (%)
Cap	Matières volatiles	10 à 24
	Soufre	Présence
	Dolérite	Présence
Natal	Matières volatiles	16
	Soufre	élevée
	Dolérite	Présence
Transvaal	Matières volatiles	23
	Cendre	16
	Humidité	9

Source : [www.perser.fr/web/revue/home/](http://www.perser.fr/web/revue/home/) [48]

Les couches de charbon du Natal font suite à celles du Transvaal. Elles sont caractérisées par des intrusions fréquentes de dolérites, qui leur confèrent une allure anthraciteuse. Ce charbon est la meilleure d’Afrique du Sud. Il est réputé comme charbon à vapeur et malgré une teneur élevée en soufre, se prête à la cokéfaction.

**DEUXIÈME PARTIE :**  
**ÉTUDE DES CARACTÉRISTIQUES DU CHARBON**  
**DE TERRE DE LA SAKOA**

Afin d'assurer un meilleur fondement, dans nos recherches, nous avons entrepris l'étude des caractéristiques physico-chimiques et énergétique du charbon de terre de la Sakoa.

Par la suite, nous présentons quelques utilisations possibles du charbon relatives à ses caractéristiques techniques.

## 1. ÉTUDE DES CARACTÉRISTIQUES DU CHARBON DE LA SAKOA

Les paramètres ainsi déterminés, dans ce chapitre, sont :

- la nature du charbon ;
- la teneur en eau ;
- la teneur en matières volatiles ;
- la teneur en carbone ;
- la teneur en cendres ;
- la teneur en soufre ;
- le pouvoir calorifique inférieur (PCI).

Les secteurs ayant fait l'objet de notre étude sont :

- Namboreko ;
- Andremby ;
- Andranomanintsy.

Les coordonnées GPS de ces secteurs sont données dans le tableau suivant :

**Tableau 9 : Coordonnées GPS des secteurs**

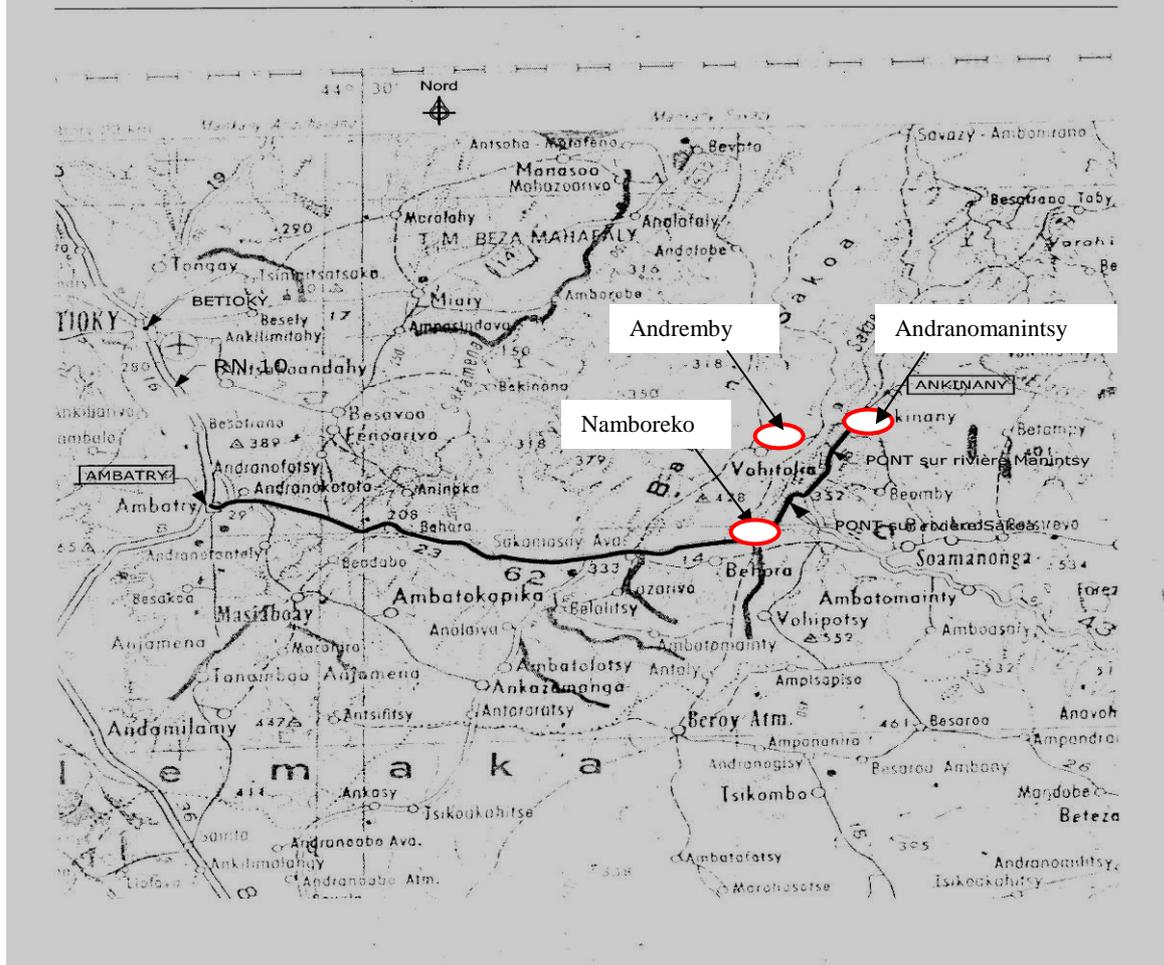
Secteur	Coordonnées GPS
Namboreko	S : 23 50 714
	EO : 44 43 653
Andremby	S : 23 49 468
	EO : 44 44 447
Andranomanintsy	S : 23 47 635
	EO : 44 45 558

Source : Auteur

## Carte de localisation de projet de réhabilitation de route

ANKINANY – AMBATRY

Longueur: 44.20km



Source : Les bassins d'Andremby Rapport BRGM, 1950 [7]

**Figure 5 : Localisation des secteurs**

### 1.1. Secteur de Namboreko

Nous avons pris quatre échantillons de charbon dans le secteur de Namboreko, dont la répartition est la suivante :

- deux échantillons dans la couche du faisceau supérieur :
  - un échantillon sur le toit (ou couche sus-jacente) ;
  - un échantillon sur le mur (ou couche sous-jacente) ;
- deux échantillons dans la couche du faisceau inférieur :
  - un échantillon sur le toit ;
  - un échantillon sur le mur.

Les résultats d'analyse de ces échantillons sont donnés dans le tableau suivant :

**Tableau 10 : Caractéristiques physico-chimiques de la houille de Namboreko**

Echantillons		Nature	Eau (%)	Matières volatiles (%)	Carbone (%)	Cendres (%)	Soufre (%)	PCI (kcal/kg)
Couche du faisceau supérieur	Toit	brillant	1,64	29,96	49,02	19,38	0,68	6 775
	Mur	terne	2,44	14,06	59,94	23,56	2,00	6 475
Couche du faisceau inférieur	Toit	brillant	7,74	24,21	50,45	17,60	0,49	6 424
	Mur	terne	2,04	18,46	54,86	24,64	0,45	6 296

Source : Laboratoire de l'OMNIS

Le tableau montre que les caractéristiques du charbon de Namboreko varient d'une couche à l'autre. Il y a une différence notable pour la même couche, entre le toit et le mur. Ainsi, les caractéristiques du charbon de Namboreko sont les suivantes :

- la teneur en eau varie de 1,64 à 7,74%, selon la couche du charbon ;
- la teneur en matières volatiles va de 14,06 à 29,96% ;
- la teneur en carbone est de 49,02 à 59,94% ;
- la teneur en cendres varie de 17,60 à 24,64% ;
- la teneur en soufre est de 0,45 à 2% ;
- le pouvoir calorifique inférieur va de 6 296 à 6 775 kcal/kg.

## 1.2. Secteur d'Andremby

Dans le secteur d'Andremby, trois échantillons de charbon ont été prélevés dans la grosse couche du faisceau supérieur. Ils se répartissent comme suit :

- un échantillon sur le toit ;
- un échantillon entre le toit et le mur ;
- un échantillon sur le mur.

Les résultats d'analyse de ces échantillons sont donnés dans le tableau suivant :

**Tableau 11 : Caractéristiques physico-chimiques de la houille d'Andremby**

Echantillons	Nature	Eau (%)	Matières volatiles (%)	Carbone (%)	Cendres (%)	Soufre (%)	PCI (kcal/kg)
Toit	brillant	3,46	27,04	50,24	19,26	2,56	6.634
Milieu	brillant	2,04	23,41	44,11	30,44	0,63	5.794
Mur	terne	1,63	15,37	48,94	34,06	0,37	5.603

Source : Laboratoire de l'OMNIS

Le tableau montre que les caractéristiques du charbon d'Andremby, provenant de la même couche, varient sensiblement du toit au mur. Les variations sont les suivantes :

- la teneur en eau va de 1,63 à 3,46% ;
- la teneur en matières volatiles est de 15,37 à 27,04% ;

- la teneur en carbone varie de 44,11 à 50,24% ;
- la teneur en cendres est de 19,26 à 34,06% ;
- la teneur en soufre va de 0,37 à 2,56% ;
- le pouvoir calorifique inférieur varie de 5.603 à 6.634 kcal/kg.

### 1.3. Secteur d'Andranomanintsy

Nous avons effectué deux prélèvements d'échantillon dans ce secteur, dont la répartition est la suivante :

- un échantillon sur l'ensemble des couches,
- un échantillon dans la mine souterraine d'où l'on a effectué l'extraction des charbons, citée dans la première partie du rapport.



**Photo 1 : Couches de charbon de terre d'Ankinany**

Les résultats d'analyse de ces échantillons sont donnés dans le tableau suivant :

**Tableau 12 : Caractéristiques physico-chimiques de la houille d'Ankinany**

Echantillons	Nature	Eau (%)	Matières volatiles (%)	Carbone (%)	Cendres (%)	Soufre (%)	PCI (kcal/kg)
Ensemble des couches	brillant	3,90	24,95	63,35	7,80	0,54	7.665
Galerie souterraine d'Ankinany	brillant	0,77	12,67	67,46	19,11	-	7.000

Source : Laboratoire de l'OMNIS

Le charbon de la Sakoa présente les caractères habituelles des houilles gondwaniennes, association de charbon terre dominant avec du charbon brillant, mélange d'éléments végétaux et minéraux conduisant à des teneurs en cendre généralement élevées.

Le charbon rentre dans la catégorie de la houille cutine et de spore à petits, voire très petits éléments. Du point de vue macroscopique, l'élément dominant est le durain en lit assez épais. Le vitrain forme des lits minces ou petites lentilles. Le tableau suivant nous montre les résultats d'analyse macroscopique du charbon de terre d'Andranomanintsy :

**Tableau 13 : Résultats d'analyse macroscopique de la houille d'Andranomanintsy**

Gisement	Nature	(%)	Cendres (%)	Matières volatiles (%)
Andranomanintsy	Vitrain	64	15	29,8
	Durain	33	34	31,8
	Pertes	3	-	-

Source : Laboratoire de l'OMNIS

La qualité du charbon varie en fonction des couches. Les résultats des analyses que le tableau suivant nous montre, le confirment :

**Tableau 14 : Caractéristiques physico-chimiques par couche de la houille d'Andranomanintsy**

Couches	Epaisseur (m)	Matières volatiles (%)	Cendres (%)	Soufre (%)	PCI (kcal/kg)
V	5 à 9, avec 3 à 5 de charbon	31	22	1	5.800
IV	3,5 à 7	26	17	0,6	5.400
III	1,2 à 1,8	29	32	-	-

Source : Laboratoire de l'OMNIS

## 2. POSSIBILITÉ D'UTILISATION [3]

Le charbon de terre de la Sakoa peut être utilisé directement, sans traitement, comme source d'énergie à usage multiple dans les industries. Cela d'après les caractéristiques déterminées précédemment.

Les possibilités d'utilisation sont :

### 2.1. Source d'énergie dans la production des matériaux de construction

Parmi les utilisateurs, on peut citer :

- **la cimenterie**

La cimenterie Holcim d'Ibity est une grande consommatrice de charbon de terre

**Tableau 15 : Consommation en charbon de terre de Holcim**

Consommation (en tonnes)	Année	Utilisateur
22 309	2000	Holcim d'Ibity
13 374	2001	Holcim d'Ibity

Source : Ramampihirika D [3]

Toutefois, les besoins en charbon de terre de la Sakoa ne sont que de 1 800 tonnes par an, à cause de la teneur en cendres élevée du charbon. Le reste doit être importé d'Afrique du Sud.

La Nouvelle cimenterie d'Amboanio a estimée sa consommation annuelle en charbon de terre à 12.000 tonnes en 1992.

- **la production de la chaux**

Entre 1985 et 1999, l'usine Soavita de Toliara a utilisé le charbon de terre pour la production de la chaux. Sa consommation en charbon de terre a été estimée à 800 tonnes en 1992.

- **la briqueterie**

Depuis l'année 2002, il y a trois groupes d'utilisateurs de charbon de terre pour la cuisson des briques à Toliara :

- Briqueterie du Sud-Ouest (usine de production de briques cuites sise à Andatabo) ;
- Graphia (association des artisans producteurs de briques cuites) ;
- Des artisans d'Antsokay Toliara, mais non associés au graphia.

Les besoins en charbon de terre de la briqueterie de Toliara ont été estimés à 300 tonnes en 1992.

## **2.2. Source d'énergie dans la centrale thermique :**

À Toliara, la société Rochefortaise, devenue animatrice du nouveau groupe « Scama-Rochefortaise » qui devait par la suite créer de nouvelles filiales, la SAR et Jamoka, se trouvait encore obligée d'utiliser du charbon de la Sakoa dans sa grande usine de Toliara.

En effet, la salle des machines, la centrale de cette industrie de la viande, était uniquement équipée d'installations ne pouvant produire d'énergie électrique que sur la base d'un combustible unique : le charbon.

## **2.3. Source d'énergie dans la chaufferie**

Le groupe « Scama-Rochefortaise », avec ses nouvelles filiales, la SAR et Jamoka, en plus de l'énergie électrique, utilise le charbon pour les chaufferies de l'usine. Cela pour obtenir la vapeur nécessaire aux ateliers des conserves diverses.

**Tableau 16 : Consommation en charbon de la chaufferie**

<b>Année</b>	<b>Besoins (en tonnes)</b>	<b>Utilisateur</b>
1941-1945	13 000	
1946-1972	40 000	Scama-Rochefortaise et autres

Source : Ramampihirika D [3]

En 1992, les besoins en charbon de terre de la chaudière de la société Indosuma ont été estimés à 5 000 à 10 000 tonnes.

## **2.4. Source d'énergie de navire**

Durant les années 40 et 50, des navires à vapeur, contraints de refaire leur provision en combustible à Madagascar, ont embarqué et utilisé du charbon de terre de la Sakoa.

## 2.5. Source d'énergie pour les locomotives

En 1924, les trois lignes existantes (Tanananarive-Tamatave, Tanananarive-Antsirabe, Moramanga-Ambatondrazaka) consommèrent 225 000 stères de bois. La chauffe se fit exclusivement au bois

En 1925, la situation des chemins de fer de la colonie fut extrêmement critique : toutes les forêts situées aux environs des lignes de chemin de fer furent abattues, et il fallut chaque jour aller chercher plus loin, en construisant tout un réseau de voies ferrées d'exploitation forestière.

C'est pour ces raisons que, devant le manque de bons combustibles minéraux (il n'y a pas de houille dans les cuvettes sédimentaires des plateaux, mais seulement du lignite), l'administration supérieure de la colonie pensa à l'électrification. Mais celle-ci n'a jamais été réalisée pour des raisons techniques.

Le charbon d'Ianapera, essayé sur le chemin de fer « Tanananarive-Côte Est », donna toute satisfaction, malgré sa teneur en cendres élevée. D'après l'opinion autorisée de M. BERHOUN, directeur des chemins de fer de la colonie, la haute teneur en cendres n'est pas un grave inconvénient. Ces dernières s'éliminent facilement à travers la grille.

On admit qu'une tonne de charbon représente l'équivalent de cinq stères de bois de chauffage.

## 2.6. Source d'énergie dans les ménages

Dès 1955, la Sepim essaya d'utiliser le charbon de terre en additif à des cactus et à des sisals séchés. Le but fut d'en faire un combustible plus commercialisable, donc présentable sur les marchés locaux, sous forme de masse reconstituée, participant ainsi à la protection de forêts déjà bien menacées.

Toutefois, le charbon de terre utilisé comme combustible domestique, émet fumée et odeur à cause de sa teneur en matières volatiles élevée, en plus du soufre. Ainsi, son usage peut affecter la santé des utilisateurs. C'est la principale raison qui nous a poussé à étudier la transformation du charbon de la Sakoa en combustible domestique,

À titre d'information, nous avons comparé le pouvoir calorifique du charbon de terre de la Sakoa à celui d'autres combustibles tels que le bois de chauffe, le gaz, le gazole et le fuel :

**Tableau 17 : Pouvoir calorifique de quelques combustibles**

Caractéristique	Charbon de terre	Bois	Gaz	Gazole	Fuel
PCI (kcal/kg)	6 500	3 420	9 000	10 500	9 700

Source : Ramampihelika D [3]

Le charbon de terre de la Sakoa est deux fois plus calorigène que le bois de chauffe.

## CONCLUSION

La qualité du charbon de terre de la Sakoa varie d'un secteur à l'autre et d'une couche à l'autre. Les études que nous avons menées dans le secteur de Namboreko, Andremby et Andranomaninty ont montré que :

- la teneur en eau peut varier de 0,77 à 7,74% ;
- la teneur en matières volatiles est comprise entre 17,60 à 34,06% ;
- la teneur en carbone va de 44,11 à 63,35% ;
- la teneur en soufre varie de 0,37 à 2,56% ;
- le pouvoir calorifique inférieur varie de 5 663 à 7 665 kcal/kg.

Le charbon présente les caractères habituels du charbon gondwanien :

- dur ;
- barré ;
- teneur en cendres élevée.

Les différentes analyses effectuées permettent d'affirmer que le charbon de terre de la Sakoa peut être utilisé dans les centres de consommation malgaches, sans traitement préalable. Les propriétés du charbon « tout-venant » ne répondent toutefois pas aux exigences de qualité en vigueur sur le marché international du charbon pour centrales.

Si le charbon destiné à la consommation malgache peut être utilisé sans traitement préalable, pour l'exportation par contre, ce charbon devrait présenter des teneurs en cendres de 15% environ et un pouvoir calorifique minimal de quelque 6 550 kcal/kg. Ce qui est possible en mélangeant des charbons lavés provenant des couches IV et V, en proportion respective de 2/3 – 1/3.

Toutefois, nous avons focalisé notre étude sur l'usage domestique du charbon de la Sakoa.

**TROISIÈME PARTIE :**  
**ÉTUDE DE LA TRANSFORMATION DU CHARBON**  
**DE TERRE EN COMBUSTIBLE DOMESTIQUE**

Le bilan énergétique de la Grande île a révélé une forte dominance de la biomasse dans sa consommation. L'énergie domestique constitue le principal consommateur d'énergie, soit 63,3% de l'ensemble des combustibles utilisés. Le bois énergie constitue la source d'énergie la plus utilisée par les ménages : 86% de l'énergie utilisée en 1994. **[11]**.

Cette situation est très critique pour le pays. La pression sur les ressources forestières augmente à cause de la hausse de la demande (croissance de la population, de l'industrie et de l'artisanat).

Le bois énergie couvre la quasi-totalité des besoins énergétiques des ménages de la ville de Toliara. Sur la base de l'étude du PNEBE en 2000, la consommation annuelle en bois énergie de la ville de Toliara a atteint 300 000 m<sup>3</sup> dont 93% pour le charbon et 7% pour le bois de chauffe. En tenant compte de l'impact de l'adoption des fourneaux améliorés et de la pénétration d'autres sources d'énergie, la demande de la ville de Toliara dans 50 ans se situerait aux environs de 350 000 m<sup>3</sup> de bois par an. Sans ces hypothèses, cette consommation se situerait aux alentours de 650 000 m<sup>3</sup> de bois par an. La consommation actuelle correspond au volume d'accroissement annuel, de 600 000 ha de forêts naturelles. Et l'on peut se poser la question de la pérennité de la filière puisqu'à ce jour, seulement 183.600 ha sont exploitables, officiellement. **[12]**

Pourtant, la région Atsimo-Andrefana dispose d'un gisement de houille. Il ne fait l'objet d'aucune exploitation de grande envergure, actuellement.

Ce sont aussi les raisons qui nous ont poussé à étudier la faisabilité de la transformation du charbon de terre de la Sakoa en combustible domestique. Le but de la présente étude est non seulement la conservation de la biodiversité de l'écorégion des forêts d'épineux, en harmonie avec le bien-être de la population régionale, mais aussi l'élaboration d'une politique énergétique visant à limiter la dégradation des ressources forestières des régions Atsimo Andrefana, Anosy et Androy.

Pour atteindre notre objectif, nous avons effectué le travail en deux étapes :

Première étape : Étude de la transformation du charbon au niveau laboratoire. 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. Il comporte les travaux suivants :

- le *Drop Test* ;

- le test de la résistance à la compression ;

## 1. ÉTUDE DE LA TRANSFORMATION DU CHARBON DE TERRE EN COMBUSTIBLE DOMESTIQUE [13] ; [14] ; [15] ; [16]

### 1.1. Processus de transformation du charbon de terre en combustible domestique

Le processus de transformation du charbon de terre en combustible domestique comporte les opérations suivantes :

- le broyage-calibrage du charbon de terre ;
- la cokéfaction ou la distillation du charbon ;
- la mise en forme des briquettes ;
- le séchage des briquettes ;

Le processus de transformation du charbon de terre en combustible domestique est montré par le schéma simplifié suivant :

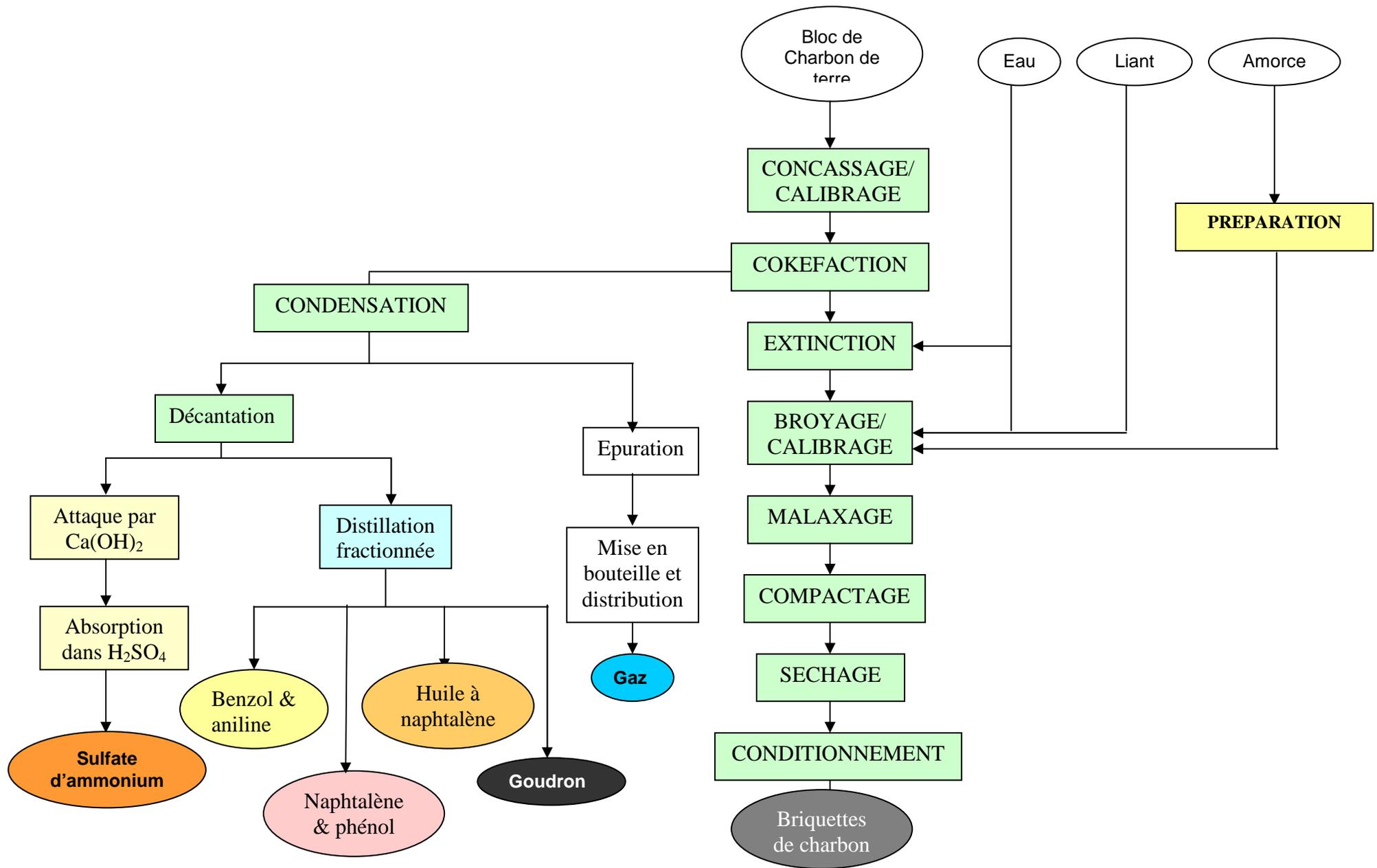


Figure 6 : Processus de transformation de la houille en combustible domestique

### **1.1.1. Concassage et calibrage**

Après extraction, le charbon de terre se présente sous forme de gros blocs. Ainsi, le concassage-calibrage consiste à réduire la taille du charbon et à le classer selon sa taille, pour faciliter la cokéfaction.

### **1.1.2. Cokéfaction**

Elle consiste à chauffer le charbon de terre à l'abri de l'air, à une température de 700 à 1 000°C. La cokéfaction de la houille donne les produits utiles suivants :

- le coke ou semi-coke ;
- les matières non condensables ou gaz ;
- les matières condensables (liquides et solides) ;

#### *1.1.2.1. Le coke ou semi-coke*

Le coke est le produit principal de la cokéfaction de la houille. Il ne contient plus de matières volatiles. Ainsi, il brûle sans émission de fumée ni odeur. On le prépare en calcinant la houille à 1 000°C.

Le semi-coke contient encore quelques quantités de matières volatiles. On le prépare en calcinant la houille entre 700 et 900°C.

#### *1.1.2.2. Les matières non condensables*

Les matières non condensables sont constituées par :

- les gaz et vapeurs non condensables tels que :
  - l'hydrogène ( $H_2$ ) ;
  - le méthane ( $CH_4$ ) ;
  - l'acétylène ( $C_2H_2$ ) ;
  - l'éthylène ( $C_2H_4$ ) ;
  - l'azote en faible quantité ;
- les gaz toxiques tels que :
  - l'anhydride carbonique (CO) ;
  - le cyanogène ( $C_2N_2$ ) ;
  - l'acide cyanhydrique (HCN) ;
  - le sulfure d'hydrogène ( $H_2S$ ) ;
  - la vapeur de benzène et de naphthalène.

Le mélange forme le gaz de houille ou gaz de ville. Celui-ci nécessite une épuration convenable pour éliminer les gaz toxiques.

### 1.1.2.3. *Les matières condensables*

Les matières condensables s'obtiennent par refroidissement. Elles sont constituées par :

- les eaux ammoniacales dans la couche supérieure ;
- les goudrons dans la couche inférieure.

En ajoutant de la chaux aux solutions ammoniacales, de l'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) se dégage. En dissolvant l'ammoniac dans l'acide sulfurique, on obtient le sulfate d'ammonium.

La distillation fractionnée des goudrons nous donne les produits suivants :

- les huiles légères, à une température inférieure à  $150^\circ\text{C}$ . Elle est constituée par le benzol et l'aniline ;
- les huiles de densité moyenne, à une température comprise entre  $150$  et  $230^\circ\text{C}$ . Elles sont constituées par le naphthalène et le phénol ;
- les huiles lourdes, à une température supérieure à  $230^\circ\text{C}$ . Elles sont constituées par l'huile à naphthalène, le bitume et l'antracène ;
- les brais de goudron formés par le résidu de la distillation.

### 1.1.3. *Mise en forme des briquettes*

À la sortie du distillateur, la taille et la forme du coke ou semi-coke sont variables. L'utilisation d'un tel produit par le ménage n'est pas commode. Ainsi, il est important d'effectuer la mise en forme des briquettes.

Elle consiste, donc, à donner aux briquettes une forme et une taille régulières, une meilleure présentation et un usage commode.

Cette opération permet également d'optimiser la gestion des aires de stockage des produits finis, ainsi que leur transport.

Les étapes du processus de transformation de cette mise en forme sont l'extinction, le broyage-calibrage, le malaxage et le compactage.

#### 1.1.3.1. *Extinction*

Elle consiste au refroidissement du coke ou semi-coke par arrosage d'eau à la sortie du distillateur.

#### 1.1.3.2. *Broyage-calibrage*

Après extinction, la dimension du coke ou semi-coke reste encore élevée. Ainsi, le broyage-calibrage consiste à réduire sa taille pour faciliter le compactage.

### 1.1.3.3. *Malaxage*

Il consiste à mélanger le coke ou semi-coke avec le liant et l'amorce pour obtenir un mélange homogène. Le malaxage assure une meilleure compacité au mélange.

### 1.1.3.4. *Compactage*

Le compactage consiste à donner au mélange de coke ou semi-coke, liant et amorce la pression convenable afin de lui conférer une forme régulière. Et donc une meilleure compacité.

### 1.1.4. **Séchage des briquettes**

Le séchage a pour but d'enlever l'eau introduite au cours des opérations de mise en forme des briquettes (malaxage). Cette opération est capitale dans le processus de transformation du charbon en combustible domestique. De sa bonne conduite dépend la qualité technique du produit fini. Trop court, il 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 compromis pour cette opération. Il peut se faire de deux manières : séchage à l'air libre et séchage en atmosphère contrôlée.

## 1.2. **Étude, conception et élaboration des matériel et équipements**

Afin de bien mener la transformation du charbon de terre en combustible domestique, nous avons effectué l'étude, la conception et la réalisation des matériel et équipements. Il s'agit de :

- distillateur artisanal ;
- matériel de compactage artisanal ;

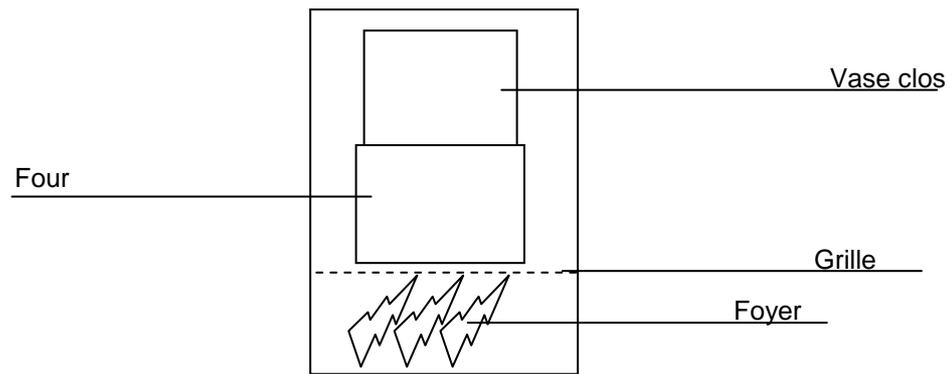
### 1.2.1 ***Distillateur artisanal***

Comme nous l'avons vu dans la deuxième partie du présent ouvrage, la teneur en matières volatiles du charbon de la Sakoa varie de 17 à 34%. Ces matières volatiles contiennent des gaz toxiques tels que le cyanogène, l'acide cyanhydrique, le sulfure d'hydrogène...

Ainsi, la combustion directe du charbon émet des gaz nuisibles à la santé et à l'environnement. Il est donc utile de diminuer la teneur en matières volatiles du charbon pour que celui-ci soit utilisable comme combustible domestique. La diminution ou l'élimination des matières volatiles du charbon se fait par cokéfaction ou distillation.

Avant de se lancer dans la réalisation du distillateur, il s'avère utile de tester la faisabilité technique de la distillation en vase clos. Du résultat de ce test dépend la réalisation du matériel, qui fonctionnera en vase clos dans son expression la plus simple.

Le matériel est constitué de deux viroles s'emboîtant l'une sur l'autre de façon étanche. Le tout est mis en place dans une enceinte fermée, au dessus d'une source chaude. Le distillateur peut être représenté par le schéma simplifié suivant :

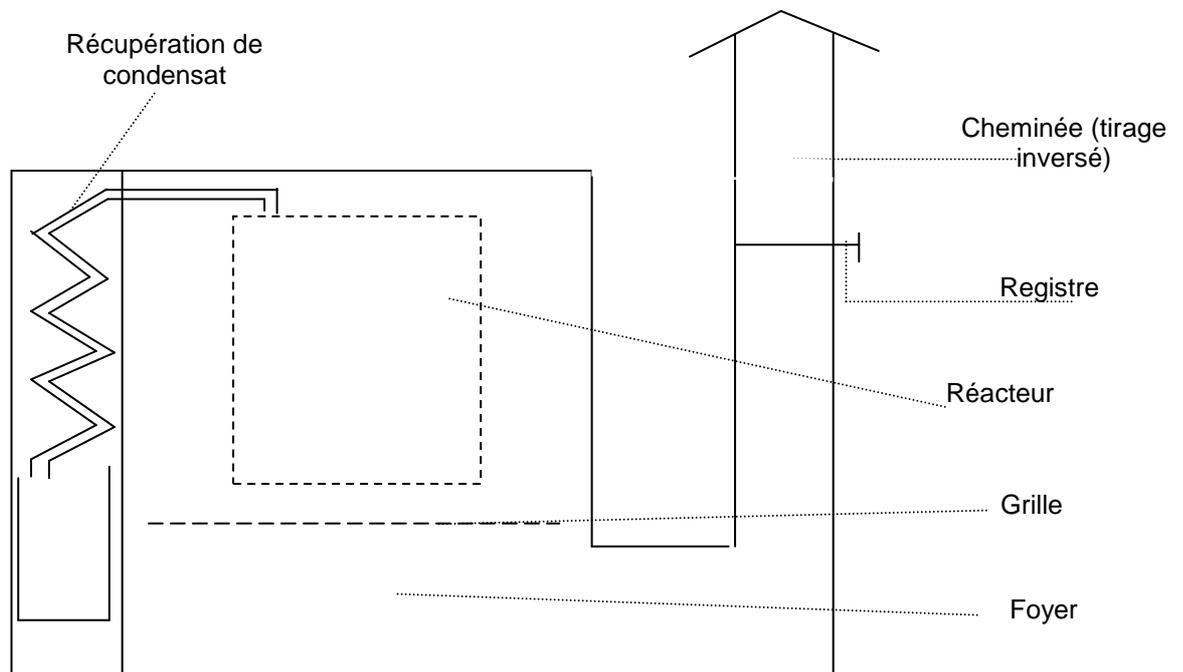


**Figure 7 : Schéma simplifié du distillateur**

Après constat de la réussite technique de l'équipement d'essai, nous avons assuré les fonctions de service, pour mener à bien le processus de distillation. Ces fonctions de service sont :

- l'étanchéité du distillateur ;
- l'alimentation en combustible à prix abordable mais à efficacité calorifique élevée ;
- le bon calorifugeage de l'ensemble ;
- l'émanation de divers produits gazeux ;
- la récupération du condensat.

Les essais effectués nous ont conduit à configurer le distillateur proprement dit comme suit :



**Figure 8 : Configuration finale du distillateur**

Ce distillateur artisanal nous a permis de récupérer les produits gazeux et les matières condensables issus des matières volatiles du charbon, par condensation (refroidissement des gaz). Le condensât récupéré peut être utilisé par la suite comme amorce des briquettes. C'est le cas du goudron, par exemple.

La dimension a été calculée en fonction de la production à atteindre durant les essais. Nous avons aussi pris en compte la quantité de briquettes nécessaire à la réalisation du test d'acceptabilité du produit fini par les usagers.

Les caractéristiques finales du distillateur de laboratoire sont données par le tableau suivant :

**Tableau 18 : Caractéristiques techniques du distillateur artisanal**

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

Source : Auteur



**Photo 2 : Distillateur artisanal**

### **1.2.2. Matériel de compactage artisanal**

À la sortie du distillateur, le coke ou semi-coke se présente sous forme de grains de granulométries diverses. L'intérêt du compactage est de donner au produit fini une forme régulière, un usage commode et une meilleure présentation.

La presse de compactage a été conçue pour mener à bien l'expérience au niveau laboratoire. Toutefois, la compacité d'un produit pourrait être acquise de différentes manières :

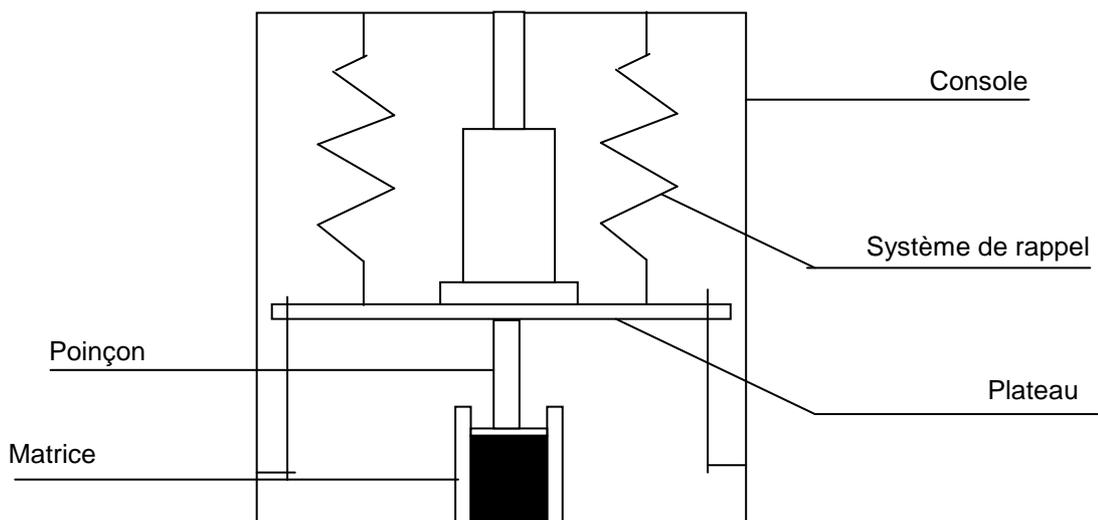
- utilisation d'un liant à haut pouvoir adhésif ;
- optimisation de la teneur en liant ;
- utilisation d'un effort de compactage optimal.

Nous avons joué sur ces trois critères, car la compacité finale de la briquette sera une question d'équilibre entre la nature et la teneur en liant et le taux de compactage.

Les fonctions de service à remplir par l'unité de compactage sont :

- la robustesse du bâti, qui nécessite une construction mécano-soudée ;
- une source de pression fiable et simple : hydraulique ;
- la commodité de moulage et de démoulage ;
- la manipulation aisée, qui nécessite un système de rappel automatique du plateau après compression (arrangement facile dans le foyer) ;
- la forme du moule, qui doit être simple et pratique ;
- le moule est de dimension standard, afin que la taille du produit fini soit voisine de celle du charbon domestique classique.

Ce qui nous a conduit à la conception suivante :



**Figure 9 : Schéma de la presse de compactage**

Les caractéristiques techniques de la presse de compactage se résument comme suit :

**Tableau 19 : 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:	48kg
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	120mm
Dimension	Longueur : 450 mm Largeur : 210 mm Hauteur : 750 mm
Capacité :	3 kg/jour

**Photo 3 : Presse de compactage**



### 1.3. Cokéfaction du charbon [2] ; [3] ; [13] ; [15] ; [16] ; [17].

#### 1.3.1. La distillation-cokéfaction du charbon

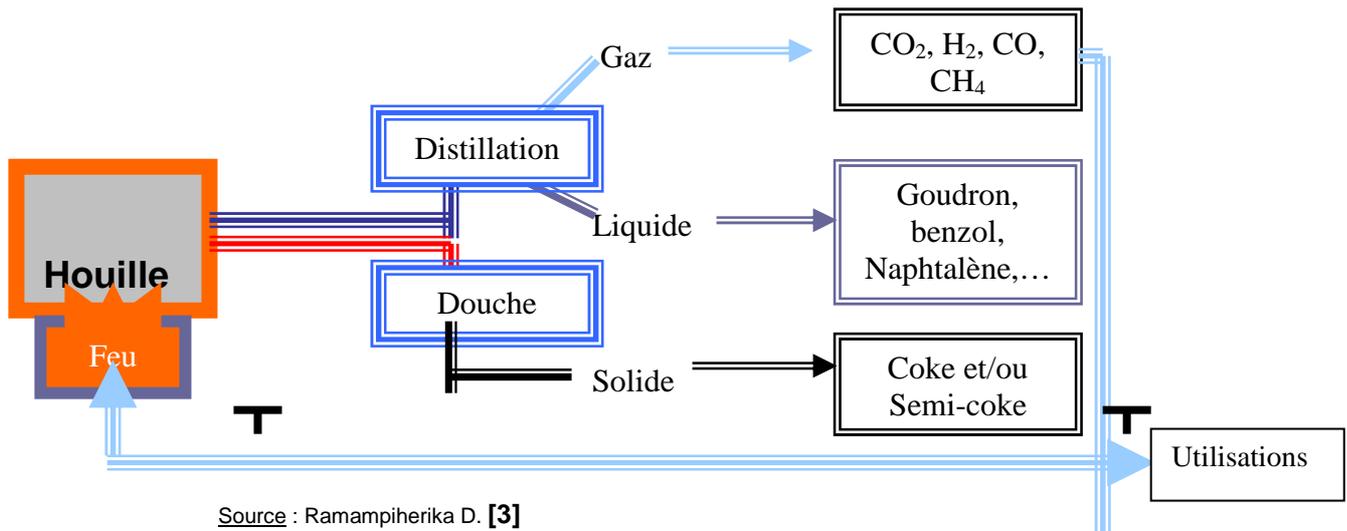
La distillation est l'opération consistant à débarrasser un solide de ses composants gazeux : le coke s'obtient par distillation de la houille grasse. C'est un procédé mis en œuvre par l'industrie gazière dans les anciennes usines qui avaient pour principal objectif la production de gaz, du benzol. Le coke n'est qu'un produit complémentaire.

La cokéfaction est la transformation de la houille en coke par dégagement des matières volatiles, elles-mêmes combustibles. Contrairement à la distillation, les installations ont été conçues pour l'obtention de coke métallurgique répondant à des caractéristiques précises. Le gaz et les autres produits liquides ne sont que des produits secondaires.

### 1.3.2. La technologie de cokéfaction

Pour obtenir du coke, on chauffe le charbon à l'abri de l'air aux environs de 1 000°C. La houille se décompose et fond à cette température. Il se dégage des matières volatiles non condensables (constituant le gaz de houille) et condensables (le goudron, le benzol, l'aniline). Il reste un résidu solide qui est le semi-coke et/ou le coke. Ils sont constitués de carbone et de cendre.

La décomposition de la houille à l'abri de l'air est résumée par le schéma suivant :



**Figure 10 : schéma simplifié de la distillation de la houille**

Théoriquement, une tonne de charbon donne environ 750 à 800 kg de coke ou semi-coke, 115 à 403 kg de gaz et d'autres produits.

La quantité et la qualité des produits obtenus varient avec la teneur en matières volatiles et la température qui règne dans les fours.

Vers 500 à 800°C, on obtient :

- un dégagement moindre de gaz pauvre (115 kg/t, mais à meilleur pouvoir calorifique inférieur et riche en hydrocarbures lourds) ;
- une production de 800 kg de semi-coke par tonne de charbon ;

Vers 800 à 1 100°C, on aura :

- un dégagement important de gaz pauvre (345 kg/t) ;
- une production de 25 à 35 kg de goudron par tonne de charbon ;
- une production de 7 à 12 kg/t de benzol ;
- une production de 750 kg de coke par tonne de charbon.

### 1.3.3. Le coke

Lorsque tout le gaz que contenait le charbon s'est dégagé, il reste dans la cornue la partie non

volatile : le coke, composé presque uniquement de carbone et de cendres. On le sort encore rouge de la cornue et il s'enflamme au contact de l'air. On l'éteint immédiatement en l'aspergeant d'eau.

Le coke issu de la cokéfaction ou de la distillation de la houille à haute température, constitué de carbone assez pur avec très peu de matières volatiles, brûle sans dégager de suie, de fumée ou d'odeur. On peut alors le cribler pour classer les morceaux suivant leur grosseur.

Sa densité est plus faible que celle du charbon et il brûle sans faire de flamme ni de fumée, puisqu'il ne contient plus de matières volatiles.

À côté du coke naturel, le coke artificiel peut être classé sous plusieurs catégories, selon sa finalité et son procédé de production, à savoir :

- **coke de fonderie** : qui fournit des quantités importantes de calories nécessaires à la fusion du minerai. Il est surtout utilisé dans les hauts-fourneaux où, brûlé avec du minerai de fer, il donne de la fonte transformable en acier ;

- **coke chimique** : qui est utilisé pour la fabrication du carbure de calcium, du ferro-silicium, du ferro-chrome, du ferro-manganèse, et parfois du phosphore. On ne lui demande généralement pas une grande résistance mécanique, mais on s'attache à sa réactivité et, pour les fours électriques, à sa résistivité ;

- **coke moulé** : qui n'est autre qu'un aggloméré préparé en boulettes et carbonisé.

Le coke de qualité doit essentiellement avoir :

- une granulométrie régulière pour assurer une bonne perméabilité dans la cuve. Une granulométrie homogène comprise entre 40 et 80 mm est un ordre de grandeur raisonnable ;

- une solidité telle que la granulométrie après criblage ne soit pas sensiblement modifiée au cours de manutentions ultérieures ou du passage dans les fourneaux ;

- une humidité régulière (3% au maximum) ;

- un taux de cendre pas trop élevé : de 8 à 10% ;

- un taux de soufre faible, autant que possible inférieur à 10% ;

- une propriété non friable, il doit être assez léger et poreux pour faciliter la circulation de gaz dans les réchauds ou dans les fourneaux ;

- un pouvoir calorifique inférieur élevé, de l'ordre de 6 500 à 7 500 kcal/kg (sa combustion est presque complète).

Le gaz pauvre, le coke et le semi-coke peuvent être utilisés pour la cuisson. Ce sont des sources d'énergie domestique et industrielle compétitives par rapport à d'autres.

#### **1.3.4. Qualité des charbons cokéfiabiles**

Les propriétés chimiques du coke dépendent essentiellement des caractéristiques des charbons utilisés :

- l'humidité dépend de la façon dont est fait l'arrosage à l'eau pendant le refroidissement ;

- la granulométrie et surtout la solidité sont fonctions de :
  - la qualité du charbon ;
  - les facteurs de fabrication et éventuellement du procédé de cokéfaction.
- la faculté de cokéfaction des charbons comme :
  - l'indice de matières volatiles ;
  - pouvoir agglutinant déterminé par l'indice de gonflement au creuset ;
  - pouvoir cokéfiant proprement dit, donné par un essai dilatométrique.

Tous les charbons de terre n'ont donc pas la même faculté de cokéfaction. Le charbon de terre de la Sakoa est flambant, riche en cendres et réputé non cokéfiable. Il produit du coke pulvérulent.

Les flambants secs ne gonflent pratiquement pas et donnent un coke pulvérulent, donc inutilisable. Ainsi, d'autres technologies complémentaires ou des procédés de cokéfaction spéciaux sont à élaborer. Il s'agit

- d'une technologie de pré-cokéfaction (avant la cokéfaction des flambants) : le préchauffage ;
- d'une technologie de post-cokéfaction (après cokéfaction) : l'agglomération.

Le préchauffage consiste à sécher et préchauffer le charbon à une température de l'ordre de 250°C, notablement inférieure à la température de fusion, avant de l'enfourner. Ce procédé améliore les caractéristiques mécaniques du coke et permet d'utiliser plus largement des charbons peu cokéfiant.

L'agglomération consiste à produire des agglomérés ou boulettes ou briquettes ardentes à partir du coke pulvérulent. On utilisera une presse pour cette opération. Différentes sortes de liants peuvent être utilisées, tels que argile, le goudron, la fécule de manioc, etc.

#### **1.4. Essais de cokéfaction du charbon**

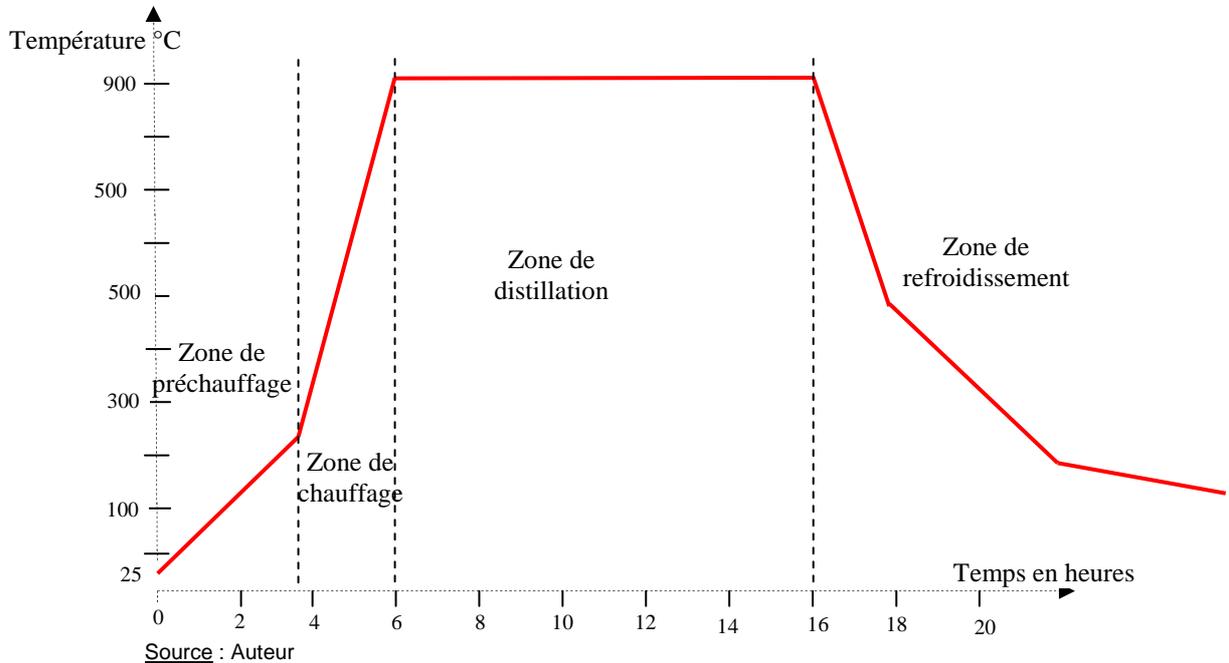
Après la réalisation des matériels et équipements de transformation de la houille en combustible domestique, nous sommes passé aux essais de cokéfaction.

Ainsi, nous avons effectué des essais afin de déterminer les paramètres de cokéfaction du charbon. Les essais sont, évidemment, menés avec le distillateur artisanal de laboratoire. 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.

### 1.4.1. Conduite des essais

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



**Figure 11 : Évolution de la température en fonction de la durée de cokéfaction**

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

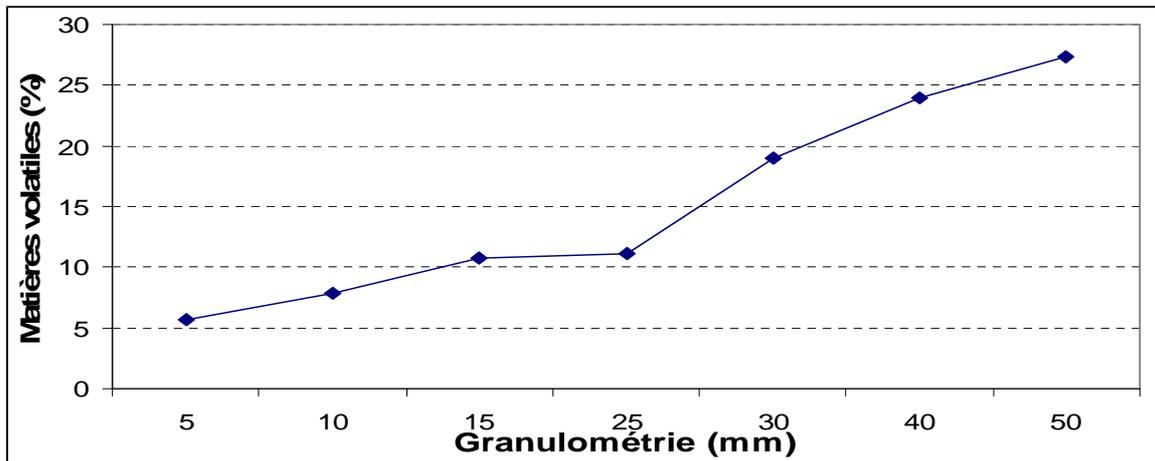
#### Réglage de la variation de la température :

- 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.

## 1.4.2. Résultats et discussions

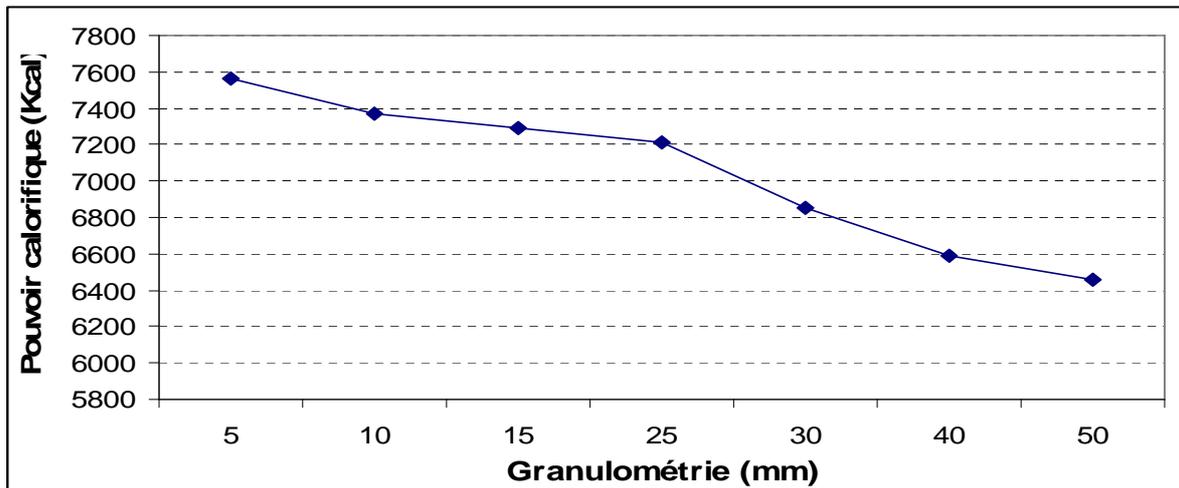
### 1.4.2.1. Granulométrie du charbon

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. Les résultats de ces essais sont donnés par les graphes suivants :



**Figure 12 : Évolution de la teneur en matières volatiles en fonction de la granulométrie**

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 suivant :



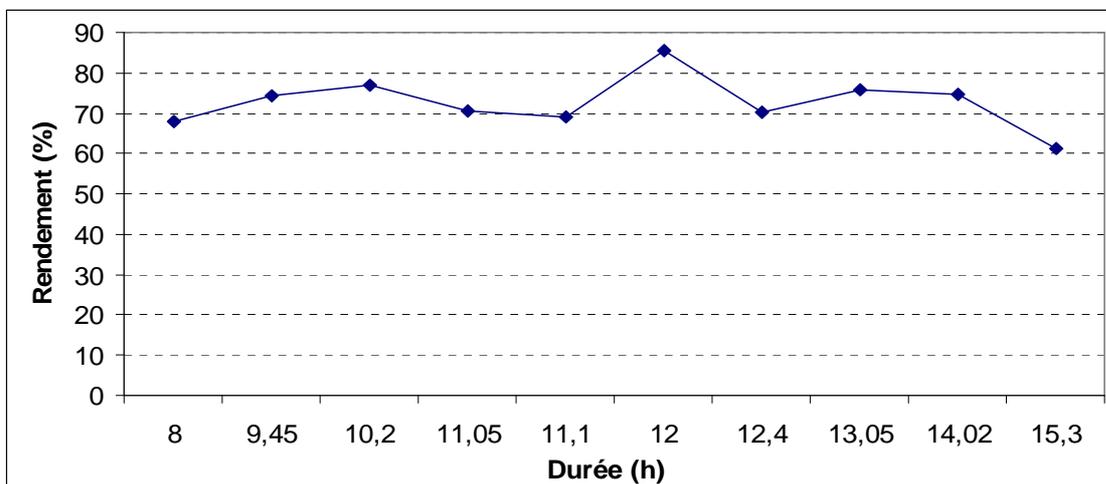
**Figure 13 : Évolution du pouvoir calorifique en fonction de la granulométrie**

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.

#### 1.4.2.2. La durée de la cokéfaction

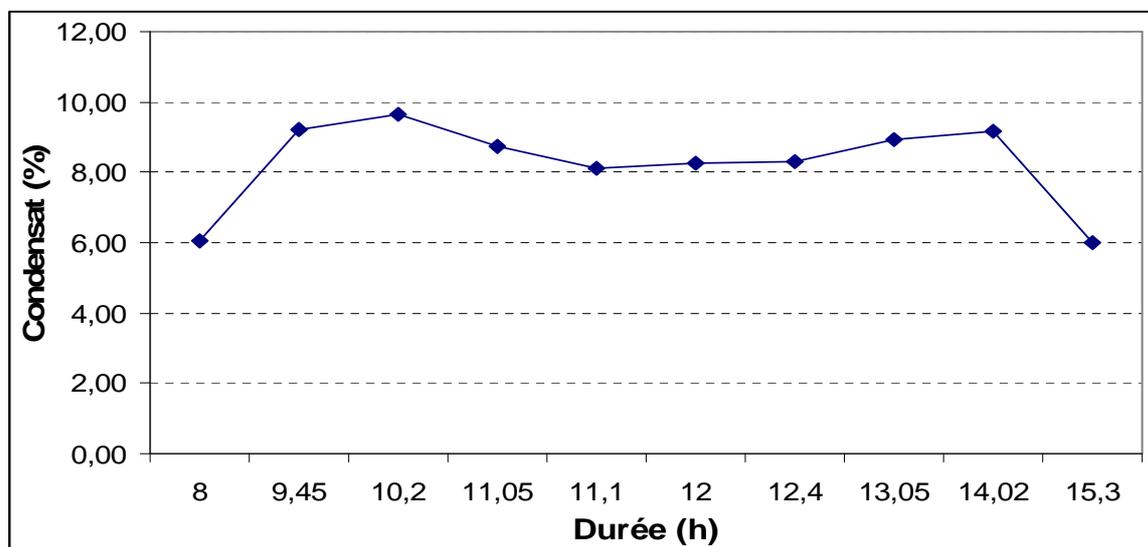
Nous avons effectué 10 essais de cokéfaction. La durée de la distillation a été réglée entre 8 et 15 heures. Nous avons calculé le rendement en semi-coke en fonction de la durée des essais.

Le résultat obtenu est montré par les graphiques suivants :



**Figure 14 : 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 à 60% après 15 heures de distillation.



**Figure 15 : Évolution de la quantité de condensat obtenue en fonction de la durée de cokéfaction**

La figure 15 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.

#### 1.4.2.3. Caractéristiques du semi-coke obtenu

Le tableau suivant nous montre les caractéristiques du semi-coke obtenu par la cokéfaction du charbon de la Sakoa :

**Tableau 20 : 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

#### 1.4.2.4. 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 80% de semi-coke.

### 1.5 Adjuvant

L'adjuvant se définit comme un produit que l'on ajoute au coke pour améliorer ses caractéristiques techniques. Plusieurs adjuvants peuvent être utilisés.

Dans le cadre de notre étude, la briquette de charbon de terre, constituée essentiellement de 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 dispositif ou d'un élément provoquant la réaction de combustion. Il est clair que l'air constitue un facteur décisif là-dessus.

En outre, le semi-coke doit être mis sous forme de briquettes, afin d'assurer un usage commode du produit fini. Aussi, il faut utiliser un liant pour unir les morceaux de semi-coke entre eux.

Ainsi, le choix des adjuvants représente un aspect capital de la problématique de la transformation du charbon de terre en combustible domestique. La pratique met en exergue deux types d'adjuvant influant sur la qualité technique finale du produit, notamment le liant et l'amorce.

#### 1.5.1. Liant

C'est la matière qu'on ajoute aux agglomérats et adjuvant qui se solidifie à l'air, en cédant à l'atmosphère, une partie de son eau. Il assure une liaison permanente entre les composants du mélange.

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, sauf si l'on travaille dans le domaine de la très haute pression (environ à 5 000 bars). Les équipements doivent être hautement performants, donc très onéreux.

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 la farine de manioc, la féculé de manioc, l'argile, le tamarin ou le jus de cactus. Les résultats de l'étude sont donnés dans le tableau suivant :

**Tableau 21 : Tableau Comparatif des liants**

<b>PARAMÈTRES</b>	<b>Farine de manioc</b>	<b>Féculé de manioc</b>	<b>Argile</b>	<b>Tamarin</b>	<b>Jus de cactus</b>
Mode d'obtention	Moyen	Moyen	Facile	Moyen	Moyen
Disponibilité	National	Régional	National	Régional	Local
Facilité d'utilisation à chaud et à froid	Moyenne	Facile	Moyenne	Difficile	Moyenne
Coût du produit fini (Ar/kg)	60	258	40	10	16
Concurrence alimentaire	Oui	Oui	Non	Oui	Non
Echelle d'efficience	80	100	70	20	30
Point fort	Prix relativement abordable	Pouvoir adhésif élevé	Largement disponible	Prix très abordable	Obtention facile
Faiblesse	Pouvoir adhésif médiocre	Coût élevé	Résistance à la compression faible	Pouvoir adhésif faible	Rapport qualité/prix défavorable
<b>Résistance aux sollicitations (MPa)</b>	<b>3,8</b>	<b>6,0</b>	<b>2,9</b>	<b>0,7</b>	<b>1,4</b>

Source : Essai au labo du CNRIT, Avril 2007

Après une première série de tests sur les critères sus-énumérés, 3 types de liants en sont ressortis, satisfaisant aux critères d'usage des briquettes : l'argile, la farine et la féculé de manioc. L'objectif principal de l'utilisation du liant est de conférer aux briquettes une capacité maximale de pouvoir s'opposer aux différentes sollicitations que le produit rencontre durant son cycle de vie.

Au cours des essais, l'argile (smectite), la féculé et la farine de manioc sont les liants ayant donné le plus de satisfaction. En effet :

- L'argile représente le type de liant le plus facile à obtenir, mais la résistance à la compression des briquettes d'argile est faible ;
- La farine de manioc et l'argile sont les deux liants qu'on trouve presque partout, dans le pays ;
- La féculé 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 féculé 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.

La fécule se trouve être la plus intéressante, mais son coût reste très élevé. Aussi, nous avons pensé à utiliser la farine de manioc qui est moins chère mais elle confère aux briquettes une résistance mécanique trop juste.

L'argile, moins chère, présente une autre alternative. Toutefois, l'utilisation de l'argile comme liant rend la briquette encore plus difficilement inflammable.

Ainsi, pour la suite de notre étude, trois de types de liant seront pris en compte : la fécule de manioc, l'argile et la farine de manioc.

### **1.5.2. Amorces**

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 artifice ou 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 ;
- les morceaux de charbon de bois.

Les tests 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 22 : 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, du 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 du produit obtenu à sécher. En outre, nous avons arrêté les travaux sur la paraffine. Elle n'est pas encore produite localement et reste chère à importer.

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

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

## 1.6. 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 :

### 1.6.1. Drop test [18]

#### 1.6.1.1. Définition

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.

Ce test constitue une simulation des sollicitations subies par les briquettes lors du transport et la manutention.

#### 1.6.1.2. Déroulement du test

Nous avons effectué le test dans le laboratoire du département Énergétique du CNRIT. Cela afin d'éviter tout autre phénomène pouvant influencer sur les résultats (vitesse du vent, nature de la surface recevant les combustibles...).

#### 1.6.1.3. Conditions d'expérimentation

Les conditions d'expérimentation sont les suivantes :

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

#### 1.6.1.4. Résultat du drop-test

##### a) Définition de l'indice de *drop-test*

L'indice de *drop-test* varie de 0 à 100 : Sa valeur est proportionnelle au pourcentage des combustibles restés intacts après les chutes :

- Indice 0 : aucun combustible (0%) n'est resté intact après les chutes ;
- Indice 50 : la moitié, 50% donc, des combustibles ont cassé après les chutes ;
- Indice 100 : tous les combustibles sont restés intacts après les chutes.

##### b) Résultats du test

Les résultats du test sont les suivants :

- les briquettes ayant une teneur en liant < 3% accusent un coefficient de friabilité élevé : *indice 11 ; 89% des briquettes ont été endommagées (16 briquettes sur 18 ont cassé) ;*
- les briquettes ayant une teneur en liant de 6% montrent plus de résistance : *indice 79 ; 21% des briquettes ont cassé (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 cassé (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.

### **1.6.2. 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.

#### **1.6.2.1. Appareillage**

Les essais de résistance à la compression des briquettes de charbon de terre ont été réalisés avec la presse hydraulique du bloc technique de l'ESPA, à Ankatso.

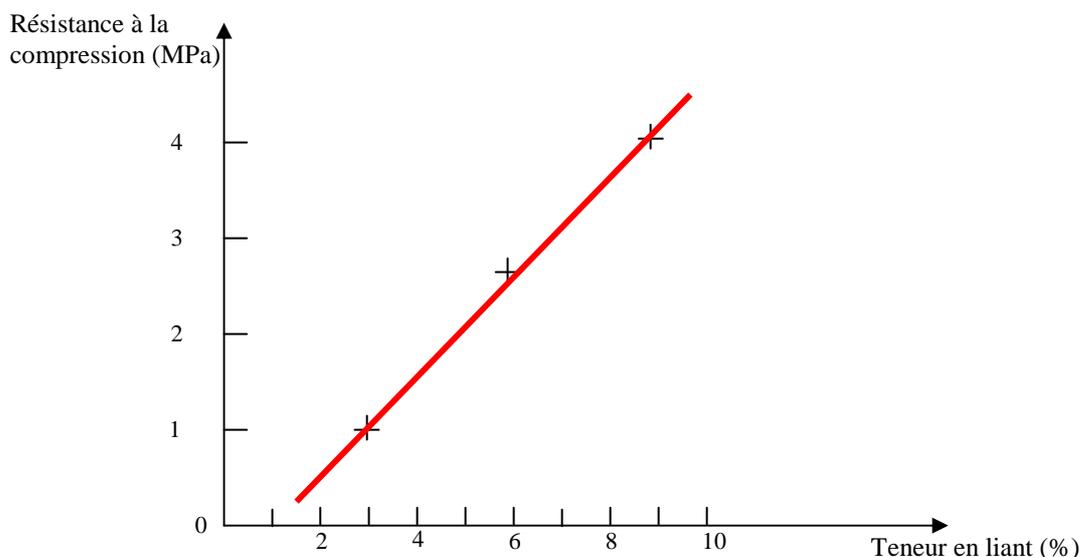
Les essais ont été effectués sur des briquettes séchées à l'étuve pendant 45 heures, et stockées dans une armoire métallique durant un mois.



**Photo 4 : La presse utilisée pour la mesure de la résistance à la compression**

#### **1.6.2.2. Résultats**

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 16 : Résistance à la compression des briquettes**

- 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.

## 1.7. Essais de compactage

### 1.7.1. Conduite des expériences

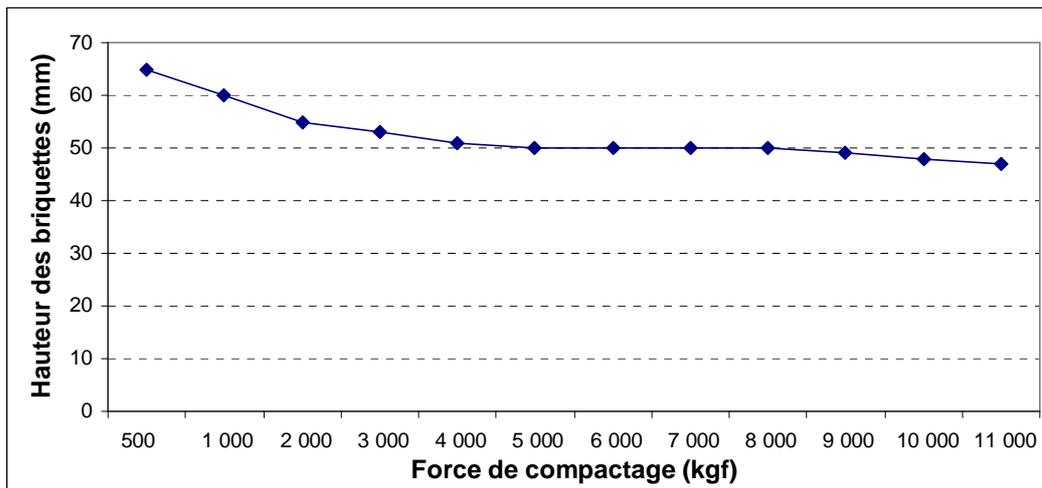
Nous avons effectué des essais de compactage afin de déterminer la force de compactage optimale des briquettes. Les paramètres pris en compte sont :

- la hauteur des briquettes ;
- leur résistance à la compression.

### 1.7.2. Résultats et discussions

#### 1.7.2.1. Hauteur 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 à 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 suivant :



**Figure 17 : 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 cette hauteur (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.

#### 1.7.2.2. Analyse des résultats

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 telle que  $500 < F < 5.000$  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  $F > 5.000$  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.

La résistance à la compression reflète l'aptitude d'un produit à s'opposer aux diverses sollicitations lors de son transport et sa manutention. C'est aussi un test d'efficacité de plusieurs critères à la fois, tels que :

- la bonne tenue du séchage ;
- le choix adéquat et la teneur optimale du liant ;
- la pression de compactage optimale.

### 1.7.2.3. Conclusion

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.

## 1.8. 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. 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.

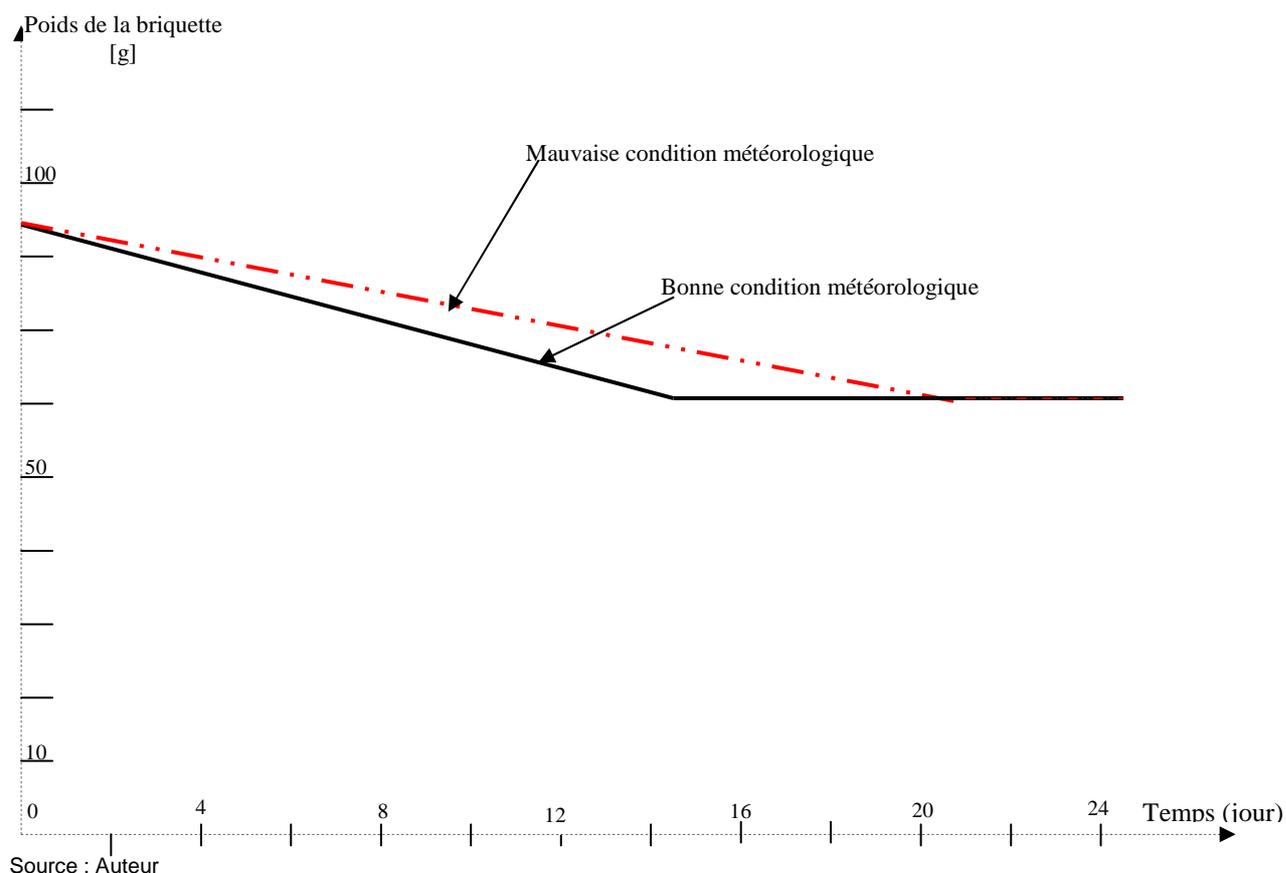
### 1.8.1. Définitions des conditions de séchage et de stockage

On arrête le séchage lorsque la masse des briquettes ne varie plus dans le temps. C'est-à-dire quand la masse des briquettes reste constante après un laps de temps.

Les briquettes séchées, ont été stockées dans une armoire métallique fermée, afin d'empêcher leur réhydratation par l'humidité de l'air.

### 1.8.2. 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 ci-après :



**Figure 18 : 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.

### **1.8.3. Le séchage en atmosphère contrôlée**

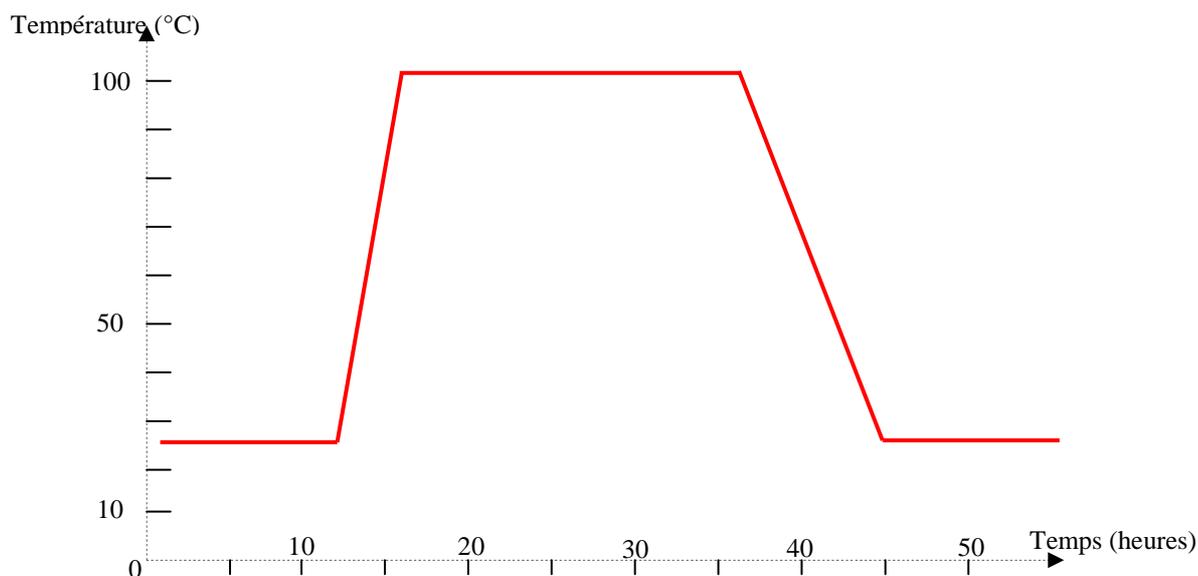
Le séchage à l'air libre est trop long (15 à 21 jours) et nécessite une aire de séchage large, donc un investissement assez important.

Pour gagner du temps, le séchage peut être réalisée 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, 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 19 : Courbe de séchage en atmosphère contrôlée**

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

## 2. CARACTÉRISTIQUES DES BRIQUETTES DE CHARBON

L'analyse des données techniques obtenues ci-dessus nous a permis de sélectionner trois produits  $P_1$ ,  $P_2$  et  $P_3$ , pour être l'objet du *test d'acceptabilité* auprès des utilisateurs. Les compositions de ces produits sont les suivantes :

- Le produit  $P_1$  est une briquette de charbon de terre dont le liant est à base de fécula de manioc et l'amorce est du goudron ;
- Le produit  $P_2$  est une briquette de charbon de terre à liant à base de fécula de manioc et amorcée avec de la fine de charbon de bois ;
- Le produit  $P_3$  est une briquette de charbon de terre liée avec de la fécula de manioc et amorcée avec de la cire.

Diverses raisons ont motivé ce choix :

- Le Produit  $P_1$ , « fécula + 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 soit insuffisante pour l'approvisionnement en goudron du processus de fabrication.
- Le produit  $P_2$ , « fécula + 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  $P_2$  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 P<sub>3</sub> « fécula + 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 :

## 2.1. Composition

**Tableau 23 : Composition des briquettes de charbon de terre**

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

Source : Auteur

## 2.2. Morphologie

**Tableau 24 : Caractéristiques des briquettes**

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

Source : Auteur

## 2.3. Caractéristiques thermiques

**Tableau 25 : Caractéristiques thermiques des briquettes**

Paramètres	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>
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 : Auteur & Labo OMNIS

## 2.4. Caractéristiques chimiques

**Tableau 26 : Caractéristiques chimiques des briquettes**

Paramètres	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>
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
<b>TOTAL (%)</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

Source : Laboratoire de l'OMNIS

## 2.5. Caractéristiques mécaniques

**Tableau 27 : Caractéristiques mécaniques des briquettes**

Paramètres	Valeurs
Force de compactage	5 000 kgf
Pression de compactage	39,8 MPa
Résistance à la compression	1,25 MPa

Source : Auteur



Source : Auteur

**Photo 5 : Briquettes de charbon de terre**

## 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 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 Briquettes de charbon ;
- 34 kg 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.

**QUATRIÈME PARTIE :**  
**ÉTUDE 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.

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 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.



**Photo 6 : Essai de démarrage du feu avec les briquettes de charbon de terre**

## 1. DÉROULEMENT DU TEST D'ACCEPTABILITÉ

### 1.1. 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.

La répartition des produits dans le district de Betioky-Atsimo est résumée dans le tableau suivant :

**Tableau 28 : Répartition des échantillons pour l'enquête à Betioky-Atsimo**

Échantillon	P <sub>1</sub> Semi-coke + goudron	P <sub>2</sub> Semi-coke + fine de charbon de bois	P <sub>3</sub> Semi-coke + cire
Établissement de restauration	Restaurant Mahafaly (Fkt : Betioky Centre)	Restaurant Tsaramandroso (Fkt : Ankilimiangatse)	Restaurant Mahasoa
	Gargotier : M. José (Fkt : Betioky Centre)	Gargotier : M. Armand (Fkt : Betioky Centre)	Gargotier : Mme Fara
Ménage aisé	M. Abdon Jean Marie (Le Chef District)	Commandant ZP	M. Etolo Florent (Chef CISCO)
	M. Alain ( Prof. Lycée)	M. Daniel (Vétérinaire)	- M. Proviseur de lycée
Ménage Moyen	M. Fihanta (Vaccinateur)	M. Sylvain (Pasteur FJKM)	M. Razigzag (chef CIREEF)
	Mme. Hanta (Chef de zone ONG Taratra)	M. Tsimisotry (Prof. CEG)	Pasteur FLM
	M. Nasolo (chauffeur)	M. Victor (Gendarme retraité)	M. Soalaza (Agriculteur)
Ménage laborieux	M. Enazy (chef Fokontany)	M. George (Employé administratif)	Pasteur FAKRI
<b>TOTAL</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>8</b>

Source : Enquête effectuée en avril 2007

### 1.2. 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 un type de produit pour chaque catégorie d'établissement de restauration.
- On a distribué un type de produit pour trois (3) ménages de chaque classe socio-professionnelle.

Les tableaux suivant résumant la répartition des produits dans le district de Toliara, avec comme utilisateurs, d'abord les établissements de restauration et ensuite les ménages :

**Tableau 29 : Répartition des échantillons pour les établissements de restauration à Toliara**

Répartition des utilisateurs	Catégorie	P <sub>1</sub> Semi-coke + goudron	P <sub>2</sub> Semi-coke + fine de charbon de bois	P <sub>3</sub> Semi-coke + Cire
Établissement de restauration Public	Grand hôtel	Capricorne Tanambao	Sisal Amborogony	Sani Tanambao Morafeno
	Restaurant	Sendra Sans fil	Saga Tanambao Morafeno	Rija Tanambao I
	Gargote	Vatsy Anketa	Soa Régime Besakoa	Mpanao mokary Tanambao Morafeno

Source : Enquête effectuée en avril 2007

**Tableau 30 : Répartition des échantillons par ménage à Toliara**

Répartition des consommateurs	P <sub>1</sub> Semi-coke + goudron	P <sub>2</sub> Semi-coke + fine de charbon de bois	P <sub>3</sub> Semi-coke + cire
Ménages aisés	- Mme. Chantal DIREEF	- M. Ramampierika Professeur	- Mme. Lalanirina Étudiante Cedratom
	- M. Philémon DIREEF	- M. Damason Emile Coordinateur École Normale	- M. Jean Claude Cantonement Forestier
	- M. Chef SAF CIREEF	- M. Narcisse Responsable SAGE	- M. Tsilavitra Edson Directeur École Normale
Ménages moyens	- M. Sambatra DIREEF	- M. Tovoson Clément DIREEF	- M. Denis, Enseignant au Lycée Technique
	- M. Sylvestre DIREEF	- Pasteur Dady Eugène Besakoa	- M. Bera Économiste École Normale
	- M. Dieu Donné DIREEF	- Mme. Loria épouse du Médecin Inspecteur	- M. Prudence
Ménages laborieux	- M. Jean de dieu Gardien	- Mlle Mariam	- Mme. Fanja Besakoa
	- M. Michel Manœuvre	- Mme Brigitte DIREEF	- Mme Hanta Étudiante
	- M. Maxime Manœuvre	- M. Actisse DIREEF	M. Faustin Employé d'hôtel

Source : enquête effectuée avril 2007

## 2. RÉSULTATS DES TESTS

### 2.1. Betioky-Atsimo

#### 2.1.1. *Appréciation des produits par les établissements de restauration*

Les appréciations de chaque produit par les établissements de restauration qui les ont testés sont données dans les tableaux suivants :

**Tableau 31 : Appréciation du produit P<sub>1</sub> par les établissements de restauration à Betioky-Atsimo**

Utilisateurs	Appréciation (%)		Observations
	Etablissement	Moyenne	
Restaurant Mahafaly (Mme Paula)	60	47,5	<ul style="list-style-type: none"> <li>La cuisson est trop lente</li> <li>Elle a constaté un fort dégagement de fumée et d'odeur</li> <li>Le produit est apte à cuire</li> </ul>
Gargote (M. José)	35		M. José n'a pas supporté la fumée et l'odeur émises par la combustion des briquettes

Source : enquête effectuée avril 2007

**Tableau 32 : Appréciation du produit P<sub>2</sub> par les établissements de restauration à Betioky-Atsimo**

Utilisateurs	Appréciation (%)		Observations
	Etablissement	Moyenne	
Restaurant Tsaramandroso	40	50	<ul style="list-style-type: none"> <li>La cuisson d'un plat quotidien s'est effectuée à l'extérieur de la cuisine</li> <li>Le produit est apte à cuire mais le démarrage du feu est trop lent</li> <li>La cuisson est lente, donc nécessite beaucoup de temps</li> </ul>
Gargote (M. Armand)	60		Le produit est bon pour cuire la soupe (à cause de la lenteur du démarrage du feu et de la cuisson). M. Armand cuisine durant la nuit, chez lui.

Source : enquête effectuée avril 2007

**Tableau 33 : Appréciation du produit P<sub>3</sub> par les établissements de restauration à Betioky-Atsimo**

Utilisateurs	Appréciation (%)		Observations
	Etablissement	Moyenne	
Restaurant Mahasoa	55	48,5	<ul style="list-style-type: none"> <li>La cuisson du plat quotidien s'effectue à l'extérieur</li> <li>Le démarrage du feu est lent</li> <li>Le produit est apte à cuire</li> </ul> Un dégagement de fumée et d'odeur a été constaté.
Gargote (Mme Fara)	42		Le produit est apte à cuire pour les gargotiers mais les émissions de fumée et l'odeur sont insupportables

Source : enquête effectuée avril 2007

Le produit P<sub>1</sub> a été apprécié par le restaurant, avec un taux d'appréciation de 60%. À l'inverse, la gargote ne l'a pas apprécié : taux d'appréciation de 35%. Avec un taux d'appréciation moyen de 47,5%, le produit P<sub>1</sub> est donc, peu apprécié par les établissements de restauration.

Le produit P<sub>2</sub> n'a pas été apprécié par le restaurant avec un taux d'appréciation de 40%, alors que le gargotier s'en est montré satisfait : taux d'appréciation de 60%. Avec un taux d'appréciation moyen de 50%, le produit P<sub>2</sub> est donc plus ou moins apprécié par les établissements de restauration.

Quant au produit P<sub>3</sub>, il est moyennement apprécié par le restaurant, avec un taux de satisfaction de 55%, alors qu'il n'a pas été apprécié par la gargote : taux d'appréciation de 42%. Avec un taux d'appréciation moyen de 48,5%, il est donc considéré comme légèrement plus apprécié par les établissements de restauration de Betioky-Atsimo.

### 2.1.2. Satisfaction des établissements de restauration

Le tableau suivant nous montre la satisfaction des établissements de restauration après avoir utilisé les produits P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> et P<sub>3</sub>, dans le district de Betioky-Atsimo :

**Tableau 13 : Pourcentage de satisfaction des établissements de restauration pour les 3 produits**

Utilisateurs	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>
Restaurant	100%	0%	100%
Gargote	0%	100%	0%
<b>Ensemble</b>	<b>50%</b>	<b>50%</b>	<b>50%</b>

Source : enquête effectuée avril 2007

Le tableau ci-dessus montre que :

- Les restaurants qui ont fait le test, ont été satisfaits des produits P<sub>1</sub> et P<sub>3</sub> ;
- Par contre, les gargotiers sont beaucoup plus satisfaits du produit P<sub>2</sub> mais n'ont pas apprécié les produits P<sub>1</sub> et P<sub>3</sub> ;
- Les établissements de restauration sont plus ou moins satisfaits des produits P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> et P<sub>3</sub>, pour un taux de satisfaction moyen de 50%.

Pour les restaurateurs, les motifs avancés sont résumés dans le tableau suivant :

**Tableau 34 : Raisons du choix des restaurateurs**

Produits	Raisons	
	Positives	Négatives
P <sub>1</sub> (Charbon de terre + goudron)	Le PCI est supérieur à celui du charbon de bois, donc le produit est apte à la cuisson ;  Les avantages socio-économiques et écologiques du produit par la substitution du charbon de bois et du bois de chauffe.	- Dégagement de fumée et d'odeur, dû à la présence du goudron - Démarrage lent du feu, donc nécessitant plus de temps
P <sub>2</sub> (Charbon de terre + fine de charbon de bois)		Démarrage lent du feu, donc nécessitant plus de temps
P <sub>3</sub> (Charbon de terre + Cire)		- Dégagement de fumée et d'odeur, dû à la présence de la cire - Démarrage lent du feu, donc nécessitant plus de temps

Source : Enquête effectuée en avril 2007

Pour les gargotiers, les raisons de leur choix sont résumées dans le tableau suivant :

**Tableau 35 : Raisons de choix des gargotiers**

Produits	Raisons	
	Positives	Négatives
P <sub>1</sub> (Charbon de terre + goudron)	Le produit est apte à cuire	- Dégagement de fumée et d'odeur, dû à la présence du goudron
P <sub>2</sub> (Charbon de terre + fine de charbon de bois)	Le produit est bon pour la cuisson de la soupe durant toute la nuit.	
P <sub>3</sub> (Charbon de terre + Cire)	Le produit répond aux attentes des gargotes	- Dégagement de fumée et d'odeur dû à la présence de la cire

Source : enquête effectuée avril 2007

Nous soulignons en passant que deux établissements étaient particulièrement sensibles au fait que les briquettes contenant de la fine de charbon de bois délivrent graduellement la chaleur. « *C'est le secret des plats succulents* », affirment-ils.

### 2.1.3. Appréciation des produits par les ménages

Après le test de cuisson, les appréciations pour chaque produit par les ménages de Betioky-Atsimo sont données dans les tableaux suivants :

**Tableau 36 : Appréciation par les ménages du produit P<sub>1</sub> à Betioky-Atsimo**

Catégories d'utilisateur		Appréciation (%)	Appréciation moyenne (%)	Observations
Ménages aisés	M <sub>1</sub>	40	42,5	Le produit est apte à cuire un plat ordinaire, mais le dégagement de fumée et d'odeur est insupportable
	M <sub>2</sub>	45		<ul style="list-style-type: none"> <li>La cuisson est bonne</li> <li>Il se dégage un peu de fumée</li> <li>Il faut revoir la forme des briquettes</li> </ul>
Ménages moyens	M <sub>1</sub>	50	51%	<ul style="list-style-type: none"> <li>La cuisson est acceptable</li> <li>La cuisson s'est effectuée à l'extérieur de la maison</li> </ul>
	M <sub>2</sub>	52		Le produit est apte à cuire, mais il faut mettre le foyer à l'extérieur de la maison
Ménages laborieux	M <sub>1</sub>	40	39%	La cuisson est satisfaisante, mais le dégagement de fumée et d'odeur est insupportable
	M <sub>2</sub>	38		<ul style="list-style-type: none"> <li>La cuisson est insatisfaisante, et il y a dégagement de fumée et d'odeur</li> </ul>

Source : enquête effectuée avril 2007

La majorité des ménages qui ont testé le produit P<sub>1</sub> cuisinent à l'extérieur de la maison. Cette habitude de cuire dehors a influé sur les résultats du test des briquettes à Betioky-Atsimo : l'expérimentation a coïncidé avec la période du vent du sud (*Tsioka Atimo*).

Seuls, les ménages moyens ont apprécié le produit pour un taux d'appréciation moyen de 51%. Les ménages aisés et laborieux n'ont pas apprécié le produit avec des taux d'appréciation moyens respectifs de 42,5% et 39%.

Globalement, le produit P<sub>1</sub> n'a pas été apprécié par les ménages de Betioky-Atsimo. Le taux d'appréciation moyen est de 44,16%.

**Tableau 37 : Appréciation du produit P<sub>2</sub> par les ménages de Betioky-Atsimo**

Catégorie d'utilisateurs		Appréciation (%)	Appréciation moyenne (%)	Observations
<b>Ménages aisés</b>	M <sub>1</sub>	55	<b>52,5</b>	Le produit est apte à cuire, mais le dégagement de fumée au démarrage et la cuisson trop lente posent problème.
	M <sub>2</sub>	50		
<b>Ménages moyens</b>	M <sub>1</sub>	65	<b>67,5%</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le produit est apte à cuire ;</li> <li>• La cuisson s'est effectuée à l'extérieur de la maison ;</li> <li>• Le démarrage du feu est lent.</li> </ul>
	M <sub>2</sub>	70		
<b>Ménages laborieux</b>	M <sub>1</sub>	52	<b>53,5%</b>	Le produit est apte à cuire, mais le feu nécessite une surveillance et une ventilation ; Le produit est apte à cuire, mais le démarrage du feu est lent.
	M <sub>2</sub>	55		

**Source** : enquête effectuée avril 2007

Les ménages qui ont testé le produit P<sub>2</sub> à Betioky, l'ont apprécié, quelle que soit leur classe sociale. Cela, bien qu'ils aient constaté quelques problèmes de démarrage du feu, et la lenteur de la cuisson par rapport au charbon de bois.

En général, ils ont tous déclaré que les briquettes sont aptes à cuire les plats quotidiens, en dépit de ces menus problèmes. Le taux d'appréciation moyen de ce produit est de 57,83% pour tous les ménages qui les ont testées dans cette localité. Toutefois, les ménages moyens ont été les plus satisfaits, avec un taux d'appréciation moyen de 67,50%.

**Tableau 38 : Appréciation du produit P<sub>3</sub> par les ménages de Betioky-Atsimo**

Catégorie d'utilisateur		Appréciation (%)	Appréciation moyenne (%)	Observations
Ménages aisés	M <sub>1</sub>	38	35	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le produit dégage de fumée et d'odeur insupportable (elle est enceinte)</li> <li>• La forme du produit est bonne</li> </ul>
	M <sub>2</sub>	32		
Ménages moyens	M <sub>1</sub>	40	41	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le produit est apte à cuire</li> <li>• Le démarrage du feu est trop lent</li> <li>• La fumée et l'odeur sont insupportables</li> </ul>
	M <sub>2</sub>	42		
Ménages laborieux	M <sub>1</sub>	35	32,5	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Il n'a pas pu cuire convenablement le repas à cause du foyer</li> <li>○ Les briquettes se sont cassées</li> </ul>
	M <sub>2</sub>	30		
				<b>36,16</b>

**Source** : enquête effectuée avril 2007

Le produit P<sub>3</sub> n'a pas été apprécié par les ménages qui l'ont testé, quelque soit leur classe socio-professionnelle. Le taux d'appréciation moyen de ce produit par tous les ménages est de 36,16%.

#### 2.1.4. Satisfaction des ménages

Le tableau suivant nous montre le degré de satisfaction des ménages ayant utilisé les produits P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> et P<sub>3</sub> dans le district de Betioky-Atsimo :

**Tableau 39 : Satisfaction des ménages de Betioky-Atsimo**

Répartition des consommateurs	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>
Ménages aisés	0%	100%	0%
Ménages moyens	100%	100%	0%
Ménages laborieux	0%	100%	0%
<b>ENSEMBLE</b>	<b>33,33%</b>	<b>100%</b>	<b>0%</b>

**Source** : Auteur

Le tableau ci-dessus montre que :

- les ménages qui ont testé le produit P<sub>2</sub> sont tous satisfaits, quelle que soit leur classe socio-professionnelle. Toutefois, le degré de satisfaction n'est pas le même.
- le produit P<sub>1</sub> n'a satisfait que les ménages moyens ;

- le produit P<sub>3</sub> n'a pas satisfait les ménages qui l'ont testé, quelle que soit leur classe socio-professionnelle.

Les raisons avancées par les ménages pour justifier leur choix sont :

- Les produits P<sub>1</sub> et P<sub>3</sub> dégagent de la fumée et de l'odeur, à cause de la présence du goudron et de la cire dans les produits ;
- Le feu s'est éteint tout seul au bout d'une demi-heure pour le produit P<sub>1</sub>, peut-être à cause du manque d'air ;
- Le démarrage du feu est lent, donc nécessite un apport d'air (ventilation), si la cuisson s'effectue à l'intérieur de la maison (cas des ménages aisés)
- Il faudra revoir la forme des briquettes (cylindrique) ;
- L'utilisation des produits nécessite plus d'entretien du feu par rapport au charbon de bois, à cause de la teneur en cendre élevée des briquettes.

En conclusion, les ménages qui ont testé le produit P<sub>2</sub> à Betioky-Atsimo ont presque tous été satisfaits des briquettes testées, mis à part les problèmes de combustion, d'entretien du feu et de retard de la cuisson par rapport au charbon de bois. En général, ils ont tous déclaré que les briquettes sont aptes à cuire les plats quotidiens en dépit de ces menus problèmes.

## 2.2. Toliara

### 2.2.1. *Appréciation des produits par les établissements de restauration*

Les appréciations pour chaque produit par les établissements de restauration après le test sont données dans les tableaux suivants :

**Tableau 40 : Appréciation du produit P<sub>1</sub> par les établissements de restauration de Toliara**

Utilisateurs	Appréciation (%)		Observations des utilisateurs
	Établissement	Moyenne	
Hôtel Capricorne	30	36,67	<ul style="list-style-type: none"> <li>• L'émission d'odeur et de fumée perturbe la clientèle;</li> <li>• La cuisson s'est effectuée à l'intérieur de la cuisine.</li> </ul>
Restaurant Sendra	50		<ul style="list-style-type: none"> <li>• La cuisson est acceptable avec un foyer amélioré ;</li> <li>• Le dégagement d'odeur et de fumée perturbe la clientèle.</li> </ul>
Gargote Vatsy	30		Appréciation de la cuisson à feu doux mais l'odeur et la fumée sont insupportables par les enfants et la clientèle

*Source* : enquête effectuée avril 2007

Le tableau ci-dessus montre que :

- Seul, le restaurant a plus ou moins apprécié le produit P<sub>1</sub>, avec un taux d'appréciation de 50%, alors que le grand hôtel et la gargote n'en sont pas satisfaits, avec un taux d'appréciation de 30%.
- Les établissements de restauration de Toliara n'ont pas apprécié le produit P<sub>1</sub>, avec un taux d'appréciation moyen de 36,67%.

**Tableau 41 : Appréciation du produit P<sub>2</sub> par les établissements de restauration à Toliara**

Utilisateurs	Appréciation (%)		Observations des utilisateurs
	Établissement	Moyenne	
Hôtel Sisal	90	<b>85</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le produit est apte à cuire</li> <li>• Il y a une émission d'odeur passagère,</li> <li>• Le feu est puissant mais laisse beaucoup de cendre</li> <li>• Le produit est économique mais nécessite un apport d'air</li> </ul>
Restaurant Saga	95		<ul style="list-style-type: none"> <li>- La cuisson à feu doux est très appréciée par les restaurateurs pour la préparation de la soupe,</li> <li>- Elle conserve bien le goût et la qualité des plats</li> <li>- Le produit est apte à cuire</li> </ul>
Gargote Soa Régime	70		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le produit est très économique,</li> <li>• Il est adapté pour la cuisson de pied de bœuf et la soupe,</li> <li>• Elle conserve la chaleur,</li> <li>• On a constaté le dégagement d'un peu d'odeur</li> </ul>

**Source** : Enquête effectuée en avril 2007

Le tableau ci-dessus montre que :

- Les établissements de restauration ont tous apprécié le produit P<sub>2</sub>, avec un taux d'appréciation moyen de 85%.
- Le restaurant l'a beaucoup apprécié, avec un taux d'appréciation de 95%, pour ses caractéristiques techniques qui libèrent lentement la chaleur.

**Tableau 42 : Appréciation du produit P<sub>3</sub> par les établissements de restauration de Toliara**

Répartition des consommateurs	Appréciation (%)		Observations des utilisateurs
	Établissement	Moyenne	
Hôtel Sani	20	43,33	<ul style="list-style-type: none"> <li>• L'émission de fumée et d'odeur est insupportable pour les clients</li> <li>• Le démarr'allumage du feu est difficile</li> <li>• Le démarrage du feu a besoin d'air d'un apport d'air</li> </ul>
Restaurant Rija	50		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Le dégagement d'odeur et de fumée a perturbé le voisinage</li> <li>- Le produit est apte à cuire</li> </ul>
Gargote <i>Mpanao mokary</i>	60		<ul style="list-style-type: none"> <li>• On a constaté une émission légère de fumée,</li> <li>• Le comportement du feu est meilleur si on le mélange avec des morceaux de charbon de bois</li> <li>• Les briquettes se consomment très vite mais apte à cuire les <i>mokary</i>, le thé et le café</li> </ul>

**Source** : Enquête effectuée en avril 2007

Le tableau ci-dessus montre que :

- Le restaurant et la gargote ont apprécié légèrement le produit P<sub>3</sub> avec un taux d'appréciation moyen de 55%, alors que le grand hôtel ne l'a pas apprécié du tout avec un taux d'appréciation de 20%.
- En général, les établissements de restauration de Toliara n'ont pas apprécié le produit P<sub>3</sub> avec un taux d'appréciation moyen de 43,33%.

### 2.2.2. Satisfaction des établissements de restauration

Le tableau suivant nous montre la satisfaction des établissements de restauration, après avoir utilisé les produits P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, et P<sub>3</sub> dans le district de Toliara :

**Tableau 43 : Taux satisfaction des établissements de restauration à Toliara**

Répartition des consommateurs	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>
Grand hôtel (%)	0	100	100
Restaurant (%)	100	100	0
Gargote (%)	0	100	100
<b>Ensemble (%)</b>	<b>33,33</b>	<b>100</b>	<b>66,67</b>

**Source** : Enquête effectuée en avril 2007

Le tableau ci-dessus montre que les établissements de restauration tels que les grands hôtels, les restaurants et les gargotes de Toliara, sont beaucoup plus satisfaits par le produit P<sub>2</sub> (100% de satisfaction pour l'ensemble alors que les produits P<sub>1</sub> et P<sub>3</sub> ont des taux de satisfaction respectifs de 33,33% et 66,67%).

Toutefois, les grands hôtels et les gargotes ont été satisfaits des produits P<sub>2</sub> et P<sub>3</sub>, alors que les restaurants sont satisfaits des produits P<sub>1</sub> et P<sub>2</sub>.

Les arguments avancés par les établissements qui ont utilisé les produits sont les suivants :

- Les produits P<sub>1</sub> et P<sub>3</sub> dégagent de la fumée et de l'odeur lors de la combustion, à cause de la présence du goudron et de la cire dans ces produits. Ce qui incommode les clients et le voisinage ;
- Le produit P<sub>2</sub> est particulièrement adapté à la préparation de certains plats, comme la soupe au jarret de bœuf... qui nécessitent une longue cuisson.
- Le produit est apte à cuire tout type de plat.

En conclusion, on peut dire que les établissements de restauration, tels que les grands hôtels, les restaurants et les gargotes de Toliara, sont convaincus par le produit P<sub>2</sub>. Ce produit pourrait être une solution pour assurer leur source d'énergie, car capable de se substituer au bois-énergie (charbon de bois et bois de chauffe). Ce dernier commence à se faire rare, actuellement, à cause de la diminution de la couverture forestière de la région.

### **2.2.3. *Appréciation des produits par les ménages de Toliara***

Les appréciations des produits P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> et P<sub>3</sub> par les ménages qui les ont testés dans la ville de Toliara sont données dans les tableaux suivants :

**Tableau 44 : Appréciation du produit P<sub>1</sub> par les ménages de Toliara**

Catégorie socio-professionnelle		Appréciation (%)		Observations de l'utilisateur	
		Ménages	Moyenne		
Ménages aisés	M <sub>1</sub>	40	53,33	37,78	<ul style="list-style-type: none"> <li>Le feu est trop lent (<i>afo midongy</i>)</li> <li>Émission d'odeur incommode</li> </ul>
	M <sub>2</sub>	60			<ul style="list-style-type: none"> <li>Émanation de forte odeur désagréable</li> <li>Utilisation un peu contraignante</li> <li>Cuisson réussie</li> </ul>
	M <sub>3</sub>	60			<ul style="list-style-type: none"> <li>Dégagement de beaucoup de fumée</li> <li>Cuisson nécessitant une surveillance permanente du feu, mais</li> <li>Produit apte à cuire</li> </ul>
Ménages moyens	M <sub>1</sub>	30	36,67		<ul style="list-style-type: none"> <li>Réactivation fréquente du feu</li> <li>Usage peu pratique</li> </ul>
	M <sub>2</sub>	50			<ul style="list-style-type: none"> <li>Le produit est apte à la cuisson, mais l'odeur dégagée est écœurante</li> </ul>
	M <sub>3</sub>	30			<ul style="list-style-type: none"> <li>Démarrage du feu très difficile</li> <li>Dégagement de beaucoup de fumée et d'odeur</li> </ul>
Ménages laborieux	M <sub>1</sub>	30	23,33		<ul style="list-style-type: none"> <li>Cuisson trop lente</li> <li>Cuisson fatigante à cause de la réactivation fréquente du feu</li> </ul>
	M <sub>2</sub>	20			<ul style="list-style-type: none"> <li>L'odeur dégagée lors de la combustion rappelle celle du gazole</li> <li>Les briquettes se sont désagrégées lors de la combustion et le feu s'est éteint</li> <li>Les briquettes sont inadaptées à la cuisson</li> </ul>
	M <sub>3</sub>	20			<ul style="list-style-type: none"> <li>Feu très difficile à démarrer et besoin constant de le réactiver</li> </ul>

**Source** : Enquête effectuée en avril 2007

Les ménages aisés ont modérément apprécié le produit P<sub>1</sub>, avec un taux d'appréciation moyen de 53,33%. Par contre, les ménages moyens et laborieux n'en sont pas du tout satisfaits : taux d'appréciation moyens respectifs de 36,67% et 23,33%, compte tenu de l'émission de fumée et d'odeur comparable à celle du caoutchouc brûlé, lors de la combustion.

Ainsi, le produit P<sub>1</sub> n'a pas été apprécié par les ménages de Toliara. Le taux d'appréciation moyen est de 37,78%.

**Tableau 45 : Appréciation du produit P<sub>2</sub> par les ménages de Toliara**

Catégorie socio-professionnelle		Appréciation (%)		Observations de l'utilisateur
		Ménages	Moyenne	
Ménages aisés	M <sub>1</sub>	80	60%	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produit apte à cuire,</li> <li>• Produit capable de se substituer au bois-énergie</li> </ul>
	M <sub>2</sub>	30		
	M <sub>3</sub>	70		
Ménages moyens	M <sub>1</sub>	10	40%	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Difficulté d'allumer le feu</li> <li>• La cuisson est astreignante car le feu doit être surveillé constamment</li> <li>• Le riz est mal cuit car le feu s'est éteint au bout d'un certain temps</li> </ul>
	M <sub>2</sub>	40		
	M <sub>3</sub>	70		
Ménages laborieux	M <sub>1</sub>	50	50%	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bonne conservation de la chaleur,</li> <li>• Nécessité d'une surveillance accrue, mais satisfaction quand même</li> </ul>
	M <sub>2</sub>	60		
	M <sub>3</sub>	40		

**Source** : Enquête effectuée en avril 2007

Ce tableau montre l'appréciation du produit P<sub>2</sub> par les ménages de Toliara :

- Les ménages aisés s'en disent satisfaits, avec un taux d'appréciation moyen de 60% ;
- Les ménages moyens l'ont peu apprécié, avec un taux d'appréciation moyen de 40% ;
- Les ménages laborieux l'ont modérément apprécié, avec un taux d'appréciation moyen de 50%.

En général, les ménages de Toliara ont plus ou moins apprécié le produit P<sub>2</sub>. Le taux d'appréciation moyen est de 50%.

Ceux qui se sont dits satisfaits du produit P<sub>2</sub> affirment que les plats cuisinés à feu doux sont succulents et conservent bien le goût et la qualité initiaux, une fois les aliments cuits.

Par contre, ceux qui ont donné un avis défavorable sur leur utilisation se sont plaints, notamment de la nécessité de surveiller constamment les foyers. Mais aussi du dégagement de fumée, de la lenteur de la cuisson et de l'extinction intempestive du feu.

**Tableau 46 : Appréciation du produit P<sub>3</sub> par les ménages de Toliara**

Catégorie socio-professionnelle		Appréciation (%)		Observations de l'utilisateur
		Ménage	Moyenne	
Ménages aisés	M <sub>1</sub>	50	40	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Forte émanation d'odeur,</li> <li>• Bonne cuisson, à condition de réactiver le feu de temps à autre</li> <li>• Utilisation trop contraignante</li> <li>• Dégagement de beaucoup d'odeur</li> <li>• Désagrégation rapide des briquettes, provoquant l'extinction du feu</li> <li>• Démarrage difficile du feu</li> <li>• Utilisation astreignante à cause de la nécessité d'une ventilation permanente</li> </ul>
	M <sub>2</sub>	30		
	M <sub>3</sub>	40		
Ménages moyens	M <sub>1</sub>	40	30	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Émanation d'odeur de caoutchouc brûlé</li> <li>• La cuisson s'est effectuée sous la véranda et on a rencontré un problème de ventilation</li> <li>• Démarrage difficile du feu</li> <li>• Émission d'odeur insupportable pour les enfants.</li> <li>• Extinction intempestive du feu par défaut de ventilation (cuisson effectuée dans la maison)</li> <li>• Démarrage difficile du feu</li> <li>• Manque d'habitude de surveiller et d'activer le feu</li> </ul>
	M <sub>2</sub>	30		
	M <sub>3</sub>	20		
Ménages laborieux	M <sub>1</sub>	10	33,33	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Émission d'odeur insupportable causant des maux de tête</li> <li>• Démarrage trop lent du feu</li> <li>• Besoin permanent de ventilation, sinon extinction du feu</li> <li>• Prise de feu trop lent, surtout à défaut de vent</li> <li>• Odeur insupportable pour le voisinage</li> <li>• Cuisson nécessitant une surveillance permanente du feu</li> </ul>
	M <sub>2</sub>	20		
	M <sub>3</sub>	70		

**Source** : enquête effectuée en avril 2007

Les résultats du *test d'acceptabilité* effectué à Toliara avec le produit P<sub>3</sub> montrent que le produit n'a pas été apprécié par les ménages qui l'ont testé. Cela, quelle que soit leur classe socio-professionnelle, avec un taux d'appréciation moyen de 34,44%.

Le taux d'appréciation moyen est de 40% pour les ménages aisés, de 30% pour les ménages moyens et de 33,33% pour les ménages laborieux.

#### 2.2.4. Satisfaction des ménages

La satisfaction de chaque catégorie de ménage ayant utilisé les produits P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> et P<sub>3</sub> dans la ville de Toliara est résumée dans le tableau suivant :

**Tableau 47 : Satisfaction des catégories de ménage ayant utilisé les 3 produits à Toliara**

Catégorie Socio-professionnelle des ménages	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>
Ménages aisés (%)	66,67	66,67	33,33
Ménages moyens (%)	33,33	33,33	0
Ménages laborieux (%)	0	66,67	33,33
<b>Ensemble (%)</b>	<b>33,33</b>	<b>55,56</b>	<b>22,22</b>

**Source :** Enquête effectuée en avril 2007

À l'issue du *test d'acceptabilité* des trois produits P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> et P<sub>3</sub> auprès des ménages de la ville de Toliara, le résultat est le suivant :

- 55,56% des ménages sont satisfaits du produit P<sub>2</sub> ;
- les produits P<sub>1</sub> et P<sub>3</sub> n'ont pas satisfait les ménages. Seuls, 33,33% ont été satisfaits par le produit P<sub>1</sub>, et 22,22% pour le produit P<sub>3</sub>.
- les consommateurs sont satisfaits du produit P<sub>2</sub> pour son aptitude à cuire les plats quotidiens, malgré le dégagement de fumée, juste en début de cuisson.
- ceux qui sont satisfaits ont apprécié le produit comme étant apte à cuire, économique et se comportant bien pendant la cuisson, si on l'associe avec du charbon de bois. D'après les utilisateurs, cette association assure la combustion régulière des briquettes.
- ceux qui ne sont pas satisfaits du produit se sont plaint de l'émission d'odeur insupportable, de l'extinction intempestive, la ventilation et la surveillance permanente du feu.

#### Remarque :

*Le foyer le plus utilisé dans les ménages à Toliara et à Betioky-Atsimo est celui traditionnel : métallique, fabriqué à partir de tôles de récupération. L'enquête effectuée au niveau des ménages dans ces deux localités n'a recensé que deux (2) foyers améliorés seulement à Betioky-Atsimo, parmi les 24 relevés. Par contre, sur les 36 enquêtés à Toliara, seul le Pr Ramampihrika utilise un foyer amélioré.*

*En somme, 95% des enquêtés utilisent le foyer métallique traditionnel, dans ces deux localités.*

### 2.3. Récapitulation des résultats du test d'acceptabilité

#### 2.3.1. Appréciation des produits

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

**Tableau 48 : Appréciation des produits P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> et P<sub>3</sub> à Betioky et Toliara**

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

**Source :** Enquête effectuée en avril 2007

Le tableau ci-dessus montre que les utilisateurs qui ont accepté de tester les produits P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> et P<sub>3</sub>, dans les deux localités, apprécient modérément le produit P<sub>2</sub>, 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.

### 2.3.2. Satisfaction des utilisateurs

Le taux de satisfaction des utilisateurs qui ont accepté de tester les produits P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> et P<sub>3</sub>, dans les deux localités, est donné dans le tableau suivant :

**Tableau 49 : Satisfaction des utilisateurs**

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

**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 P<sub>2</sub>. Ce produit est constitué de semi-coke lié par la féculé de manioc et amorcé par de la fine de charbon de bois.

### 3. TEST D'ÉBULLITION D'EAU (TEE)

#### 3.1. Définition [18]

Le TEE, ou *Test d'ébullition d'eau*, constitue une évaluation rapide de la qualité des combustibles par les ménages. Il fournit, surtout, une 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.

Le TEE 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.

#### 3.2. Résultat du test

Le résultat des essais est donné dans le tableau suivant :

**Tableau 50 : Test d'ébullition d'eau**

Combustibles	Temps d'ébullition un litre d'eau	Quantité de combustible utilisée	Quantité de combustible consommée
Brique de charbon de terre	18 mn 15 s	480 g	180 g
Charbon de bois	14 mn 02 s	500 g	233 g
Bois de chauffe	13 mn 10 s	500 g	467 g

Source : Auteur

Le tableau ci-dessus montre qu'il faut plus de temps pour porter un litre (1l) d'eau à ébullition avec les briquettes de charbon de terre. Cela est dû au démarrage trop lent du feu.

### 4. TEST DE CUISINE CONTRÔLÉE (TCC)

#### 4.1. Définition [18]

Le test de cuisine contrôlée (TCC) 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.

Le TCC consiste à effectuer différentes cuissons avec des plats typiquement malgaches, 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.

#### 4.2. Résultat du test

Les résultats des tests sont portés dans le tableau 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 51 : Résultats du *Test de cuisine contrôlée***

Nature de la cuisson	Biquettes		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 (2 kapoaka)	720	300	2h 15 min	1h 55mn	2h 40mn
Maïs sec (4 kapoaka)	720	720	4h 15mn	3h 40mn	4h 30mn
Haricot sec (2 kapoaka)	720	360	3 h 30 min	2h 55mn	3h 40mn
Pied de bœuf (1,50 kg)	720	720	4h 30mn	3h 50mn	4h 45mn
-Manioc sec (1,55kg)	720	600	3h30 min	3h 05mn	3h 50mn
- Melon (1,9 kg)	720	180	27 min	18mn	42mn
- Riz (5 kapoaka)	720	480	2 h 05 min	1h 25mn	1h 55mn

Source : Auteur

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, le maïs...

## 5. 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. À éviter, donc.

## 6. CONCEPTION ET ADAPTATION DES 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 poussé 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 :

## MÉTALLIQUE



## CÉRAMIQUE



**Photo 7 : 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.

## 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 P<sub>2</sub>, 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 P<sub>2</sub>.

Le reste, c'est-à-dire le produit P<sub>1</sub>, composé de charbon de terre lié avec la fécule de manioc et amorcé avec du goudron, et le produit P<sub>3</sub>, 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 un 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.

**Remarque :**

*Pour la suite de l'étude, nous ne considérons plus que le produit P<sub>2</sub>, composé de semi-coke, lié avec de la fécule de manioc et amorcé avec de la fine de charbon de bois.*

**CINQUIÈME PARTIE :**  
**ÉVALUATION TECHNICO-ÉCONOMIQUE**  
**ET FINANCIÈRE**

Étant donné que nous disposons d'éléments suffisants pour permettre l'évaluation socio-économique et financière du projet, il s'avère important, sinon utile, d'estimer l'intérêt qu'il représente pour le pays. Surtout, dans le contexte socio-économique et financier actuel.

Aussi, l'analyse se focalisera sur la mise en place et la rentabilité socio-économique et financière d'une entreprise de transformation du charbon de terre (houille) en combustible domestique.

L'usine de transformation du charbon de terre en combustible sera implantée dans la commune de Soamanonga. Son installation dans cette localité évitera le problème du transport des matières premières et facilitera aussi l'écoulement des produits finis vers les régions de l'Androy et de l'Anosy.

Cette partie de notre travail se divise en deux chapitres :

- Le business plan ;
- L'évaluation socio-économique et financière du projet.

**Remarque :** *Certains détails techniques, importants pour la compréhension de cette partie du travail, n'y sont pas exposés. Cela pour des raisons de confidentialité relative au contrat de propriété industrielle avec WWF, qui est le maître d'œuvre de ce projet.*

## 1. BUSINESS PLAN [19]

### 1.1. Orientation stratégique de l'entreprise

L'entreprise produira :

- des briquettes de charbon de terre à partir des matières premières locales telles que le charbon de terre, la féculé de manioc et les fines de charbon de bois ;
- du gaz de ville ;
- des produits chimiques tels que le sulfate d'ammonium, les solvants et le goudron.

Elle utilisera le procédé mis au point précédemment, adapté au contexte local, et la main d'œuvre locale de la région de l'Atsimo-Andrefana.

Aussi, l'entreprise adoptera les orientations stratégiques suivantes :

- **vision :** devenir le principal fournisseur de combustible domestique pour les ménages malgaches, afin de protéger la couverture forestière de la Grande île.
- **mission :**
  - satisfaire les besoins des ménages malgaches et les établissements de restauration en matière de combustible domestique ;
  - offrir un produit de meilleure qualité par rapport à ceux déjà existants ;
  - assister et conseiller les clients pour la meilleure utilisation du produit.

- **stratégie :**
  - assurer et satisfaire les besoins des ménages et les établissements de restauration en matière de combustible domestique ;
  - œuvrer continuellement pour l'amélioration de la qualité des produits et les services y afférents, en s'appuyant sur la recherche et le développement ;
  - atteindre la taille critique qui permettra de produire à des coûts plus bas que la concurrence ;
  - offrir des produits sous différentes formes de présentation et de conditionnement pour satisfaire le client ;
  - fidéliser le client par la qualité des produits et du service ;
- **les valeurs à respecter :**
  - priorisation du client ;
  - flexibilité de la production ;
  - innovation côté produit & service ;
- **les objectifs :**
  - Conquérir le marché du combustible domestique dans les régions d'Atsimo-Andrefana, Anosy et Androy ;
  - Valoriser rationnellement les ressources naturelles ;
  - Offrir un combustible domestique au meilleur rapport qualité/prix aux utilisateurs.

Les futurs clients de l'entreprise seront :

- les ménages des régions d'Atsimo-Andrefana, Androy et Anosy ;
- les établissements de restauration de ces trois régions ;
- les entreprises de construction routière ;
- les entreprises productrices de peinture, vernis...
- les entreprises ou distributeurs d'engrais et de produits chimiques.

## 1.2. Plan marketing

Le plan marketing de production et de commercialisation du charbon de terre de la Sakoa se doit de caractériser le mieux possible la demande, l'offre et la concurrence. Cela afin de déterminer, d'une part, le volume de produit à commercialiser, la part du marché qu'il représente au niveau des régions d'Atsimo-Andrefana, Anosy et Androy, et d'autre part la stratégie à mettre en œuvre pour la commercialisation des produits, afin d'assurer une rentabilité optimale à l'entreprise, tout au long de son existence.

Le charbon de terre, transformé en combustible domestique, est un produit nouveau dans ces trois régions.

Par ailleurs, les données des études menées antérieurement par d'autres organismes, notamment les CIRAD, PNEBE et ABETOL, montrent que le bois énergie (charbon de bois et bois de chauffe) sont les principaux combustibles domestiques utilisés par la population de ces régions.

Le niveau d'utilisation des autres sources d'énergie domestiques est assez faible pour ne pas influencer sur les données d'analyse.

Par conséquent, l'étude marketing va se pencher essentiellement sur :

- L'analyse du marché en bois énergie, qui se focalisera sur :
  - l'évaluation de la demande, ainsi que les comportements des consommateurs ;
  - l'analyse de l'offre, qui se fera à travers l'identification et la caractérisation des acteurs tout au long des filières bois-énergie au départ, le long et à la fin des axes d'approvisionnement de la ville de Toliara et de Betioky ;
- La stratégie marketing, comprenant les segmentations du marché, le positionnement, la politique de produit, la politique des prix, la politique de vente et le mix-marketing. Cette stratégie sera développée dans ce chapitre.

### **1.2.1. Le marché**

Actuellement, le marché du combustible domestique dans les régions d'Atsimo-Andrefana, Anosy et Androy, est dominé par les fournisseurs de charbon de bois et de bois de chauffe.

Toutefois, il existe d'autres sources d'énergie domestique tels que le gaz, le pétrole lampant, l'énergie solaire, le biogaz et l'énergie électrique. Mais, leur niveau d'utilisation est assez faible dans ces régions, à cause de leur coût qui n'est pas à la portée de tous les ménages.

#### *1.2.1.1. Analyse de la demande*

Nous évaluerons, dans ce paragraphe, la demande en bois énergie de la population de la zone d'étude, afin de déterminer le marché et la part de marché à conquérir.

La zone d'étude comprend tous les districts des régions d'Atsimo Andrefana, Anosy et Androy. Les consommateurs cibles sont les utilisateurs de charbon de bois et de bois de chauffe tels que :

- les établissements de restauration : les grands hôtels, restaurants, snacks, gargotes, cantines scolaires, boulangers...
- les ménages de toutes les classes sociales : aisés, moyens et laborieux.

Ainsi, l'analyse sera focalisée sur la demande en bois énergie dans ces quatre régions. L'évaluation de la demande sera basée sur les données collectées par le CIRAD en 2005 et relatives à la ville de Toliara, et les enquêtes effectuées par l'équipe du CNRIT dans les districts de Toliary I, Toliary II et Betioky-Atsimo en 2007, ainsi que les données de l'Instat sur la projection de la population de 2003 à 2015

Les critères ainsi utilisés pour l'évaluation de la demande sont les suivants :

**Tableau 52 : Critères d'évaluation de la demande**

Taille des ménages en milieu urbain :	7,72
Taille moyenne des ménages en milieu rural	5
<b>Ménage utilisant le charbon de bois en milieu urbain</b>	<b>86,2 %</b>
<b>Ménage utilisant le charbon de bois en milieu rural</b>	<b>60,6%</b>
Consommation spécifique moyenne en charbon de bois :	12,6kg/hab/mois
Taux de carbonisation :	10%
<b>Ménage utilisant le Bois de chauffe en milieu urbain</b>	<b>36,8%</b>
<b>Ménage utilisant le bois de chauffe en milieu rural</b>	<b>39,4%</b>
Consommation spécifique moyenne en bois de chauffe :	21kg/hab/mois
Pouvoir calorifique inférieur du charbon de bois	4 500 kcal/kg
Pouvoir calorifique inférieur du bois de chauffe	3 500 kcal/kg
Pouvoir calorifique des briquettes de charbon de terre	6 600 kcal/kg

Source : CIRAD 2005 [12]

Les résultats découlant de cette évaluation de la demande sont donnés dans les tableaux suivants :

**Tableau 53 : Évolution de la population des 3 régions, de 2007 à 2013**

RÉGION	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Atsimo Andrefana	1 109 099	1 140 536	1 172 811	1 205 925	1 239 877	1 274 667	1 309 922
Anosy	592 546	609 342	626 585	644 277	662 416	681 003	699 838
Androy	518 748	533 452	548 548	564 036	579 916	596 188	612 677
<b>TOTAL</b>	<b>2 220 393</b>	<b>2 283 329</b>	<b>2 347 944</b>	<b>2 414 237</b>	<b>2 482 208</b>	<b>2 551 857</b>	<b>2 622 438</b>

Source : Auteur

**Tableau 54 : Évolution du nombre de ménages, de 2007 à 2013**

RÉGION	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Atsimo Andrefana	197 909	203 519	209 278	215 187	221 245	227 453	233 744
Anosy	100 674	103 527	106 457	109 463	112 545	115 703	118 903
Androy	88 384	90 889	93 461	96 100	98 806	101 578	104 388
<b>TOTAL</b>	<b>386 967</b>	<b>397 935</b>	<b>409 196</b>	<b>420 750</b>	<b>432 596</b>	<b>444 734</b>	<b>457 035</b>

Source : Auteur

**Tableau 55 : Évolution de la consommation de charbon de bois, de 2007 à 2013**

RÉGION	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Atsimo Andrefana (t)	114 758	118 011	121 350	124 776	128 289	131 889	135 537 t
Anosy (t)	64 090	65 907	67 772	69 686	71 648	73 658	75 695
Androy (t)	55 972	57 558	59 187	60 858	62 571	64 327	66 106
<b>TOTAL (t)</b>	<b>234 820</b>	<b>241 476</b>	<b>248 309</b>	<b>255 320</b>	<b>262 508</b>	<b>269 874</b>	<b>277 338</b>

Source : Auteur

**Tableau 56 : Évolution de la consommation en bois de chauffe**

RÉGION	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Atsimo Andrefana (t)	65 543	67 401	69 309	71 265	73 272	75 328	77 411
Anosy (t)	57 174	58 795	60 459	62 166	63 916	65 709	67 527
Androy (t)	55 972	57 558	59 187	60 858	62 571	64 327	66 106
<b>TOTAL (t)</b>	<b>178 689</b>	<b>183 754</b>	<b>188 954</b>	<b>194 289</b>	<b>199 759</b>	<b>205 364</b>	<b>211 045</b>

Source : Auteur

**Tableau 57 : Évolution de la consommation en énergie culinaire et son équivalent en brique de charbon de terre dans les 3 régions**

RÉGION	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Atsimo Andrefana (Gcal)	745 812	766 952	788 655	810 923	833 753	857 148	880 855
Anosy (Gcal)	488 517	502 364	516 580	531 165	546 120	561 444	576 972
Androy (Gcal)	414 622	426 374	438 440	450 819	463 512	476 517	489 697
<b>TOTAL (Gcal)</b>	<b>1 648 951</b>	<b>1 695 690</b>	<b>1 743 675</b>	<b>1 792 907</b>	<b>1 843 385</b>	<b>1 895 109</b>	<b>1 947 525</b>
Équivalent en charbon de terre (t)	<b>249 841</b>	<b>256 923</b>	<b>264 193</b>	<b>271 653</b>	<b>279 301</b>	<b>287 138</b>	<b>295 080</b>

Source : Auteur

En 2007, la demande en énergie culinaire de ces 3 régions est estimée à 1 648 951 Gcal, soit 249 841 tonnes d'équivalent en briquettes de charbon de terre, pour atteindre 1 947 525 Gcal en 2013, soit 295 080 tonnes de briquettes de charbon de terre.

La demande en énergie culinaire de la ville de Toliara est estimée à 309 150 Gcal, soit 46 841 tonnes d'équivalent en briquettes de charbon de terre, en 2007. Celle du district de Betioky-Atsimo est évaluée à 191 347 Gcal, soit 28 992 tonnes d'équivalent en brique de charbon de terre.

Le marché accuse une croissance de 2,83% par an.

#### 1.2.1.2. Analyse de l'offre

##### ❖ **Cadre légal et réglementaire** (Source : textes officiels et rapport du CIREEF) :

L'offre en bois énergie est, en théorie, cadrée par les dispositions réglementaires relatives à la gestion des ressources forestières. Ainsi, nous procéderons à l'inventaire de ces textes, sans trop entrer dans les détails.

Cette gestion entre dans le cadre de la mise en œuvre de la nouvelle politique forestière, élaborée en 1995, et adoptée par le décret N°97 – 1 200 du 2 octobre 1997. Deux éléments essentiels la caractérisent, à savoir :

- la responsabilisation des nouveaux acteurs dans la gestion des forêts ;
- la restructuration du service forestier pour la redéfinition de son nouveau rôle.

Quatre grandes orientations ont été prises :

- Orientation 1 : enrayer le processus de dégradation forestière ;

- Orientation 2 : mieux gérer les ressources forestières ;
- Orientation 3 : augmenter la superficie et le potentiel forestier ;
- Orientation 4 : accroître la performance économique du secteur forestier.

Dans ces conditions, la CIREEF a pour rôle de :

- faire le suivi et l'encadrement des exploitants forestiers ;
- contrôler le contrat ou convention entre les producteurs de bois énergie d'une part, et les collecteurs ou vendeurs d'autre part, ainsi que les points de vente ;
- non seulement, délivrer les permis de coupe à des personnes physiques ou morales au niveau des forêts domaniales, mais aussi octroyer les autorisations de coupe à des particuliers au niveau des forêts privées. Pour le premier cas, la délivrance se fait moyennant paiement de taxe, et dans le deuxième cas, l'autorisation est à titre onéreux.

Cependant, la CIREEF n'a pas les moyens suffisants, ni adéquats, pour assurer son rôle.

L'insuffisance du personnel de la CIREEF, le manque d'équipements de suivi et de contrôle face à l'étendue de la superficie forestière à surveiller, ainsi que l'inexistence de campagnes d'Information, éducation et communication (IEC) périodiques dans tous les cantonnements forestiers de Toliara, sont les principales sources du dégât environnemental actuel.

Le taux de défrichement dans l'*ex-faritany* de Toliara est estimé à 1 850 ha/an. Les feux de brousse dévastent quelque 35 000 ha/an. Certaines forêts de production ont été entièrement détruites et il n'en reste que quelques lambeaux et vestiges forestiers.

Selon Toany, directeur de la forêt Mikea (ANGAP), le défrichement de cette forêt et de celle de Ranobe est évalué à 765,9 ha dans les aires protégées, et 83 ha dans la zone protégée sur l'axe RN.9, durant l'année 2006. Pour la même année, les feux de brousse ont détruit 429 ha dans les aires protégées et 925 ha dans les zones protégées.

Compte tenu de ces manques au niveau de la CIREEF de Toliara, les besoins actuels en bois énergie de la région de l'Atsimo Andrefana auront un impact significatif sur les produits ligneux, d'ici peu de temps, si des mesures adéquates ne sont pas prises à temps. Il faudrait assurer la conservation et la gestion rationnelle de la forêt restante.

#### ❖ **Offre en bois énergie à Toliara I, Toliara II, Betioky-Atsimo et Soamanonga**

Pour Toliara I et Toliara II, les fournisseurs se trouvent sur :

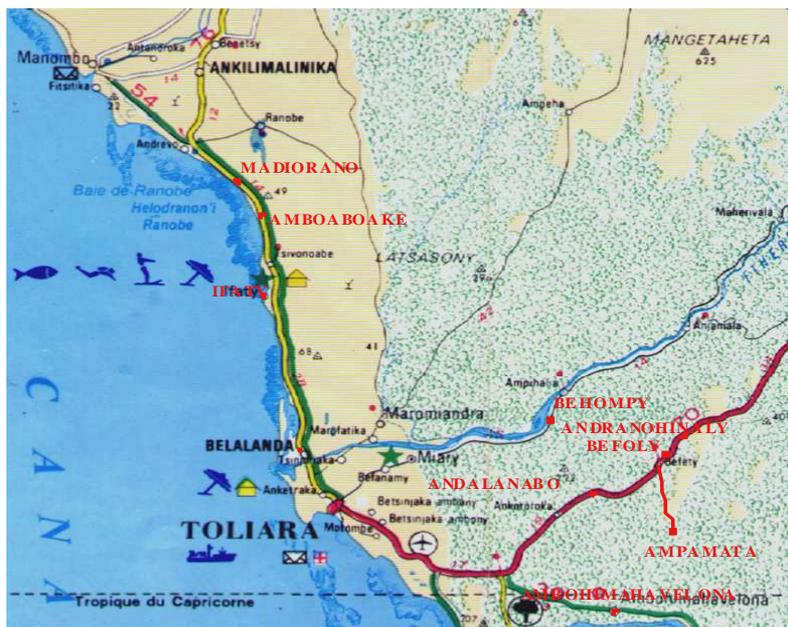
- l'axe RN.7 : les charbonniers de l'axe RN7 sont en majorité des migrants qui cherchent du travail. La plupart sont issus des ethnies Mahafaly et Tanalana. Ces charbonniers proviennent d'Andranovory et d'Androhinaly. Dans la commune d'Androhinaly, les charbonniers proviennent de trois fokontany. À savoir, Ankororoka, Befoly et Ankiliberenjy. Dans la commune d'Andranovory, les charbonniers habitent dans les fokontany d'Andalanabo et d'Andaromihomaka.

La production journalière de ces deux communes est d'environ 300 sacs. Ils exploitent la forêt d'Ambohimahavelona. Le transport s'effectue par camion ou charrette. Cet axe assure les 30 à 35% de la consommation journalière de ces deux districts, selon l'enquête menée par le CNRIT, en avril 2007 ;

- l'axe RN.9 : La majorité du charbon de bois alimentant la ville de Toliara provient des communes rurales voisines suivantes : Ankilimalinika, Manombo, Marofotsy et Tsianisa.

Dans la commune d'Ankilimalinika, les charbonniers proviennent de cinq villages : Ankilivalo, Andabiry, Anketraketraka, Andravo et Sakabero. Sur place, le prix d'un sac s'élève à 4 000 ariary et le prix de vente à Toliara est de 6 000 ariary, l'écart étant réparti en 1 000 ariary de frais de transport et 1000 ariary de bénéfice. Le transport se fait par camion ou charrette. Il assure les 55 à 60% de la demande, toujours d'après l'enquête menée par l'équipe du CNRIT en avril 2007 ;

- les axes Miary et Ambohimahavelona : Les charbonniers pratiquent leur métier de façon saisonnière, puisqu'ils sont soit des agriculteurs métayers au bord de l'Onilahy, soit des agriculteurs cultivant le maïs sur brûlis dans la forêt d'Ankikiky. Le transport s'effectue par camion, charrette, moto ou bicyclette. Ils assurent les 5 à 10% de la consommation de ces deux districts.



Source : CIRAD en 2005 [12]

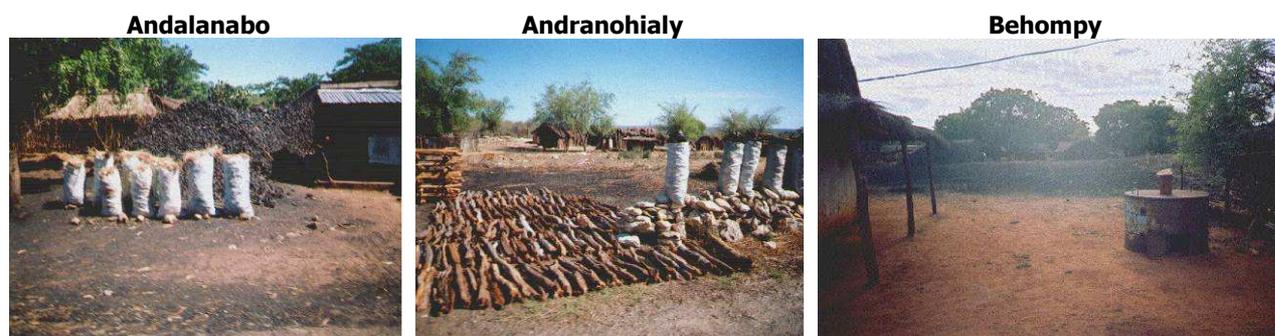
**Photo 8 : Localisation des fournisseurs de charbon de bois pour la ville de Toliara**

Pour la commune de Betioky-Atsimo, les sources d'approvisionnement sont :

- l'axe RN.10 : plus précisément, les villages de Tanantsoa et de Befaha, qui assurent les 45% du besoin de la commune rurale de Betioky-Atsimo. Le transport se fait par charrette ;

- l'axe Bezaha, où se trouvent les villages de Tongay, Andohasatra, Ankily, Ampasilava et Bezaha Mahafaly. Ils assurent les 50 à 55% des besoins de la commune de Betioky-Atsimo. Le transport s'effectue par charrette uniquement, à cause de l'état de la route.

Pour la commune rurale de Soamanonga, la seule source d'approvisionnement est la forêt Sakoa. Le transport s'effectue par charrette ou à tête d'homme.



**Photo 9 : Sites de distribution de charbon de bois**

#### ❖ Offre en Gaz de pétrole liquéfié (GPL) à Toliara [12]

Le GPL est considéré comme une solution alternative au bois de chauffe et au charbon de bois. L'utilisation de ces derniers est considérée comme cause principale de la déforestation.

L'enquête effectuée par le PNEBE, en 2000, a montré que 10,3% des ménages de Toliara utilisent le GPL comme combustible domestique. Ce taux est de 0,9% au niveau national.

Par contre, l'étude menée par le CIRAD, en 2005, a montré que seuls 4% des ménages utilisent le GPL. Ce taux a fortement diminué par rapport à celui de l'année 2000, selon le PNEBE, à cause de l'augmentation du prix du baril de pétrole sur le marché international.

À Toliara, les Vitogaz, Handigaz et autre Galana Gaz sont les trois marques de GPL disponibles sur le marché et utilisés pour la cuisson. Le GPL est conditionné en bouteilles de 9 et 12,5 kg, pour les ménages, et en bouteille de 39 kg pour les hôtels et les industries.

Compte tenu du pouvoir d'achat très faible de la population, la consommation de GPL est aussi très faible.

#### 1.2.2. *Segmentation du marché*

En utilisant les critères de segmentation du marché, suivant :

- le mode d'utilisation des produits,
- le comportement d'achat,
- la sensibilité au prix,
- la sensibilité au délai de livraison,

Nous avons déterminé les segments de marché suivants :

- Les établissements de restauration, constitués par :
  - les grands hôtels ;
  - les restaurants ;
  - les gargotes ;
- Les ménages, que l'on peut classer en :
  - ménages aisés ;
  - ménages moyens ;
  - ménages laborieux.

### 1.2.3. Analyse de la concurrence

La concurrence est intense. Les producteurs artisanaux dominent le marché du bois-énergie. Les communes productrices de bois-énergie et les forêts cibles des exploitants sont données dans le tableau suivant :

**Tableau 58 : Les communes et quartiers touchés par la production de charbon de bois**

Commune	Quartiers touchés par la production de charbon de bois	Forêt cible
<b>Marofoty</b>	Antanimahery, Marofoty, Beroroha, Antandroka, Antanimena et Antsonomahify	Ala Mikea
<b>Ankililoaka</b>	Ankatepo, Ankilimaro, Amborogositra, Antsepa, Ankihana et Ankorondamoty	Ala Mikea
	Andranolava, Antanilehibe, Aborano, Antanimena Maintany	Ala Atsinanana
<b>Belalanda</b>	Tsivonoa, Mangily et Amboaboaky	Mangrove
<b>Analamisampy</b>	Namangoha, Ampasikibo, Analamisampy et Andabetoky	Les arbres fruitiers situés près du village, en particulier le kily
<b>Milenaka</b>	Ampihamy Atsimo, Andranobe, Moralonake et Antranolahatra	Forêt Mikea
	Antanimikodoy	Ala Atsinanana
<b>Tsianisiha</b>	Andoharano, Tsiafanoka, Antanimena, Beravy Antsohitika, Tsianisiha et Antanamikodoy	Ala Atsinanana
<b>Ankilimalinike</b>	Ankilimalinike, Antsaro, Satabera Tsiky et Andrevo Ambony	Forêt Ranobe

Source : Enquête effectuée en 2007

Les problèmes des fournisseurs actuels résident dans la gestion des flux, la maîtrise des coûts et la présentation des produits. Ils n'ont suivi aucune formation dans l'exercice de leur métier.

Pour notre part, nous allons apporter les avantages suivants :

- une large gamme de produits : conditionnement de 1kg ; 5kg ; 20kg et 40 kg ;
- le prix de vente du produit dépend de deux facteurs :

- le lieu d'achat, soit auprès de l'usine productrice, soit auprès des points de vente ou des distributeurs ;
- le type de conditionnement choisi : le prix d'un kilogramme de charbon conditionné en sac de 1 kg n'est pas identique au prix d'un kilogramme conditionné en sac de 10 kg ;
- La facilité de gestion des stocks des distributeurs ;
- Un délai de livraison constant et court.

Le tableau suivant résume les forces et les faiblesses des concurrents directs et indirects des briquettes de charbon de terre :

**Tableau 59: Forces et faiblesses des concurrents directs**

<b>Produit</b>	<b>Forces</b>	<b>Faiblesses</b>
Charbon de bois	<ul style="list-style-type: none"> <li>- les ménages ont déjà une familiarité à son utilisation</li> <li>- disponibilité permanente sur le marché</li> <li>- assurance d'une bonne cuisson</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- produit salissant</li> <li>- prix instable (augmentation du prix pendant la saison des pluies)</li> <li>- qualité non homogène</li> <li>- procuration du taux de poudre très élevé (10%)</li> <li>- détruit l'environnement</li> </ul>
Bois de chauffe	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ne nécessite pas de moyens financiers élevés</li> <li>- utilisation facile</li> <li>- prix moins cher</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- dégage beaucoup de fumées</li> <li>- difficile à trouver pendant la saison de pluies</li> <li>- requiert une surveillance permanente pendant le temps de cuisson</li> <li>- stockage encombrant</li> <li>- produit salissant</li> <li>- détruit l'environnement</li> </ul>

Source : Auteur

**Tableau 60 : Forces et faiblesses des concurrents indirects**

Produit	Forces	Faiblesses
Pétrole	- rapidité de cuisson - utilisation facile	- dégage trop de fumées - dégage une odeur suffocante qui affecte la santé et l'environnement - produit salissant
Électricité	- rapidité de cuisson - produit non salissant - facile à utiliser	- problème de sécurité - prix élevé - approvisionnement discontinu (surtout actuellement, à cause du délestage) - non disponible dans certaine localité
Gaz	- rapidité de cuisson - assure la propreté - facile à utiliser - transport facile	- problème de sécurité - prix élevé et instable (fonction du cours du pétrole) - non disponible dans certaine localité
Énergie éolienne	- énergie propre - fruit de la technologie avancée	- nécessite un investissement élevé - exposé aux risques cycloniques - disponibilité limitée
Énergie solaire	- énergie propre - adapté aux endroits les plus reculés	- coût d'investissement élevé - exige une maintenance de base régulière - disponibilité limitée

Source : Auteur

Le produit à lancer sur le marché présente les forces et faiblesses qui sont résumées dans le tableau suivant :

**Tableau 61 : Forces et faiblesses du produit à lancer sur le marché**

Forces	Faiblesses	Points à accentuer
- source d'énergie économique et durable à cause de la compacité du produit ; - moins salissant que le bois-énergie - bénéfique pour l'environnement (atténuation de la déforestation)	- produit nouveau sur le marché ; - Temps d'inflammabilité élevé ; - dégagement de fumée pendant le feu de démarrage et émission d'odeur lors de la combustion, à cause de la genèse du charbon de terre	- prix abordable par rapport aux autres combustibles ; - temps d'inflammabilité avoisinant celui du charbon de bois ; - disponibilité toute l'année auprès des utilisateurs potentiels ;

Source : Auteur

Ce tableau montre les forces et les faiblesses du produit P<sub>2</sub>, ainsi que les points à accentuer pour pouvoir concurrencer les autres sources d'énergie actuelles.

#### **1.2.4. Positionnement marketing**

Après avoir analysé les attraits et atouts de chaque segment de marché, nous choisirons comme cibles, par ordre de priorité :

- les gargotes ;
- les restaurants ;

- les grands hôtels
- les ménages moyens ;
- les ménages laborieux ;
- les ménages aisés.

Compte tenu de l'importance du marché de la ville de Toliara et ses environs, les efforts seront axés sur ces localités, ainsi que les communes du district de Betioky-Atsimo qui se situent près du site d'implantation de l'usine de transformation, dans un premier temps. Puis, nous procéderons à la conquête des marchés des autres districts et régions, en faisant tâche d'huile.

En ce qui concerne les produits secondaires, les clients cibles sont constitués :

- des ménages aisés de ces trois régions, pour le gaz de ville ;
- des entreprises productrices de peinture et vernis, pour les solvants et leurs dérivés ;
- des entreprises distributeurs d'engrais et de produits chimiques, pour le sulfate d'ammonium ;
- des entreprises de construction de route, pour le goudron.

### **1.2.5. Politique des produits**

#### *1.2.5.1. Les briquettes de charbon de terre*

La présentation du produit sur le marché sera la suivante :

- La briquette de charbon de terre sera produite sous une forme cylindrique de 4 cm de diamètre et 5 cm de hauteur ;
- La couleur est noire et non poussiéreuse ;
- Elle sera vendue dans des sacs de 1kg, 5kg, 20kg et 40kg, dans le but d'offrir une gamme de choix élargie aux consommateurs ;
- Sur chaque emballage seront inscrits le nom et la marque commerciales de la société et la mention : « Briquettes de charbon de terre ».

#### *1.2.5.2. Les produits secondaires*

- Le gaz de ville sera mis en bouteille de 4,9 kg et 12,5kg ;
- Les solvants seront mis en fûts de 30 litres, 50 litres et 100 litres ;
- Le sulfate d'ammonium sera mis en sacs de 25 kg et 50 kg ;
- Le goudron sera mis en fûts de 100 litres et 200 litres.

Les emballages porteront le nom commercial de la société et le nom de chaque produit.

### 1.2.6. La politique de prix

Le prix de vente des briquettes dépend de deux facteurs :

- le lieu d'achat, soit directement auprès de l'usine productrice, soit auprès des points de vente ou distributeurs ;
- le type de conditionnement choisi, c'est à dire, le prix d'un kilogramme de charbon conditionné en sac de un kilogramme (1kg) n'est pas identique au prix d'un kilogramme conditionné en sac de 20 ou 40 kg.

Le tableau suivant nous montre le prix en ariary d'un kilogramme de briquette de charbon de terre par rapport au lieu de vente et le conditionnement choisi :

**Tableau 62 : Classement du prix de vente du charbon de terre (en ariary)**

Conditionnement	1kg	5kg	20kg	40kg
Prix départ usine (Ariary)	400	2 050	8 000	14 800
Prix unitaire (Ariary/kg)	400	370	350	320
Prix unitaire (Ariary/Mcal)	60,61	56,06	53,03	48,48

Source : Auteur

À titre de comparaison, le prix moyen du charbon de bois dans la ville de Toliara est de :

- 5 000 ariary le sac PM (15kg environ), soit 333 ariary/kg (74 ariary/Mcal) ;
- 9 500 ariary le sac GM (30 kg environ), soit 316 ariary/kg (70,22 ariary/Mcal) ;

Concernant les produits secondaires, les de vente départ usine sont :

- 1 200 ariary/kg pour le sulfate d'ammonium ;
- 2 000 ariary/kg pour le gaz de ville.

Nous pourrions même, le cas échéant, adopter un prix promotionnel, surtout pendant la période de démarrage des activités. Cela afin d'assurer la pénétration des produits sur le marché.

### 1.2.7. La politique de communication

Notre préoccupation de tous les jours sera d'arriver à convaincre les clients cibles à utiliser nos produits plutôt que ceux de la concurrence.

Nous choisirons comme cibles prioritaires, tous les consommateurs de bois énergie de ces trois régions et les consommateurs de gaz de la Grande île. Toutefois, nous effectuerons une priorisation selon le positionnement marketing de l'entreprise.

Ainsi, l'activité communicationnelle pour le lancement des briquettes de charbon de terre et du gaz de ville, peut se diviser en trois étapes :

- Mener une campagne de sensibilisation massive auprès des différentes zones cibles, afin de persuader les gens à protéger l'environnement ;
- Ensuite, faire la publicité de la briquette de charbon de terre et du gaz de ville, en mettant en exergue les avantages obtenus par l'utilisation de ces combustibles ;

- Enfin, participer à des manifestations commerciales pour améliorer la notoriété et pour augmenter la part de marché est également nécessaire. Éventuellement, offrir des échantillons gratuits aux consommateurs cibles pour qu'ils puissent faire des essais sur ces combustibles et constater d'eux-mêmes, les avantages qu'apporte le produit.

La publicité sera axée sur les thèmes suivants :

- La protection de l'environnement ;
- La qualité technique du produit ;
- La facilité d'utilisation et la présentation des produits sous divers modes de conditionnement ;
- Le meilleur service : court délai de livraison et disponibilité pendant toute l'année, conseils, assistance technique sur l'utilisation du produit...

Les supports médiatiques à utiliser sont la radio, la télévision et l'affichage. En effet, selon l'enquête effectuée auprès des utilisateurs, les types de médias les plus connus et les plus suivis par les ménages dans la zone d'étude, sont la radio et la télévision.

Ces supports peuvent, facilement, véhiculer l'image ou le message publicitaire à soumettre aux consommateurs.

### **1.2.8. La politique de distribution**

Nous choisirons le système de distribution « indirecte », c'est-à-dire que l'entreprise utilisera des intermédiaires pour la vente de ses produits (circuit court). Les clients potentiels sont trop nombreux pour être tous atteints sans intermédiaires par l'entreprise.

Les intermédiaires qui se trouvent dans les fokontany et communes aux environs du site de production pourront prendre livraison directement à l'usine. Cependant, pour les distributeurs qui se situent loin du site de production, les produits seront livrés à domicile.

Le choix des canaux et du type de circuit de distribution se fera donc indirectement, sachant que la briquette de charbon de terre est un produit de grande consommation.

Ainsi, les vendeurs de charbon de bois et bois de chauffe actuels pourront être choisis comme distributeurs des briquettes de charbon de terre auprès des consommateurs (à cause de leurs expériences dans la vente de tel type de produit). Toutefois, les bazars de quartier, les quincailleries et les épiceries pourront renforcer les canaux de distribution des produits vers les consommateurs.

On peut donc schématiser comme suit, le circuit de distribution des produits :



**Figure 20 : Schéma du circuit de distribution**

Une distribution et une communication intensives devront être entreprises pour obtenir rapidement une part de marché consistante.

### 1.3. Plan de production

#### 1.3.1. Prévision de production

Le promoteur du projet prévoit l'extraction de 300 000 tonnes de charbon de terre brut par an. Ce qui correspond à une production annuelle de 231 500 t de briquettes de charbon de terre.

Ce qui permet d'établir le planning de production suivant :

- Les deux premières années (années -1 et 0) sont les années d'installation du projet. Les 60% des équipements seront acquis dès la première année et le reste (40%) à la deuxième.
- Année 1: début de l'exploitation pour une production de 45 000 t/an (soit 19,5% de la capacité de production de l'usine) de briquette de charbon de terre, correspondant à 70.158 t de charbon brut,
- Année 2 : la production atteindra 56 500 t/an (24,5% de la capacité), correspondant à 84.275 t de charbon brut ;
- Année 3 : la production sera de 79 750 t/an (soit 34,5% de la capacité), correspondant à 112.906 t de charbon brut ;
- Année 4 : le volume de production atteindra 113 000 t/an (49% de la capacité de production), correspondant à 153 851 t de charbon brut ;
- Année 5 : l'usine produira 150 000 t/an de briquettes de charbon de terre (soit 65% de la capacité de production sera atteinte), correspondant à 199 413 t de charbon brut ;
- Année 6 : la production atteindra 223 000 t/an (soit 96,5% de la capacité de production), correspondant à 289 307 t de charbon de terre ;
- Année 7 : le volume de production sera de 231 500 t/an correspondant à 300 000 t de charbon brut ; Donc, la capacité de production de l'usine sera atteinte.

La prévision de production de l'usine, pendant les dix premières années du projet, est résumée dans le tableau suivant :

**Tableau 63 : Programme de production pendant les dix premières années du projet**

DÉSIGNATION	Années -1 et 0	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5	Année 6	Année 7	Année 8
Brique de charbon de terre (t)	Installation de l'usine de transformation	45 000	56 500	79 750	113 000	150 000	223 000	231 500	231 500
Volume de production/capacité de l'usine	0	19,5%	24,5%	34,5	49%	65%	96,5%	100%	100%
Part de marché	0	18%	22%	30%	42%	54%	78%	78%	76%

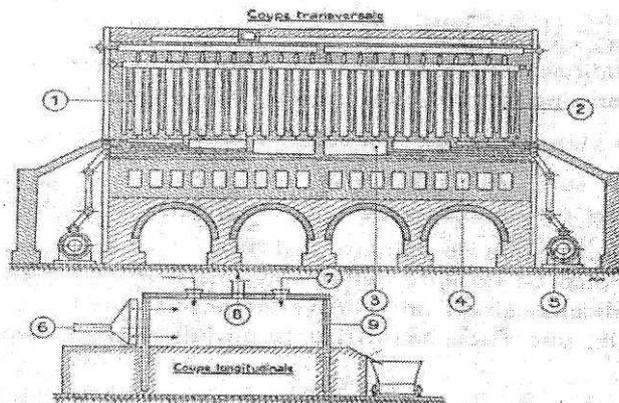
Source : Auteur

### 1.3.2. L'usine de transformation de la houille en combustible domestique

#### 1.3.2.1. Matériels et équipements

Les matériels et équipements nécessaires à la transformation de la houille en combustible domestique sont les suivants :

- Concasseur-calibreur ;
- Four à ruches ou four à coke ;
- Coal car de chargement ;
- Transport de coke à chaud ;
- Transport de coke éteint ;
- Broyeur ;
- Calibreur ;
- Malaxeur ;
- Machine à compacter (presse) ;
- Séchoir ;
- Pont roulant ;
- Bande transporteuse ;
- Silo de stockage du charbon ;
- Tour d'extinction.



**Figure 21 : Four à coke industriel**

Les matériels et équipements pour la séparation des produits secondaires sont constitués de :

- Pot séparateur ;
- Décanteur ;
- Séparateur des mixtes ;
- Condenseur primaire ;

- Dégoudronneur électrostatique ;
- Extracteur de gaz ;
- Saturateur ;
- Séchoir de gaz (ammoniac)
- Condenseur secondaire ;
- Colonne de distillation ;
- Débenzolage du gaz ;
- Gazomètre à sec ;
- Tour d'épuration ;
- Dénaphtalinage ;
- Gazomètre à eau ;
- Compteur de gaz ;
- Conduite de distribution de gaz ;
- Appareil d'embouteillage ;
- Filtre ;
- Citerne enterrée pour le stockage du carburant de 150m<sup>3</sup>.

#### 1.3.2.2. *Les matériels de transport et de manutention*

Les matériels de transport et de manutention sont constitués de :

- Camion à benne ;
- Voiture 4 x4 ;
- Voiture légère
- Matériels de maintenance.

#### 1.3.2.3. *Les matériels de sécurité*

Compte tenu de l'importance de la sécurité incendie du projet, due à la présence massive de matières inflammables (charbon de terre, charbon de bois, briquettes de charbon, gaz de ville, carburants, emballage...) une unité de sapeurs-pompiers sera mise en place.

Par conséquent, les matériels de sécurité de cette unité de sapeurs-pompiers sont constitués de :

- Camion à échelle ;
- Fourgon à pompe ;
- Fourgon à poudre ;

- Ambulance ;
- Extincteurs ;
- Bouches d'incendie ;
- Trousses de secours ;

#### 1.3.2.4. *Le matériel de pesage*

Il sera constitué d'un pont-bascule d'une portée de 100 tonnes

#### 1.3.2.5. *Infrastructures*

L'usine de transformation occupera une superficie de 0,6 ha et celle de la séparation un peu plus d'un hectare. Elles seront distantes de 60 m environ. Les deux usines seront reliées entre elles par une voie ferrée de 330 m de long.

❖ **L'usine de transformation** comprendra les bâtiments suivants :

- un office de bureau ;
- un hangar de cokéfaction ;
- une station-service ;
- un atelier et magasin ;
- une salle de préparation du liant ;
- une aire de concassage ;
- une salle de séchage ;
- une salle de conditionnement ;
- un hangar de stockage des briquettes ;
- une salle de compactage ;
- une salle de malaxage ;
- trois silos de stockage de charbon ;
- un grand parking de 2.500m<sup>2</sup>.

❖ **Les bâtiments de l'usine de séparation** seront constitués de :

- Un hangar de stockage des produits finis ;
- deux salles de séparation ;
- un hangar d'embouteillage ;
- un magasin de stockage des gaz.

❖ **La cité du personnel** sera localisée dans deux endroits différents. Le premier endroit se situe sur la droite de la route menant vers Ankinany où la cité des ouvriers sera

construite. Elle sera constituée de bâtiments à 4 appartements. Sur une superficie de 2 ha, il est prévu de construire des bâtiments totalisant 140 appartements de 56 m<sup>2</sup> chacune.

- ❖ **La cité des cadres** se trouvera près de la place du marché. Elle occupe une superficie d'environ 0,5 ha et sera constituée de 15 villas basses individuelles de 56m<sup>2</sup>.

#### ❖ **Centrale thermique**

Une centrale thermique à charbon sera mise en place. Elle assurera l'approvisionnement en électricité de l'usine et des habitations du personnel.

#### ❖ **Réservoir d'eau**

Afin d'assurer l'approvisionnement en eau de l'extraction et la transformation en combustible domestique du charbon, ainsi que l'alimentation en eau des infrastructures d'accueil, pendant toute l'année, un réservoir d'eau sera mis en place. Il est prévu pour pallier le manque d'eau de la région en saison sèche.

Ainsi, les rizières qui se trouvent du côté de la rivière Bevinda seront transformées en réservoir d'eau. La superficie ainsi occupée sera de 2 ha (20 000 m<sup>2</sup>) pour une profondeur de 2 m. La capacité de stockage du réservoir d'eau sera de 40 000 m<sup>3</sup> d'eau utilisable.

Le fond du réservoir d'eau sera tapissé d'une couche d'argile d'une épaisseur de 50 cm, pour éviter la perte d'eau par infiltration.

Le réservoir d'eau sera alimenté en eau par la rivière Bevinda et Mahasora. Le choix de l'emplacement du réservoir d'eau à été dicté par :

- la faible altitude du terrain qui assurera l'alimentation en eau du réservoir par gravité ;
- les caractéristiques géotechniques du sol qui permettront le déblayage jusqu'à 2 m de profondeur.



**Photo 10 : Rizières à transformer en réservoir d'eau**

#### ❖ **Installation d'alimentation en eau potable**

Afin d'assurer l'alimentation en eau potable des cités et de l'usine, une installation de traitement d'eau sera mise en place.

### **1.3.3. Approvisionnement en matières premières et consommables**

#### *1.3.3.1. Le charbon de terre*

Le charbon de terre sera extrait de la mine de la Sakoa.

#### *1.3.3.2. La fine de charbon de bois [12]*

La production de fine de charbon de bois sera intégrée dans le processus de transformation du charbon de terre en combustible domestique.

Afin d'assurer l'approvisionnement en bois-énergie du projet, le promoteur devra mettre en place une plantation d'arbre à croissance rapide dès la mise en place des infrastructures du projet. Les essences à planter seront l'eucalyptus camaldulensis et l'eucalyptus crebra. La superficie totale de la plantation est estimée à 24 114 ha.

#### *1.3.3.3. La fécule de manioc*

La fécule de manioc n'est autre que l'amidon extrait des tubercules de manioc par voie humide, ou précisément par hydrolyse. (Cf. principe de fabrication, en annexe 7).

### **1.3.4. Les ressources humaines**

L'usine de transformation du charbon de terre en combustible domestique emploiera 148 salariés permanents. La répartition du personnel de l'usine de transformation par poste est la suivante :

- Administration : 33 personnes ;
- Usine de transformation du charbon de terre en combustible domestique : 37 personnes ;
- Unité de sapeurs-pompiers : 3 ouvriers ;
- Centrale thermique à charbon : 7 personnes ;
- Service de maintenance : 6 ouvriers ;
- Usine de Séparation des produits secondaires : 54 employés ;
- Installation de traitement et d'adduction d'eau potable : 8 salariés ;

L'usine de transformation fonctionnera 24 heures sur 24 ; 7 jours par semaine. Toutefois, l'administration et la mine ne fonctionneront que 8 heures par jour, 5 jours/semaine.

Les ouvriers seront recrutés dans les communes environnantes (Somanonga, Beroy, Beahitse, Betioky...). Un service de transport du personnel sera mis en place pour assurer leur déplacement de leur habitation vers le lieu de travail, tous les jours. Seul, le personnel cadre et les chefs d'équipe/section seront installés dans la cité des travailleurs.

Une formation sera dispensée aux employés, 6 mois avant le début des activités de transformation.

## 2. ÉVALUATION FINANCIÈRE DU PROJET

### 2.1. Investissements initiaux

#### 2.1.1. Immobilisations incorporelles

Ils sont constitués par les frais de premier établissement qui s'élèvent à 2 milliards d'Ariary

#### 2.1.2. Immobilisations corporelles

Ils sont constitués par les coûts :

- de construction des bâtiments et parcs divers ;
- de la réhabilitation des routes et la construction de chemin de fer ;
- de l'achat des matériels et équipements du projet ;
- des installations du système d'alimentation en eau du projet ;

Les immobilisations corporelles du projet, ainsi que leur coût sont résumés dans le tableau suivant :

**Tableau 64 : Résumé du coût des immobilisations corporelles**

Désignation	Montant (millions Ar)
Bâtiments et parcs...	10 121
Route et chemin de fer	1 118
Matériels et équipements	36 225
Installation d'alimentation en eau du projet	8 908
<b>TOTAL</b>	<b>56 373</b>

Source : Auteur

#### 2.1.3. Fonds de roulement

L'actif circulant est obtenu à partir du calcul du fonds de roulement nécessaire pour assurer le fonctionnement de l'usine.

Le fonds de roulement indique les moyens financiers nécessaires au fonctionnement du projet. Il est défini comme la différence entre l'actif circulant (montants à recevoir) et les engagements courants. Pour le calculer, il convient de déterminer d'abord la couverture minimale à assurer (n) pour les actif et passif courants. On divise ensuite ce « n » par 360, et le taux (n/360) sera multiplié par le coût annuel de chaque poste considéré (voir tableau de calcul du fonds de roulement).

Cependant, l'encaisse à maintenir est calculée séparément. Le montant de base (annuel) s'obtient par : coûts de production moins coûts des matières moins amortissements

Le tableau suivant montre le calcul du fonds de roulement initial du projet :

**Tableau 65 : Estimation du fonds de roulement (Ar 1 000)**

Désignation	Nombre minimal de jours de couverture	Fonds nécessaire	Observations
<b>I - Actif circulant :</b>			
<b>A - Comptes débiteurs</b>	20	341 925	20 jours de frais de production moins amortissement et intérêts
<b>B - Stocks</b>			
Charbon	5		5 jours
Fine de charbon	10	9 375	10 jours
Fécule	15	52 500	15 jours
Autres	20	98 963	20 jours
Pièces de rechange	45	64 094	45 jours
Produits finis	30	470 383	30 jours plus FG administratifs
<b>C - Encaisse</b>	10	115 995	10 jours
<b>D - Actif circulant</b>		1 153 234	
<b>II - Passif courant</b>			
Comptes créditeurs	60	563 140	60 jours de matières premières et de services publics
<b>III - Fonds de roulement</b>		<b>5 940 000</b>	

Source : Auteur

#### **2.1.4. Investissements totaux initiaux**

Le coût des investissements totaux initiaux est défini comme la somme du capital fixe (investissements fixes plus dépenses de premier établissement) et du fonds de roulement.

Le tableau suivant montre le résumé des investissements totaux initiaux du projet

**Tableau 66 : Résumé des investissements totaux initiaux**

Catégorie d'investissement	Montant (millions d'Ar)
Coût des immobilisations corporelles	56 373
Dépenses de premier établissement	2 000
Fonds de roulement (en pleine capacité)	5 940
<b>Total</b>	<b>64 313</b>

Source : Auteur

Ainsi, les investissements totaux initiaux du projet s'élèvent à 64 313 millions d'ariary (33 millions de dollars américains).

#### **2.2. Plan de financement du projet [19]**

Afin d'assurer le financement du projet, nous proposons le plan de financement suivant :

**Tableau 67 : Plan de financement du projet (millions d'ariary)**

Désignation	Année (-1)	Année 0	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5	Année 6	Année 7	Année 8
<b>EMPLOIS (BESOINS)</b>										
Investissements nouveaux	13 099	45 274	-	-	-	-	-	-	-	-
Investissement de renouvellement	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Remboursement de dettes LMT	-	-	3 716	3 984	4 280	4 610	4 980	4 059	4 262	4 475
Besoins en fond de roulement	-	5 940			-	-	-	-	-	-
Distribution de dividende	-	-	5 713	5 713	5 713	5 713	5 713	5 713	5 713	5 713
<b>TOTAL EMPLOIS</b>	<b>13 099</b>	<b>51 214</b>	<b>9 429</b>	<b>9 697</b>	<b>9 993</b>	<b>10 323</b>	<b>10 693</b>	<b>9 772</b>	<b>9 975</b>	<b>10 188</b>
<b>RESSOURCES</b>										
Ressources internes	-	-	17 385	12 249	12 247	59 937	87 718	131 486	183 056	247 512
Capacité d'auto financement	-	-	1 545	9 983	24 296	40 304	59 276	91 424	92 528	89 353
Cession d'actif immobilisé	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Total ressources internes</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>18 930</b>	<b>22 232</b>	<b>36 543</b>	<b>100 241</b>	<b>146 994</b>	<b>222 910</b>	<b>275 584</b>	<b>336 865</b>
Ressources externes										
Emprunt LMT	-	44 000								
Augmentation du capital	13 099	7 214								
<b>Total ressources externes</b>	<b>13 099</b>	<b>51 214</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>
<b>TOTAL RESSOURCES</b>	<b>13 099</b>	<b>51 214</b>	<b>18 930</b>	<b>22 232</b>	<b>36 543</b>	<b>100 241</b>	<b>146 994</b>	<b>222 910</b>	<b>275 584</b>	<b>336 865</b>
<b>TRÉSORERIE</b>	<b>0</b>	<b>-</b>	<b>9 501</b>	<b>12 535</b>	<b>26 550</b>	<b>89 918</b>	<b>136 301</b>	<b>213 138</b>	<b>265 609</b>	<b>326 677</b>
<b>TRÉSORERIE CUMULÉE</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>9 501</b>	<b>22 036</b>	<b>48 586</b>	<b>138 504</b>	<b>274 804</b>	<b>487 942</b>	<b>753 551</b>	<b>1 080 229</b>

Source : Auteur

Le financement du projet s'effectuera, donc, par :

- l'apport de 20 313 millions d'ariary par les promoteurs du projet ;
- l'emprunt à long terme de 40 000 millions d'ariary auprès des institutions financières à un taux de 5% ;
- l'emprunt à moyen terme de 4 000 millions d'ariary à un taux de 20%.
- la capacité d'auto-financement et la disponibilité issues des activités de l'entreprise.

### 2.3. Tableaux de remboursement des emprunts [19]

Les tableaux ci-dessous montrent les frais financiers et les remboursements des emprunts :

**Tableau 68: Remboursement de l'emprunt à moyen terme (1 000 Ar)**

	Montant :	4 000 000			
	Durée	5 ans		Annuité =	1 337 519
	Taux	20%			
	Condition :	Annuité constante			
<b>Année</b>					
	<b>Montant</b>	<b>Intérêt</b>	<b>Remboursement</b>	<b>Annuité</b>	<b>Capital restant dû</b>
<b>1</b>	4 000 000	800 000	537 519	1 337 519	3 462 481
<b>2</b>	3 462 481	692 496	645 023	1 337 519	2 817 459
<b>3</b>	2 817 459	563 492	774 027	1 337 519	2 043 432
<b>4</b>	2 043 432	408 686	928 833	1 337 519	1 114 599
<b>5</b>	1 114 599	222 920	1 114 599	1 337 519	0
	Total	2 687 594	4 000 000	6 687 594	

Source : Auteur

**Tableau 69: Remboursement de l'emprunt à long terme (kar)**

	Montant :	40 000 000			
	Durée	10 ans		Annuité	5 180 183
	Taux	5%			
	Condition :	Annuité constante			
<b>Année</b>					
<b>Année</b>	<b>Montant</b>	<b>Intérêt</b>	<b>Remboursement</b>	<b>Annuité</b>	<b>Capital restant dû</b>
1	40 000 000	2 000 000	3 180 183	5 180 183	36 819 817
2	36 819 817	1 840 991	3 339 192	5 180 183	33 480 625
3	33 480 625	1 674 031	3 506 152	5 180 183	29 974 473
4	29 974 473	1 498 724	3 681 459	5 180 183	26 293 014
5	26 293 014	1 314 651	3 865 532	5 180 183	22 427 481
6	22 427 481	1 121 374	4 058 809	5 180 183	18 368 673
7	18 368 673	918 434	4 261 749	5 180 183	14 106 923
8	14 106 923	705 346	4 474 837	5 180 183	9 632 086
9	9 632 086	481 604	4 698 579	5 180 183	4 933 508
10	4 933 508	246 675	4 933 508	5 180 183	0
<b>Total</b>		<b>11 801 830</b>	<b>40 000 000</b>	<b>51 801 830</b>	

Source : Auteur

L'annuité « a » se calcule par la formule :  $a = i \times S_0 \times (1 + i)^n / [(1 + i)^n - 1]$  ;

Avec : i : taux d'intérêt annuel ;

S<sub>0</sub> : montant emprunté ;

n : durée de remboursement.

#### 2.4. Compte des résultats prévisionnels [19]

Le compte des résultats prévisionnels du projet pendant les dix premières années d'activité est donné dans le tableau suivant :

**Tableau 70 : Compte des résultats prévisionnels**

Désignation	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5	Année 6	Année 7	Année 8
Vente de charbon	16 650	20 905	29 508	41 810	55 500	82 510	85 470	85 470
Vente de sous produits	29 745	37 346	52 714	74 692	99 149	147 402	152 690	152 690
<b>Production de l'exercice</b>	<b>46 395</b>	<b>58 251</b>	<b>82 222</b>	<b>116 502</b>	<b>154 649</b>	<b>229 912</b>	<b>238 160</b>	<b>238 160</b>
Coût d'exploitation	42 050	45 689	53 245	61 858	71 040	93 917	100 611	105 646
<b>Résultat d'exploitation</b>	<b>4 345</b>	<b>12 563</b>	<b>28 976</b>	<b>54 644</b>	<b>83 609</b>	<b>135 995</b>	<b>137 549</b>	<b>132 514</b>
Frais financier LMT	2 800	2 580	2 332	2 053	1 736	1 376	1 232	1 081
<b>Cash flow brut</b>	<b>1 545</b>	<b>9 983</b>	<b>26 644</b>	<b>52 592</b>	<b>81 873</b>	<b>134 619</b>	<b>136 317</b>	<b>131 433</b>
Dotation aux amortissements	19 936	19 936	19 936	17 483	17 309	11 205	11 205	11 205
<b>Résultats avant impôts</b>	<b>- 18 391</b>	<b>- 9 953</b>	<b>6 708</b>	<b>35 109</b>	<b>64 564</b>	<b>123 414</b>	<b>125 112</b>	<b>120 228</b>
Impôt sur les bénéfices	-	-	2 348	12 288	22 597	43 195	43 789	42 080
<b>Résultat net</b>	<b>- 18 391</b>	<b>- 9 953</b>	<b>4 360</b>	<b>22 821</b>	<b>41 966</b>	<b>80 219</b>	<b>81 323</b>	<b>78 148</b>
Dividendes	-	5 713	5 713	5 713	5 713	5 713	5 713	5 713
<b>Résultat de l'exercice</b>	<b>- 18 391</b>	<b>- 15 666</b>	<b>- 1 353</b>	<b>17 108</b>	<b>36 253</b>	<b>74 506</b>	<b>75 610</b>	<b>72 435</b>
Capacité d'autofinancement	<b>1 545</b>	<b>9 983</b>	<b>24 296</b>	<b>40 304</b>	<b>59 276</b>	<b>91 424</b>	<b>92 528</b>	<b>89 353</b>
<b>Résultat net cumulé</b>	<b>- 18 391</b>	<b>- 28 344</b>	<b>- 23 984</b>	<b>- 1 163</b>	<b>40 803</b>	<b>121 022</b>	<b>202 345</b>	<b>280 493</b>

Source : Auteur

## 2.5. Bilan prévisionnel [19]

Le bilan prévisionnel du projet pendant les huit premières années de production est donné dans le tableau suivant :

**Tableau 71 : Bilan prévisionnel**

Désignation	Année -1	Année 0	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5	Année 6	Année 7	Année 8
<b>ACTIFS</b>										
<b>Actifs circulants</b>										
Stocks										
Disponibilité	-	5 940	17 385	12 249	12 247	59 937	87 718	131 486	183 056	247 512
<b>Actifs immobilisés</b>										
Immobilisations corporelles	12 099	44 274	45 367	56 557	67 667	72 830	76 149	79 656	85 727	92 625
Immobilisations incorporelles	1 000	1 000	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000
Amortissements			-19 936	-19 936	-19 936	-17 483	-17 309	-11 205	-11 205	-11 205
<b>TOTAL ACTIFS</b>	<b>13 099</b>	<b>51 214</b>	<b>44 816</b>	<b>50 870</b>	<b>61 978</b>	<b>117 284</b>	<b>148 558</b>	<b>201 937</b>	<b>259 578</b>	<b>330 932</b>
<b>PASSIFS</b>										
<b>Capitaux propres</b>										
Capital social	13 099	7 214	20 314	20 314	20 314	20 314	20 314	20 314	20 314	20 314
Réserves	-	-	-	-	-	41 270	56 006	71 420	130 308	206 108
Résultats nets	-	-	- 18 391	- 9 953	4 360	22 821	41 966	80 219	81 323	78 148
<b>Dettes financières</b>										
Dettes à Long terme		40 000	37 742	35 571	32 267	27 522	24 640	21 613	18 436	15 099
Dettes à court terme		4 000	3 462	2 817	2 043	1 115	-	-	-	-
Comptes créditeurs		-	1 689	2 121	2 994	4 242	5 631	8 371	9 197	11 263
<b>TOTAL PASSIFS</b>	<b>13 099</b>	<b>51 214</b>	<b>44 816</b>	<b>50 870</b>	<b>61 978</b>	<b>117 284</b>	<b>148 557</b>	<b>201 937</b>	<b>259 578</b>	<b>330 932</b>

Source : Auteur

## **2.6. Analyse du prix de revient des briquettes de charbon de terre et des produits secondaires [19]**

Pour pouvoir analyser nos coûts de production, et afin d'effectuer la comparaison par rapport à nos concurrents, nous avons effectué le calcul des coûts de revient des briquettes de charbon de terre, du sulfate d'ammonium et du gaz de ville.

Les tableaux suivants nous montrent le calcul de ces coûts :

**Tableau 72 : Coût de production des briquettes de charbon de terre**

Année de production	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5	Année 6	Année 7	Année 8
Programme de production (t)	45 000	56 500	79 750	113 000	150 000	223 000	231 000	231 000
<b>Matières premières</b>								
Charbon de terre	701 580	842 750	1 129 060	1 538 510	1 994 130	2 893 070	3 000 000	2 000 000
Fine de charbon de bois	1 012 500	1 271 250	1 794 735	2 542 500	3 375 000	5 017 000	6 750 000	6 750 000
Fécule de manioc	3 240 000	4 068 000	5 742 000	8 136 000	10 800 000	16 056 000	17 640 000	17 640 000
Mains d'œuvres	30 314	38 060	53 723	76 121	101 045	150 221	165 041	202 091
Eau & électricité	0	0	0	0	0	0	0	0
Carburants	1 086 600	1 086 600	1 086 600	1 262 040	2 019 600	2 255 760	2 580 720	2 915 520
Entretien	77 150	77 150	77 150	77 150	231 451	231 451	231 451	385 751
Réparation et pièces de rechange	462 901	462 901	462 901	462 901	1 388 704	1 388 704	1 388 704	2 314 506
<b>Coût de fabrication</b>	<b>6 611 045</b>	<b>7 846 711</b>	<b>10 346 169</b>	<b>14 095 222</b>	<b>19 909 930</b>	<b>27 992 206</b>	<b>31 755 916</b>	<b>32 207 868</b>
Frais d'administration	950 497	950 497	950 497	950 497	950 497	950 497	950 497	950 497
Frais de vente et de distribution	1 530 150	1 921 188	2 711 766	3 842 377	510 500	7 582 743	8 330 817	10 201 000
<b>Coût d'exploitation</b>	<b>9 091 692</b>	<b>10 718 396</b>	<b>14 008 432</b>	<b>18 888 096</b>	<b>21 370 927</b>	<b>36 525 446</b>	<b>41 037 230</b>	<b>43 359 365</b>
Frais financiers	2 800 000	2 579 585	2 332 023	2 052 733	1 736 257	1 376 093	1 231 986	1 080 673
Amortissements	18 064 357	18 064 357	18 064 357	15 611 105	15 437 417	9 333 299	9 333 299	9 333 299
<b>Coûts totaux de production</b>	<b>29 956 049</b>	<b>31 362 338</b>	<b>34 404 812</b>	<b>36 551 934</b>	<b>38 544 601</b>	<b>47 234 838</b>	<b>51 602 515</b>	<b>53 773 337</b>
<b>Coût de production unitaire (Ar/kg)</b>	<b>666</b>	<b>555</b>	<b>431</b>	<b>323</b>	<b>257</b>	<b>212</b>	<b>223</b>	<b>233</b>
% Capacité de production	19,48	24,46	34,52	48,92	64,94	96,54	100,00	100,00

Source : Auteur

**Tableau 73 : Coût de production du sulfate d'ammonium**

<b>Année de production</b>	<b>Année 1</b>	<b>Année 2</b>	<b>Année 3</b>	<b>Année 4</b>	<b>Année 5</b>	<b>Année 6</b>	<b>Année 7</b>	<b>Année 8</b>
Charbon (t)	44 400	55 747	78 687	111 494	148 001	220 027	227 921	227 921
Production (t)	431	541	763	1 081	1 436	2 134	2 211	2 211
Acide sulfurique (t)	320	401	567	803	1 066	1 584	1 641	1 641
Acide sulfurique (1.000.Ar)	319 738	401 449	566 647	802 897	1 065 793	1 584 479	1 641 321	1 641 321
Mains d'œuvres (1.000.Ar)	2 021	2 537	3 582	5 075	6 736	10 015	11 003	13 473
Coût de production (1.000.Ar)	321 759	403 986	570 228	807 972	1 072 529	1 594 494	1 652 324	1 654 794
Frais de vente et de distribution (1.000.Ar)	22 584	23 244	24 580	26 489	28 614	32 806	33 265	33 265
Coût d'exploitation (1.000.Ar)	344 343	427 231	594 808	834 461	1 101 143	1 627 299	1 685 589	1 688 059
<b>Coût unitaire de production (Ar/kg)</b>	<b>800</b>	<b>790</b>	<b>779</b>	<b>772</b>	<b>767</b>	<b>762</b>	<b>762</b>	<b>764</b>

Source : Auteur

**Tableau 74 : Coût de production du gaz de ville**

<b>Année de production</b>	<b>Année 1</b>	<b>Année 2</b>	<b>Année 3</b>	<b>Année 4</b>	<b>Année 5</b>	<b>Année 6</b>	<b>Année 7</b>	<b>Année 8</b>
Production (m3)	11 544 039	14 494 182	20 458 602	28 988 365	38 480 130	57 207 127	59 259 400	59 259 400
Production (t)	13 276	16 668	23 527	33 337	44 252	65 788	68 148	68 148
Charbon (1.000.Ar)	3 507 900	4 213 750	5 645 300	7 692 550	9 970 650	14 465 350	15 000 000	15 000 000
Chaux (1.000.Ar)	2 334 000	2 930 500	4 132 500	5 861 000	7 780 000	11 566 500	12 708 000	15 560 000
Hydroxyde ferrique (1.000.Ar)	3 308 000	4 153 000	5 862 000	8 306 000	11 025 000	16 391 000	16 979 000	16 979 000
Mains d'œuvres (1.000.Ar)	8 084	10 149	14 326	20 299	26 945	40 059	44 011	53 891
Amortissements (1.000.Ar)	1 871 700	1 871 700	1 871 700	1 871 700	1 871 700	1 871 700	1 871 700	1 871 700
Coût de production (1.000.Ar)	11 029 684	13 179 099	17 525 826	23 751 549	30 674 295	44 334 609	46 602 711	49 464 591
Frais de vente et de distribution (1.000.Ar)	720 000	720 000	720 000	720 000	720 000	720 000	720 000	720 000
Coût d'exploitation (1.000.Ar)	11 749 684	13 899 099	18 245 826	24 471 549	31 394 295	45 054 609	47 322 711	50 184 591
<b>Coût unitaire de production (Ar/kg)</b>	<b>885</b>	<b>834</b>	<b>776</b>	<b>734</b>	<b>709</b>	<b>685</b>	<b>694</b>	<b>736</b>

Source : Auteur

Les tableaux ci-dessus montrent que le prix de revient :

- des briquettes de charbon de terre est de 666 ariary par kilogramme pendant la première année de production de l'usine, soit 101 ariary la mégacalorie. Toutefois, ce prix diminuera quand la quantité produite augmente, suite à l'effet d'échelle. Ainsi, il pourra atteindre 223 ariary, soit 34 ariary la mégacalorie, quand la capacité de production de l'usine sera atteinte ;
- du sulfate d'ammonium est de 800 ariary le kilogramme pendant la première année de production qui pourra diminuer jusqu'à 764 ariary lorsque la capacité de production de l'usine sera atteinte ;
- du gaz de ville est de 885 ariary le kilogramme pendant la première année de production. Il diminuera pour atteindre 694 ariary le kilogramme lorsque la capacité de production de l'usine sera atteinte.

On constate qu'au cours de la première année d'activité, les coûts de revient sont élevés (surtout pour le charbon de terre). Par contre, nos coûts de production diminueront au fur et à mesure que la production augmente. Ils atteindront leur cours minimal à la 7<sup>e</sup> année de production où la capacité de production de l'usine sera atteinte.

Cependant, les coûts des produits concurrents sont difficiles à maîtriser, surtout pour le gaz et le sulfate d'ammonium (dépendant du cours des devises).

## **2.7. Analyse des prix des produits concurrents**

Nous avons estimé les coûts de revient des concurrents pour pouvoir nous positionner au niveau du prix.

L'enquête menée dans la ville de Toliara en 2007 montre que le prix de vente du charbon de bois sur le marché est de 315 ariary le kilogramme, soit 70 ariary la mégacalorie. En effet, un sac de charbon de bois pesant environ 30kg coûte 9 000 ariary, tandis que le sac de 15 kg se vend à 5 000 Ariary. Ce prix pourrait encore augmenter à cause de la raréfaction du bois-énergie dans la zone d'étude.

On peut dire ainsi que les briquettes de charbon de terre pourraient concurrencer le charbon de bois du point de vue rapport qualité/prix.

Le prix de vente sur le marché du gaz de pétrole liquéfié est de 3 500 ariary (2007) le kilogramme. Ce prix est largement au-dessus du coût de production du gaz de ville et pourrait encore varier proportionnellement au prix du pétrole brut.

Par conséquent, le gaz de ville pourrait concurrencer facilement le gaz de pétrole liquéfié.

## **2.8. Analyse des critères de rentabilité financière du projet [19] ; [20]**

### **2.8.1. Ratios simples de rentabilité**

Les ratios simples de rentabilité du projet sont donnés dans le tableau suivant :

**Tableau 75 : Ratios simples de rentabilité**

Ratios	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5	Année 6	Année 7
Résultats nets/ Actif	-0,41	-0,20	0,07	0,19	0,28	0,40	0,31
Résultats nets/ Investissement	-0,29	-0,15	0,07	0,35	0,65	1,25	1,26
Résultats nets/ Capitaux propre	-0,91	-0,49	0,21	1,12	2,07	3,95	4,00
Résultats nets/ Chiffre d'affaire	-0,40	-0,17	0,05	0,20	0,27	0,35	0,34

Source : Auteur

#### 2.8.1.1. Rentabilité globale

Elle mesure la rentabilité de l'ensemble des actifs utilisés par l'entreprise. Elle est calculée en faisant le rapport suivant :

$$\text{Rentabilité Globale} = (\text{Résultat net} \times 100) / \text{Actif total}$$

Elle est intéressante car elle évolue très vite pendant les 6 premières années de production, même si elle est négative pendant les deux premières années.

La rentabilité globale est une mesure trop générale. C'est pourquoi, elle est souvent complétée par d'autres ratios plus significatifs.

#### 2.8.1.2. La rentabilité économique

Cet indicateur mesure la rentabilité mesurée par rapport aux actifs immobilisés utilisés par l'entreprise pour produire. On la calcule selon la relation suivante :

$$\text{Rentabilité économique} = (\text{Résultat net} \times 100) / \text{Investissement total.}$$

Elle est négative pendant les deux premières années de production. Toutefois, à partir de la troisième année, la rentabilité économique évoluera rapidement pour atteindre 125% à la sixième année de production. Ce ratio est un indicateur plus pertinent de la rentabilité mesurée en termes d'efficacité du processus productif.

#### 2.8.1.3. La rentabilité financière

Ce ratio mesure la rentabilité exprimée par rapport aux capitaux investis dans l'entreprise. La rentabilité financière se détermine de la manière suivante :

$$\text{Rentabilité financière} = (\text{Résultat net} \times 100) / \text{Capitaux propres.}$$

Elle est négative pendant les deux premières années de production. Toutefois, elle croît très rapidement à partir de la troisième année, pour atteindre 395% à la sixième année de production.

En outre, elle est supérieure à la rentabilité économique. On peut dire, alors, que le projet bénéficie d'un effet de levier.

#### 2.8.1.4. Rentabilité commerciale

Ce ratio exprime la rentabilité de l'entreprise en fonction de son volume d'activité. La rentabilité commerciale se calcule de la manière suivante :

$$\text{Rentabilité commerciale} = (\text{Résultat net} \times 100) / \text{Chiffre d'affaire.}$$

Elle détermine alors le taux de marge de l'entreprise, qui permet d'estimer le résultat futur de l'entreprise en fonction de la variation de son volume d'activité mesuré par le chiffre d'affaire.

Elle est négative pendant les deux premières années de production. Toutefois, elle est intéressante car elle évolue de 5 à 35% dès la troisième à la sixième année de production où l'on atteint la capacité de production de l'usine de transformation.

### 2.8.2. Taux de rentabilité interne (TRI)

C'est le taux d'intérêt par lequel, la valeur actualisée d'un revenu futur est égale au capital investi.

Il est défini comme étant le taux maximal d'intérêt que peut supporter un projet .Par conséquent, tout projet dont le TRI est supérieur au taux d'intérêt auquel il est financé est rentable. Le TRI peut être déterminé par la formule :

$$I = \sum_{j=1}^6 \frac{CFX_j}{(1+r)^j}$$

**Avec:**

CFX : Cash flow

I : Investissement total initial = 64 313 millions d'ariary

R : taux de rentabilité interne

Donc  $CFX_1/(1+r) + CFX_2/(1+r)^2 + \dots + CFX_6/(1+r)^6 - I = 0$

Posons VAN =  $CFX_1/(1+r) + CFX_2/(1+r)^2 + \dots + CFX_6/(1+r)^6 - I$

Pour  $r = 0,36$  VAN<sup>1</sup> = 1 601 millions ariary

Pour  $r = 0,37$  VAN = - 653 millions ariary

Par extrapolation, on trouve **r = 36,71%**

Le TRI du projet est de 36,71%, largement supérieur aux taux d'intérêt de financement du projet (20% pour l'emprunt à moyen terme et 5% pour le long terme). On peut dire alors que le projet est rentable.

### 2.8.3. Seuils de rentabilité

Le seuil de rentabilité globale du projet s'obtient par la formule :

$$SR = FF / (pu - cuv) ;$$

---

<sup>1</sup> Valeur actuelle nette

avec FF : coûts fixes ;

pu : prix unitaire de vente

cuv : coût unitaire variable

#### 2.8.3.1. Détermination des coûts fixes et variables

Le tableau suivant montre la répartition des coûts fixes et variables, par produit, ainsi que le coût variable unitaire de chaque produit :

**Tableau 76 : Répartition des coûts fixes et variables**

Désignation	Charbon	Sulfate d'ammonium	gaz de ville	Total
Coûts variables (Ar)	8 437 649	323 737	9 755 559	<b>18 516 945</b>
Coûts fixes (Ar)	22 604 999	20 606	1 994 125	<b>24 619 730</b>
Prix de vente unitaire (Ar)	350	1 250	2 200	
<b>Coûts variables unitaires</b>	<b>188</b>	<b>752</b>	<b>735</b>	

Source : Auteur

#### 2.8.3.2. Détermination du prix unitaire de vente moyen

Si on fixe les prix de vente du charbon de terre, du sulfate d'ammonium et du gaz de ville respectivement à 350, 1 250 et 2 200 ariary le kg, par conséquent, le prix de vente moyen de ces produits est de 1 200 ariary.

#### 2.8.3.3. Détermination du coût unitaire variable moyen

On peut déterminer le coût unitaire variable moyen en faisant la moyenne des coûts unitaires variables de chaque produit du tableau ci-dessus.

Ainsi ; le coût unitaire variable moyen est de  $(188 + 752 + 735)/3$ , soit 558 ariary.

#### 2.8.3.4. Seuils de rentabilité globaux

Le seuil de rentabilité physique global du projet est de :

$$24\,619\,730\,000 / (1\,267 - 558) = 34\,741 \text{ tonnes}$$

Le seuil de rentabilité financière globale est de :  $34\,741 \times 1\,267 = 44\,006$  millions ariary.

Le seuil de rentabilité sera atteint en 11 mois d'activité, selon la prévision de vente de l'entreprise.

#### 2.8.4. Délai de récupération

Le délai de récupération est la période pendant laquelle l'entreprise récupèrera le capital investi à partir des bénéfices qu'elle a réalisés.

#### 2.8.4.1. *Résultat net cumulé*

**Tableau 77 : Résultat net cumulé pendant les 5 premières années de production**

Désignation	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5
Résultat net	-18 391	-9 953	4 360	22 821	41 966
Résultat net cumulé	-18 391	-28 344	-23 984	-1 163	40 803

Source : Auteur

#### 2.8.4.2. *Bénéfice moyen en cinq années d'activité*

**Bénéfice moyen = (somme des bénéfiques)/Période d'évaluation**

Bénéfice moyen = 8 160 millions ariary/an

#### 2.8.4.3. *Délai de récupération*

**Délai de récupération = Investissements/ Bénéfice moyen**

Délai de récupération =  $64\,314 / 8\,160 = 7,88$

Délai de récupération = 7 ans 10 mois 17 jours

## CONCLUSION

L'évaluation socio-économique et financière du projet confirme l'hypothèse de la CIRAD qui dit que le bois-énergie constitue le principal combustible domestique utilisé par la population de la zone concernée par l'étude du marché. La majorité de la population (86,2%) utilise le charbon de bois, certains combinent les deux formes de bois-énergie, d'où le pourcentage de 36,8% attribué au bois de feu. [12]

Sept communes totalisant une quarantaine de villages sont touchées par la production de bois-énergie à partir des forêts Mikea, Ala Atsinanana, Forêt Ranobe, les mangroves, les arbres fruitiers, en particulier les *kily* situés près des villages.

Le produit qu'on se propose de lancer est nouveau. La brique de charbon de terre sera présentée sur le marché sous forme cylindrique de 4 cm de rayon et 5 cm de hauteur, conditionnée en sac de 1 kg ; 5 kg ,20 kg et 40 kg.

Concernant la stratégie de commercialisation du produit, nous choisirons le système de distribution « indirecte ». L'entreprise utilisera des intermédiaires pour la vente de ses produits (circuit court) car le nombre de clients est trop grand donc l'entreprise ne puisse pas les atteindre tous sans intermédiaires.

En outre, elle sera renforcée par des actions de communication portant à la fois sur des IEC-CCC (Information, éducation, communication ; Communication pour le changement de comportement) touchant l'environnement à l'intention des consommateurs urbains et des producteurs de charbon. Les promotions du produit à travers les médias et les manifestations socio économiques compléteront cette stratégie.

Les consommateurs visés par le produit, par ordre de préférence, sont les établissements de restauration, les ménages de la classe moyenne, puis les ménages de la classe laborieuse.

Concernant l'évaluation financière du projet, l'étude a dégagé des résultats largement positifs. Cela aussi bien pour les comptes de résultats prévisionnels que pour les tableaux de trésorerie prévisionnels

De plus, les divers paramètres nous permettent de confirmer que le projet est rentable financièrement. En effet, pour un investissement initial de 64 313 millions d'ariary :

- Les ratios simple de rentabilité sont tous intéressants et évoluent rapidement, pendant les 6 premières années d'activité.
- Le TRI du projet est de 36,71%. Il est largement supérieur au taux d'emprunt pratiqué par le système bancaire actuel.
- Le délai de récupération des investissements est de 7 ans 10 mois 17 jours.

De tout ce qui précède, l'installation de ce projet est vivement sollicitée pour le développement économique et social de la région Atsimo-Andrefana, qui figure parmi les régions les plus pauvres de notre pays. Cette région regorge pourtant de ressources naturelles minérales abondantes (charbon de terre, pierres précieuses, pierres industrielles...).

**SIXIÈME PARTIE :**  
**ANALYSE ENVIRONNEMENTALE**

Cette partie étudie les préoccupations environnementales du procédé de transformation du charbon de terre de la Sakoa en combustible domestique ainsi que la substitution u charbon de bois et du bois de chauffe par celui-ci.

Ainsi, l'objectif global est de protéger l'Environnement afin de mieux assurer un développement durable de la région d'implantation du projet. Pour ce faire, les objectifs de cette étude sont de :

- fournir un cadre permettant de cerner les enjeux environnementaux rattachés ou influant sur le fonctionnement de l'installation de transformation du charbon de terre en combustibles domestiques. Ce qui facilitera la mise en œuvre des mesures afin que l'installation respecte les dispositions environnementales.
- analyser les enjeux environnementaux et sociaux que pourraient apporter le projet dans la zone d'étude.

Conformément aux objectifs sus-cités, les résultats attendus de l'étude sont les suivants :

- une analyse de la situation environnementale du projet de transformation du charbon de terre de la Sakoa en combustible domestique, vis-à-vis de la réglementation qui met en exergue les problématiques environnementales rencontrées dans les pratiques de gestion de l'environnement.

Cet aspect inclut les préoccupations relatives à la zone d'implantation de l'unité de transformation et intègre l'analyse des pollutions et nuisances induites par les activités de celles-ci sur le milieu environnant ;

- une analyse des enjeux environnementaux et sociaux de l'utilisation du charbon de terre comme combustible et les avantages écologiques générés par le projet (déforestation évitée par la substitution du bois-énergie par les briquettes de charbon de terre) ;
- proposition de mesures de correction ou d'atténuation des impacts négatifs significatifs, permettant à l'unité de transformation d'être conforme à la législation environnementale en vigueur ;

## 1 DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE

La démarche méthodologique adoptée dans le cadre de ce travail est à la fois qualitative et quantitative. Elle consiste à:

- collecter et analyser les informations, données et documents relatifs au projet de transformation du charbon de terre en combustible domestique ;
- estimer et analyser les pratiques de gestion environnementale du projet ;
- déterminer les pollutions et nuisances causées par les activités du projet sur le milieu et les ressources naturelles environnantes ;
- analyser les enjeux socio-environnementaux du projet ;
- proposer des orientations correspondant aux problèmes identifiés pour la prévention des pollutions et des risques.

## 2 ZONE D'IMPLANTATION DE L'USINE DE TRANSFORMATION

Administrativement, le site d'implantation du projet de transformation du charbon de terre de la Sakoa en combustible domestique se trouve dans le fokontany de Soamanonga, commune rurale de Soamanonga, district de Betioky-Sud, région Atsimo andrefana.

Le site d'implantation du projet se situe à 240 km au sud-est de la ville de Toliara.

Le lieu d'implantation du projet se trouve dans la forêt Sakoa. Ainsi, l'usine sera érigée en plein milieu de cette forêt, plus précisément dans le village d'Ankinany.

Le site d'implantation du projet fait partie du bassin versant du fleuve Onilahy, d'une superficie de 32 000 km<sup>2</sup>. Il fait partie du bassin versant ouest, d'une superficie totale de 365 000 km<sup>2</sup>.

## 3 BILAN MATIÈRES DU PROCESSUS DE FABRICATION

Dans ce paragraphe, nous analyserons dans quelle étape du processus de fabrication les *inputs*, les *outputs* et les activités générales de la transformation du charbon de terre en combustible domestique, contribueraient à la dégradation de l'environnement et de la santé humaine.

Le bilan matières du processus de transformation de la houille en combustible domestique est résumé dans le tableau suivant :

**Tableau 78: Bilan matières du processus de transformation du charbon**

INPUT	ÉTAPES DE FABRICATION	OUTPUT
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bloc de charbon de terre</li> <li>- Énergie électrique</li> </ul>	Concassage/ calibrage	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Charbon de terre en grain</li> <li>- Poussières de charbon.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Grains de charbon</li> <li>- Combustible (charbon de terre)</li> </ul>	Cokéfaction	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Semi-coke</li> <li>- Émissions atmosphériques (CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, matières volatiles)</li> <li>- Matières volatiles</li> <li>- Condensât</li> <li>- Cendres</li> </ul>
Eau	Extinction	Rejets liquides
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Semi-coke</li> <li>- Énergie électrique</li> </ul>	Broyage/ calibrage	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Semi-coke en grain</li> <li>- Poussières de charbon</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Semi-coke, féculé, fine de charbon de bois et eau</li> <li>- Énergie électrique</li> <li>- Emballage</li> </ul>	Malaxage, compactage, Conditionnement	Briquettes de charbon conditionnées
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Matières volatiles</li> </ul>	Condensation	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gaz de houille</li> <li>- H<sub>2</sub>S, CO, C<sub>2</sub>N<sub>2</sub>, HCN</li> <li>- Eaux ammoniacales</li> <li>- Goudrons</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Eaux ammoniacales</li> <li>- Chaux</li> <li>- Acide sulfurique</li> </ul>	Attaque/ Absorption	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sulfate d'ammonium</li> </ul>
Goudrons	Distillation fractionnée	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Huiles légères (Benzol, aniline)</li> <li>- Huiles de densité moyenne (naphtalène, phénol)</li> <li>- Huiles lourdes (huiles à naphtalène, bitume, anthracène)</li> <li>- Brais de goudron</li> </ul>
Bois	Coupe, carbonisation	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Émissions atmosphériques (CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, matières volatiles)</li> <li>- Charbon de bois</li> </ul>
Charbon de bois	Broyage	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Poussières de charbon</li> <li>- Fine de charbon de bois</li> </ul>

Source : Auteur

Le tableau montre que les nuisances potentielles directes causées par le projet sur l'environnement et la santé humaine sont les émissions gazeuses (CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, H<sub>2</sub>S, C<sub>2</sub>N<sub>2</sub>, HCN) ; les poussières, les bruits des matériels/équipements et les rejets liquides, la déforestation due à l'utilisation du charbon de bois.

Les produits obtenus à la fin du processus de transformation sont les briquettes de charbon, le goudron, les huiles légères, moyennes et lourdes, le sulfate d'ammonium et le gaz de ville.

Les briquettes de charbon constituent le produit principal. Le goudron, les matières huileuses, le sulfate d'ammonium et le gaz de ville, constituent les sous-produits ou produits secondaires.

Ainsi, en partant avec une tonne de charbon de terre (à transformer), on pourrait obtenir à la fin du processus de transformation (cf. 3<sup>e</sup> partie du travail) :

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

#### 4 NUISANCES GÉNÉRÉES PAR LE PROCESSUS DE TRANSFORMATION

Les nuisances générées par le processus de transformation du charbon de terre en combustible domestique sont :

- les poussières de charbon de terre ;
- les émissions atmosphériques (CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, H<sub>2</sub>S, C<sub>2</sub>N<sub>2</sub>, HCN). Les composés toxiques tels que H<sub>2</sub>S, C<sub>2</sub>N<sub>2</sub>, HCN sont dangereux pour la santé ;
- les rejets liquides ;
- les cendres ;
- les poussières de charbon de bois ;
- le bruit ;
- la déforestation ;

#### 5 IDENTIFICATION DES IMPACTS DU PROCESSUS DE TRANSFORMATION SUR L'ENVIRONNEMENT

Ce paragraphe traite de l'identification des impacts générés par les activités de l'usine de transformation de la houille en combustible domestique, y compris le fonctionnement de l'usine et les habitations du personnel. Les impacts de ces opérations peuvent être temporaires (limités à la durée d'une opération ponctuelle ou se prolongeant peu de temps après), se prolonger pendant toute la durée de vie de l'usine, ou permanent (irréversibles ou à longue rémanence après les travaux).

##### 5.1. Impacts sur le milieu physique

###### 5.1.1 *Impacts sur les ressources en eau*

Les rejets liquides issus du processus de transformation de la houille en combustible domestique pourraient affecter la qualité des ressources en eau de la zone (eaux de surface ou eaux souterraines).

Les sources d'impacts seront les charges polluantes des rejets (MES, DCO, DBO...).

### **5.1.2 Impact sur le sol**

L'impact des activités de l'usine de transformation du charbon en combustible domestique sur le sol sera la pollution/contamination par les huiles et graisses diverses issus des matériels et équipements, ainsi que par les charges polluantes des rejets liquides.

### **5.1.3 Impact sur l'atmosphère**

L'impact sur l'atmosphère des activités de l'usine de transformation de la houille en combustible domestique sera la pollution de l'air par :

- les gaz d'échappement des matériels roulants : les émissions seront dues à la combustion des carburants. Ainsi, les émissions seront constituées de CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub> et NO<sub>x</sub>;
- les gaz d'échappement du groupe électrogène qui assure la fourniture en électricité des zones d'habitation et le fonctionnement de l'usine : les émissions sont dues à la combustion de charbon de terre. Elles seront constituées de CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub> et NO<sub>x</sub>;
- les gaz émises lors de la cokéfaction de la houille : les émissions seront dues à l'évaporation des matières volatiles. Elles seront constituées de H<sub>2</sub>S, CO, C<sub>2</sub>N<sub>2</sub> et HCN ;
- les émissions atmosphériques dues à la combustion du charbon de terre dans le four de cokéfaction. Elles seront constituées de CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, et NO<sub>x</sub>;
- les émissions atmosphériques dues à la fabrication de fine de charbon de bois ;
- les poussières : les émissions seront dues :
  - o au concassage du charbon,
  - o au passage des véhicules en période sèche.

Ainsi, ces émissions peuvent polluer l'air de la région.

## **5.2 Impacts sur le milieu biologique**



**Photo 11 : Vue partielle de la forêt Sakoa en période sèche**

Les impacts de la transformation du charbon de terre sur le milieu biologique seront :

### 5.2.1. L'augmentation des pressions sur les ressources naturelles environnantes

Les sources d'impacts seront :

- la fourniture de bois divers ;
- la présence des employés ;
- la fourniture de bois-énergie pour la production de fine de charbon de bois.

### 5.2.2. Les dégradations diverses des écosystèmes aquatique et terrestre

Les sources d'impacts seront :

- les rejets liquides issus de l'usine de transformation et des habitations du personnel ;
- les fuites d'huiles et carburants des véhicules de l'entreprise ;
- les déchets ménagers du personnel ;
- les huiles de vidange ;
- La fourniture de bois-énergie pour la fabrication de fine de charbon de bois.

### 5.2.3. La disparition ou déplacement des individus (Faune)

Les sources d'impacts seront les nuisances causées par les activités de l'usine de transformation du charbon telles que :

- les bruits divers issus des matériels et équipements ;
- les émissions atmosphériques (citées ci-dessus).

### 5.2.4 La déforestation

La source d'impact est l'utilisation de fine de charbon de bois dans le processus de transformation du charbon de terre en combustible domestique. La poudre de charbon de bois représente 15% du produit final. Le besoin en charbon de bois du processus de production, ainsi que l'équivalent en forêt de la fine de charbon de bois pendant les 10 premières années sont donnés dans le tableau suivant :

**Tableau 79 : Equivalent en forêt des fines de charbon de bois**

Désignation	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5	Année 6	Année 7	Année 8	Année 9	Année 10
Fine de charbon de bois (t)	6 750	8 475	11 963	16 950	22 500	33 450	34 725	34 725	34 725	34 725
Équivalent en forêt (ha)	781	981	1 385	1 962	2 604	3 872	4 019	4 019	4 019	4 019

Source : Auteur

À titre indicatif, la consommation en bois-énergie de Toliara I, II ; Betioky et Soamanonga et son équivalent en forêt sont donnés dans le tableau suivant :

**Tableau 80 : Consommation en bois-énergie de Toliara, Betioky et Soamanonga**

Désignation	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Consommation de bois-énergie dans la province de Toliary (t)	557 546	573 602	590 108	606 835	624 007	638 407
Équivalent en forêt des bois-énergies consommés par Toliary (ha)	9 680	9 958	10 245	10 535	10 833	11 083

Source : Auteur

### **5.3 Impacts sur le milieu humain**

Les activités de l'usine de transformation de la houille en combustible domestique peuvent causer des nuisances et des pollutions sur la population par :

#### **5.3.1. Le bruit**

Le niveau de bruit issu des matériels de transport de l'usine, des matériels et équipements de transformation (concasseur, broyeur...), ainsi que le groupe électrogène peut entraîner des nuisances au niveau de la population environnante et du personnel.

Le bruit peut affecter du système auditif. La nuisance est fonction de la durée d'exposition quotidienne et du niveau atteint.

#### **5.3.2. Les rejets atmosphériques**

Les rejets atmosphériques issus du processus de transformation de la houille en combustible domestique cités ci-dessus peuvent affecter la santé de la population environnante et du personnel.

- Les rejets atmosphériques tels que les CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, et NO<sub>x</sub> peuvent causer des affections respiratoires et des irritations oculaires.
- Les émissions atmosphériques telles que de H<sub>2</sub>S, CO, C<sub>2</sub>N<sub>2</sub>, HCN sont très toxiques. Elles représentent un danger pour la population environnante et le personnel.

#### **5.3.3. Les déchets solides**

Les déchets solides issus du processus de transformation de la houille en combustible domestique seront constitués par :

- o les cendres d'incinération du charbon de terre,
- o les fines de charbon de terre issues du broyeur/calibreur qui ne conviennent pas à la cokéfaction ;
- o les déchets solides issus des ménages des cités ;
- o les déchets solides assimilables aux ordures ménagères issus de l'usine de transformation (papier, carton, plastique...).

Les cendres d'incinération représentent 17 à 32% du charbon de terre selon les couches. En moyenne, elles seront de l'ordre de 25% du charbon incinéré. Elles proviendront de la centrale thermique et du four à coke.

Le tableau suivant donne la production de cendres de l'usine pendant les dix premières années de production :

**Tableau 81 : Production de cendres du projet**

Désignation	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5	Année 6	Année 7	Année 8	Année 9	Année 10
Cendres issues de la centrale (t)	3 675	3 675	3 675	3 675	3 675	3 675	3 675	3 675	3 675	3 675
Cendres issues du four (t)	2 370	2 975	4 200	5 950	7 900	11 745	12 192	12 192	12 192	12 192
<b>TOTAL</b>	<b>6 045</b>	<b>6 650</b>	<b>7 875</b>	<b>9 625</b>	<b>11 575</b>	<b>15 420</b>	<b>15 867</b>	<b>15 867</b>	<b>15 867</b>	<b>15 867</b>

Source : Auteur

Les fines de charbon de terre qui ne conviennent pas à la cokéfaction représentent 3% du charbon concassé (avant la cokéfaction).

Le tableau suivant donne la production de fine de charbon de terre de l'usine pendant les dix premières années de production :

**Tableau 82 : Production de fine de charbon de terre du processus de transformation**

Désignation	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5	Année 6	Année 7	Année 8	Année 9	Année 10
Fines de charbon de terre (t)	1.422	1.841	2.598	3.681	4.887	7.265	7.542	7.542	7.542	7.542

Source : Auteur

Les cendres et les fines de charbon génèrent des nuisances sur la population environnante. Les poussières peuvent affecter les voies respiratoires.

#### **5.3.4. Les déchets solides ménagers**

Les déchets solides ménagers issus des habitations du personnel de l'usine de transformation, pourront affecter la qualité de l'environnement de la zone.

Ils provoquent des odeurs nauséabondes s'ils sont mal gérés. La quantité produite est estimée à 0,3kg/personne/jour, en moyenne (selon l'étude effectuée à Tanjombato en 1997), soit 60 tonnes par an.

Les déchets solides issus des divers bureaux peuvent créer une pollution visuelle dans la zone. Ils seront constitués par le papier, le carton, les emballages divers, les objets en plastique...

## 6. RÉCAPITULATION DES IMPACTS POTENTIELS IDENTIFIÉS

Les impacts potentiels du processus de transformation du charbon de terre en combustible domestique identifiés sont résumés dans le tableau suivant :

**Tableau 83 : Impacts potentiels identifiés de la transformation du charbon de la Sakoa**

Composantes de l'environnement affectées	Sources d'impacts	Impacts
<b>Air/atmosphère</b>	Gaz d'échappement des véhicules et engins	Pollution de l'air
	Rejets atmosphériques issus du processus de transformation	
	Poussières diverses	
<b>Milieu biologique (faune et flore)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Fourniture de bois divers</li> <li>○ Présence des employés</li> </ul>	Augmentation des pressions sur les ressources naturelles environnantes
	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Les bruits divers</li> <li>○ Les émissions atmosphériques diverses</li> <li>○ Les rejets liquides</li> </ul>	Disparition de certaines espèces / Réduction du nombre d'espèces de flore
		Disparition ou déplacement des individus (Faune)
	Pollutions diverses (matières fécales, rejets liquides, déchets solides, émissions atmosphériques, rejets d'huiles et de graisse)	Dégradation diverses des écosystèmes aquatique et terrestre
<b>Population</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Véhicules</li> <li>○ Groupe électrogène</li> <li>○ Activité de l'usine</li> </ul>	Bruit et pollution de l'air qui entraîne des altérations de la santé
	Déchets solides : cendres d'incinération et fine de charbon de terre, déchets solides ménagers	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Altération de la santé</li> <li>○ Nuisances dues à l'odeur</li> </ul>

Source : Auteur

## 7 ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX ET SOCIAUX DU PROJET

Après analyse de la situation et consultation des futurs utilisateurs des briquettes de charbon de terre (cf 4<sup>e</sup> partie du travail), les principaux enjeux environnementaux identifiés sont les suivants :

- l'utilisation des briquettes de charbon de terre comme combustible domestique ;
- l'utilisation du charbon de terre comme combustible du four à coke et de la centrale thermique ;
- le bénéfice écologique généré par le projet (la déforestation évitée par la substitution du charbon de bois et du bois de chauffe par les briquettes de charbon de terre) ;
- Biodiversité et processus écologique ;

- la réduction des gaz à effet de serre par la séquestration de ceux-ci par les forêts économisées.

### 7.1. Analyse des risques sur l'utilisation des briquettes de charbon de terre comme combustible domestique

Dans ce paragraphe, nous essayons d'analyser dans quelle mesure l'utilisation des briquettes de charbon contribue à la dégradation de l'environnement et de la santé humaine.

L'analyse consiste à évaluer les risques dus à la teneur en matières volatiles, du soufre et des matières radioactives des briquettes sur la santé humaine et sur l'environnement.

En effet, les briquettes obtenues à la fin du processus de transformation seront vendues aux ménages et établissements de restauration afin d'être utilisées comme combustible domestique. Il est donc important de déterminer les risques que peuvent générer l'utilisation de celles-ci sur la santé humaine.

Pour déterminer les risques pouvant être générés par l'utilisation des briquettes sur la santé humaine et sur l'environnement, nous avons effectué l'analyse physico-chimique des échantillons de briquettes de charbon dans le laboratoire de l'OMNIS. Les paramètres relevés sont la densité, l'humidité, la teneur en matières volatiles, la teneur en cendres, la teneur en carbone fixe et le pouvoir calorifique. Le résultat de l'analyse est donné dans le tableau suivant :

**Tableau 84 : Caractéristiques physico-chimiques des briquettes**

Paramètres	Coke+ liant + fine de charbon de bois
Densité	1,44
Humidité (%)	0,77
Teneur en matières volatiles (%)	12,31
Teneur en cendres (%)	23,46
Carbone fixe (%)	63,46
Pouvoir calorifique (kcal/kg)	6 607

Source : Laboratoire de l'OMNIS 2007

La teneur en matières volatiles des briquettes est de 12,31%, alors que celle du charbon de terre est de 25% (en moyenne). Les tests d'acceptabilité effectués auprès des utilisateurs ont montré un dégagement de fumée et d'odeur pendant l'allumage du feu et en début de cuisson. Puis, la fumée se dissipe quand la température d'ignition est atteinte.

Pour cela, nous recommandons d'effectuer l'allumage du feu et le début de cuisson à l'extérieur de la maison.

La teneur en cendres des briquettes est élevée (23,46%), c'est pourquoi nous avons effectué aussi l'analyse chimique de celles-ci afin de déterminer les caractéristiques des cendres et leur teneur en métaux lourds, dans le laboratoire de pédologie de la FOFIFA. Le résultat de l'analyse est donné dans le tableau suivant :

**Tableau 85 : Teneur en métaux lourds des cendres d'incinération des briquettes**

Paramètres	Plomb	Chrome	Cuivre	SiO <sub>2</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Teneur (%)	0,0	3,4.10 <sup>-4</sup>	3,0.10 <sup>-4</sup>	41,0	26,7	5,12	19,8

Source : Laboratoire Fofifa Tsimbazaza 2007

Le tableau montre que :

- les constituants principaux des cendres sont la silice (SiO<sub>2</sub>), la chaux (CaO), l'oxyde ferrique (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et l'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>);
- les cendres ne contiennent pas de plomb. La teneur en chrome et en cuivre est extrêmement faible. Elle de l'ordre de 0,0003%.

Par conséquent, même si la teneur en cendres des briquettes est élevée, ils ne généreront pas de nuisance ni sur la santé humaine ni sur l'environnement. La mise en décharge des cendres d'incinération des briquettes ne présente pas de risque majeur pour l'environnement.

## 7.2. Analyse de la radioactivité du charbon de terre [21]

Chaque tonne de charbon pourrait contenir, selon son origine, entre 1 et 10 g d'uranium et environ 2,5 fois de thorium (selon la bibliographie). La radioactivité du charbon peut avoir un impact sur la santé des employés qui l'utilisent dans le four à coke et la centrale thermique. Nous avons mesurée celle du charbon de terre dans le laboratoire de l'INSTN. Le résultat de cette analyse est reporté dans le tableau suivant :

**Tableau 86 : Teneur en matières radioactives du charbon de terre**

Famille	Radionucléide	Activité (Bq/kg)
K-40	K-40	57 ± 12
Th-232	Ac-228	18 ± 2
	Pb-212	15 ± 1
	Tl-208	15 ± 2
U-238	Pb-214	12 ± 1
	Bi-214	11 ± 1
Radionucléide artificiel	Cs-137	<2

Source : Laboratoire de l'INSTN

Le résultat d'analyse montre que l'échantillon présente un niveau normal de radioactivité. (Cf. rapport d'analyse en annexe 7)

## 7.3. Économie de forêt (Déforestation évitée)

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.

Pour confirmer cette hypothèse, nous évaluerons, dans ce paragraphe, l'impact de la substitution des combustibles ligneux par les briquettes de charbon de terre.

### **7.3.1. Méthode d'évaluation**

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.

### **7.3.2. Équivalent en charbon de bois des briquettes**

#### *7.3.2.1. Pouvoir calorifique du charbon de bois [22]*

Le pouvoir calorifique du charbon de bois est fonction de la nature et de l'âge du bois, ainsi que de sa teneur en eau. Il peut varier de 4 500 à 7 500 kcal/kg. À titre d'exemple, le pouvoir calorifique du charbon de bois est de 6 937 kcal/kg pour une teneur en eau de 5% (d'après les écritures).

Cependant, les mesures effectuées au laboratoire de l'Omnis, dans le cadre du projet « MAG 087, Promotion des matériaux locaux de construction », ont montré que le pouvoir calorifique moyen du charbon de bois à Madagascar est de 5 000 kcal/kg. C'est cette valeur qui sera prise en compte tout au long de cette étude.

#### *7.3.2.2. Pouvoir calorifique du semi-coke et des briquettes*

Le coke ou semi-coke est un solide poreux à fort pouvoir calorifique. Les mesures effectuées auprès du laboratoire de l'OMNIS ont montré que :

- le pouvoir calorifique du semi-coke obtenu au cours des essais de cokéfaction est de l'ordre de 7 000 kcal/kg ;
- le pouvoir calorifique des briquettes obtenues avec du liant à base de féculé de manioc est de 6 670 kcal/kg ;
- le pouvoir calorifique des briquettes de charbon obtenues avec du liant à base de féculé de manioc et de fine de charbon de bois à 15% est de 6 607 kcal/kg.

On constate la diminution du pouvoir calorifique des briquettes de charbon après addition de fine charbon de bois. Ainsi, la valeur du pouvoir calorifique des briquettes que l'on va prendre en compte le long de cette étude est de 6 607 kcal/kg.

### 7.3.2.3. Équivalent en charbon de bois des briquettes

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  $6\ 600/4\ 500 = 1,47$ , c'est-à-dire qu'une tonne de briquettes équivaut à 1,47 tonne de charbon de bois. Le tableau suivant montre l'équivalent en charbon de bois des briquettes de charbon de terre produites pendant les dix premières années de production :

**Tableau 87 : 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
Brique de charbon de terre (t)	45 000	56 500	79 750	113 000	150 000	223 000	231 500	231 500	231 500	231 500
Équivalent en charbon de bois (t)	66 070	82 955	117.091	165.909	220.233	327.414	339.893	339.893	339.893	339.893

Source : Auteur

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.

### 7.3.3. Équivalent en biomasse verte des briquettes de charbon

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 suivant montre le résultat de la conversion :

**Tableau 88 : 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 (x1 000 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.

### 7.3.4. Superficie des forêts conservées [12]

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 (Étude CIRAD, en 2001). Le résultat de la conversion est donné dans le tableau suivant :

**Tableau 89 : 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

Source : Auteur

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.[23]

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

### 7.4. Biodiversité et processus écologique

L'utilisation du bois-énergie et de la féculé de manioc dans le processus de fabrication de briquettes de charbon de terre peut entraîner des impacts négatifs significatifs sur le système écologique environnant. En effet, le besoin en bois-énergie du projet pendant les 7 premières années de fabrication de briquettes de charbon de terre est évalué à 134 813 tonnes de biomasse verte, soit 2 340ha de forêt ; la fourniture en féculé de manioc du projet est estimée à 2 700 tonnes pour les premières années de production pour arriver à 13 890 tonnes une fois la capacité de production de l'usine atteinte, soit l'équivalent respectivement de 9 000 tonnes (pour 1 800 ha) et 46 300 tonnes de manioc (pour 9 260 ha).

Pourtant, l'étude de faisabilité effectuée par l'équipe du CNRIT et les tests d'acceptabilité effectués auprès des utilisateurs des briquettes de charbon de terre ont montré la nécessité d'inclure les fines de charbon de bois et la féculé de manioc dans le procédé de fabrication afin

d'améliorer l'inflammabilité et la cohésion du produit fini et de réduire son pouvoir calorifique. En effet, le pouvoir calorifique élevé du semi-coke (7 000 kcal/kg) pourrait accélérer l'usure des matériels de cuisson.

Ainsi, pour atténuer les impacts de l'utilisation de fine de charbon de bois dans le processus de fabrication des briquettes de charbon de terre, nous suggérons d'utiliser le produit d'élagage des arbres de la forêt environnante pour la production de fine de charbon de bois.

En effet, le District de Betioky-Atsimo dispose de 318 952ha de forêts exploitables pour la production de bois d'œuvre et de bois-énergie (selon la monographie du service de cantonnement de Betioky-Sud). Elles se trouvent dans la commune de : Betioky-Atsimo, Tameantsoa, Beantake, Masiaboay, Antohabato, Beavoha, Lazarivo, Bezaha, Tongobory, Tatolatsaka, Andranoka, Manalobe, Saloba, Belamoty, Montifeno et Tanambao. Le produit d'élagage est évalué à 5% de l'arbre tout entier. Ainsi, l'élagage de ces forêts produirait 988 582 tonnes de biomasse, largement supérieure au besoin du processus de fabrication (134 813 tonnes, soit 0,73% des produits d'élagage de la biomasse verte de la forêt exploitable) pendant les sept premières années de production (pendant la plantation dès la phase d'installation du projet et le développement des arbres à croissance rapide).

L'utilisation de fécula de manioc dans le processus de fabrication des briquettes de charbon de terre nécessite l'aménagement de nouveau terrain. L'évolution de la superficie des terrains à aménager est donnée dans le tableau suivant :

**Tableau 90 : Superficie occupée par la culture de manioc**

Désignation	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5	Année 6	Année 7
<b>Terrain à aménager (ha)</b>	1 800	2 260	3 190	4 520	6 000	8 920	9 260

Source : Auteur

## **7.5. Bilan d'émission/séquestration de GES du projet [24]**

Les émissions de gaz à effet de serre (GES) d'origine anthropique ne cessent de croître. Les océans et la végétation ne sont plus en mesure de les absorber suffisamment vite. Aussi, la teneur de ces gaz dans l'atmosphère ne cesse d'augmenter. Cette évolution fait craindre, selon les physiciens spécialistes des questions atmosphériques, une élévation de la température, de l'ordre de 0,3°C par décennie, une remontée du niveau de la mer et une modification des climats, notamment de l'intensité ou de la fréquence des sécheresses et des cyclones.

L'exploitation et la transformation du charbon de terre de la Sakoa n'échappent pas à la règle car elles émettent des GES. Toutefois, les forêts ainsi conservées par la substitution du bois-énergie par les briquettes de charbon de terre pourraient séquestrer des GES.

Ce paragraphe traitera alors du bilan d'émission/séquestration des GES du projet.

### **7.5.1. Méthode d'évaluation**

Elle consiste à :

- évaluer les quantités de combustibles consommées par le projet ;
- déterminer les facteurs d'émission de carbone de chaque combustible ;
- estimer les émissions de carbone générées par les activités du projet ;
- déterminer le facteur de séquestration de carbone des forêts préservées ;
- évaluer la capacité de séquestration de carbone des forêts préservées par le projet ;
- faire le bilan de séquestration/émission de carbone du projet.

## **7.5.2. Évaluation de la quantité de combustibles consommés par le projet**

### *7.5.2.1. Briquettes de charbon de terre*

Le projet envisage de produire 45 000 tonnes de briquettes de charbon de terre pendant la première année de production. La capacité de transformation de l'usine, évaluée à 231 000 tonnes par an sera atteinte à la septième année de production.

### *7.5.2.2. Houille ou charbon de terre brut*

La production d'électricité par la centrale thermique à charbon nécessite la combustion de charbon de terre. Ainsi, la centrale thermique consomme 10 700 tonnes de charbon de terre par an pour une production de 4,5 MW d'énergie électrique.

La cokéfaction de la houille s'effectue à haute température. Elle nécessite aussi la combustion du charbon de terre.

Le tableau suivant donne l'évaluation de la consommation de combustible en charbon de terre du projet :

**Tableau 91 : Consommation de combustible en charbon de terre du projet**

DÉSIGNATION	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5	Année 6	Année 7	Année 8	Année 9	Année 10
Centrale thermique (t)	14.700	14.700	14.700	14.700	14.700	14.700	14.700	14.700	14.700	14.700
Four à coke (t)	9.480	11.903	16.801	23.805	31.600	46.979	48.769	48.769	48.769	48.769
TOTAL	24.180	26.603	31.501	38.505	46.300	61.679	63.469	63.469	63.469	63.469

Source : Auteur

### *7.5.2.3. Carburants*

Pour faire fonctionner les matériels roulants, on utilise des carburants tels que le gazole et l'essence. La quantité consommée est donnée dans le tableau suivant :

**Tableau 92 : Consommation en carburant du projet**

DÉSIGNATION	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5	Année 6	Année 7	Année 8	Année 9	Année 10
Carburant (t)	26	32	45	64	85	126	131	131	131	131

Source : Auteur

### **7.5.3. Facteur d'émission de carbone des combustibles [24]**

#### *7.5.3.1. Briquettes de charbon de terre*

La matière principale constituante des briquettes est le semi-coke. Selon la bibliographie, le facteur d'émission de carbone de la coke est de 2 937kg de CO<sub>2</sub>/ t. [15]

#### *7.5.3.2. Houille*

Le facteur d'émission de carbone de la houille est de l'ordre de 2 567 kg de CO<sub>2</sub>/ t, d'après la bibliographie. [15]

#### *7.5.3.3. Carburants*

Le facteur d'émission de carbone des carburants (essence ou gazole) est de 3 248 kg de CO<sub>2</sub>/ t. [15]

### **7.5.4. Émissions de carbone, générées par le projet**

La formule utilisée pour estimer l'émission de carbone de chaque combustible est :

$$\text{Émission de CO}_2 = \text{Facteur d'émission de CO}_2 \times \text{Quantité de combustible consommée}$$

#### *7.5.4.1. Émissions de CO<sub>2</sub> des briquettes*

Le tableau suivant donne les émissions de CO<sub>2</sub> des briquettes pendant les dix premières années de production :

**Tableau 93 : Émission de CO<sub>2</sub> des briquettes pendant les dix premières années d'activité**

DÉSIGNATION	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5	Année 6	Année 7	Année 8	Année 9	Année 10
Brique de charbon de terre (t)	45 000	56 500	79 750	113 000	150 000	223 000	231 500	231 500	231 500	231 500
Émissions de CO <sub>2</sub> des briquettes (t)	132 165	165 941	234 226	331 881	440 550	654 951	679 916	679 916	679 916	679 916

Source : Auteur

#### 7.5.4.2. Émissions de CO<sub>2</sub> de la combustion de la houille

Les émissions de CO<sub>2</sub> dues à la combustion de la houille pendant les dix premières années de production sont les suivantes :

**Tableau 94 : Émissions de CO<sub>2</sub> de la combustion de la houille**

DÉSIGNATION	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5	Année 6	Année 7	Année 8	Année 9	Année 10
Consommation de houille (t)	24.180	26.603	31.501	38.505	9300	61.679	63.469	63.469	63.469	63.469
Émission de CO <sub>2</sub> de la houille (t)	62.070	68.289	80.862	98.843	118.852	158.329	162.926	162.926	162.926	162.926

Source : Auteur

#### 7.5.4.3. Émissions de CO<sub>2</sub> des carburants

Les émissions de CO<sub>2</sub> des carburants pendant les dix premières années de production sont données dans le tableau suivant :

**Tableau 95 : Émissions de CO<sub>2</sub> des carburants**

DÉSIGNATION	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5	Année 6	Année 7	Année 8	Année 9	Année 10
Carburant consommé (t)	26	32	45	64	85	126	131	131	131	131
Émissions de CO <sub>2</sub> des carburants (t)	83	104	147	208	276	410	426	426	426	426

Source : Auteur

#### 7.5.4.4. Émissions de CO<sub>2</sub> de la production de fine de charbon de bois

Les émissions de CO<sub>2</sub> de la fabrication de fine de charbon de bois pendant les 10 premières années de production seront :

**Tableau 96 : Emissions de CO<sub>2</sub> de la fabrication de fine de charbon de bois**

DÉSIGNATION	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5	Année 6	Année 7	Année 8	Année 9	Année 10
Bois consommé (t)	45 000	56 500	79 750	113 000	150 000	223 000	231 500	231 500	231 500	231 500
Émission de CO <sub>2</sub> de la carbonisation (t)	34 200	42 940	60 610	85 880	114 000	169 480	175 940	175 940	175 940	175 940

Source : Auteur

#### 7.5.4.5. Émissions totales de CO<sub>2</sub> du projet

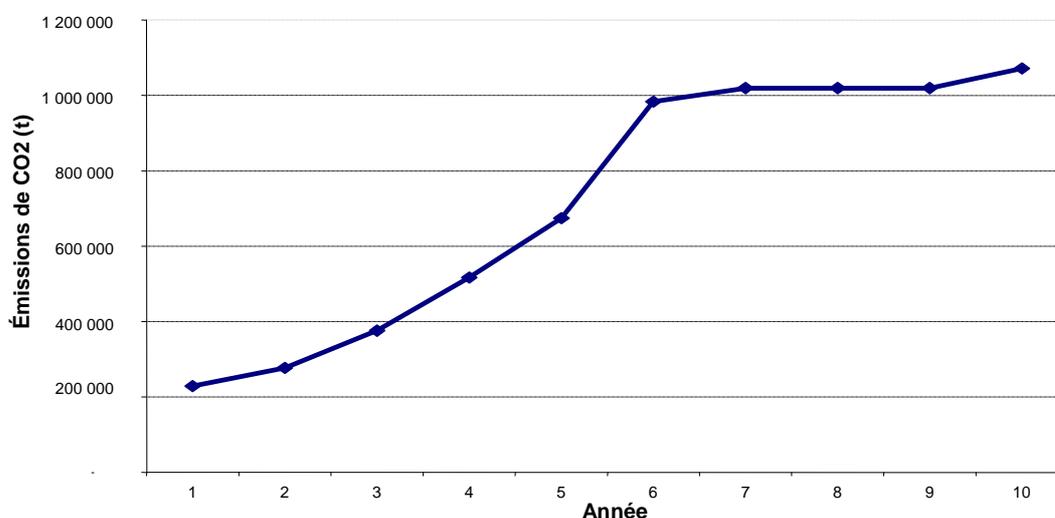
Les émissions totales de CO<sub>2</sub> du projet pendant les 10 premières années de production sont l'ensemble des émissions citées ci-dessus. Le tableau suivant montre les émissions de CO<sub>2</sub> du projet pendant les dix premières années de production :

**Tableau 97 : Émission totales de CO<sub>2</sub> du projet**

DÉSIGNATION	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5	Année 6	Année 7	Année 8	Année 9	Année 10
Émissions de CO <sub>2</sub> des briquettes (t)	132 165	165 941	234 226	331 881	440 550	654 951	679 916	679 916	679 916	679 916
Émission de CO <sub>2</sub> de la houille (t)	62 070	68 289	80 862	98 843	118 852	158 329	162 926	162 926	162 926	162 926
Émission de CO <sub>2</sub> des carburants (t)	83	104	147	208	276	410	426	426	426	426
Émission de CO <sub>2</sub> de la carbonisation (t)	34 200	42 940	60 610	85 880	114 000	169 480	175 940	175 940	175 940	175 940
<b>Émissions totales de CO<sub>2</sub> du projet (x1000.t)</b>	<b>228</b>	<b>277</b>	<b>376</b>	<b>517</b>	<b>673</b>	<b>983</b>	<b>1 019</b>	<b>1 019</b>	<b>1 019</b>	<b>1 071</b>
<b>Émissions totales cumulées de CO<sub>2</sub> du projet (x1 000.t)</b>	<b>228</b>	<b>506</b>	<b>882</b>	<b>1 398</b>	<b>2 072</b>	<b>3 055</b>	<b>4 075</b>	<b>5 094</b>	<b>6 113</b>	<b>7 186</b>

Source : Auteur

Le graphique suivant montre l'évolution des émissions de CO<sub>2</sub> du projet pendant les dix premières années de production.



**Figure 22 : Évolution des émissions de CO<sub>2</sub> du projet**

Les émissions totales de GES du projet pendant les dix premières années de production sont estimées à 7 186 000 tonnes d'équivalent en CO<sub>2</sub>.

Les émissions de GES de la transformation de la réserve exploitable de charbon de terre (170 millions de tonnes) sont évaluées à 534 793 000 tonnes d'équivalent en CO<sub>2</sub>.

### **7.5.5. Facteur de séquestration de carbone des forêts préservées [24]**

Le facteur de séquestration de carbone des forêts conservées par la substitution du bois-énergie par les briquettes de charbon de terre, est de 28,76 tonnes de CO<sub>2</sub> par hectare de forêt par an. [24]

### **7.5.6. Capacité de séquestration de carbone des forêts préservées**

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

**Tableau 98 : 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/an)	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 (x1 000t de CO <sub>2</sub> )	278	349	492	697	926	1 376	1 429	1 429	1 429	1 429
Capacité de séquestration cumulée des forêts conservées (x1 000 t de CO <sub>2</sub> )	278	627	1 119	1 816	2 742	4 118	5 547	6 976	8 405	9 834

Source : Auteur

La capacité de séquestration de GES des forêts préservées en dix ans d'activité est estimée à 9 834 000 tonnes d'équivalent en CO<sub>2</sub>.

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 CO<sub>2</sub>.

### **7.5.7. Bilan de séquestration/émissions de carbone du projet**

Le bilan de séquestration/émissions de carbone du projet est la différence entre la capacité de séquestration et les émissions totales de carbones des activités du projet. Le tableau suivant montre le bilan de séquestration/émissions de carbone du projet :

**Tableau 99 : Bilan d'émissions/séquestration de carbone du projet**

DÉSIGNATION	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5	Année 6	Année 7	Année 8	Année 9	Année 10
Capacité de séquestration des forêts conservées (x1.000 t de CO <sub>2</sub> )	278	349	492	697	926	1 376	1 429	1 429	1 429	1 429
Emissions totales GES du projet (x1 000 t)	228	277	376	517	673	983	1 019	1 019	1 019	1 071
<b>Bilan de séquestration/émission de GES (x1 000t)</b>	<b>50</b>	<b>72</b>	<b>116</b>	<b>180</b>	<b>253</b>	<b>393</b>	<b>410</b>	<b>410</b>	<b>410</b>	<b>410</b>
<b>Bilan cumulé de séquestration/émission de GES (x1 000.t)</b>	<b>50</b>	<b>122</b>	<b>238</b>	<b>418</b>	<b>671</b>	<b>1 064</b>	<b>1 474</b>	<b>1 884</b>	<b>2 294</b>	<b>2 704</b>

Source : Auteur

Le bilan est positif, c'est-à-dire que les émissions de GES du projet sont inférieures à la capacité de séquestration de forêts conservées. Ainsi, les forêts conservées pourraient séquestrer les GES issus des activités anthropiques environnantes. Elles pourraient séquestrer +2 704 000 tonnes d'équivalent en CO<sub>2</sub> de GES issus des activités anthropiques environnantes, en dix ans.

Le bilan total de la transformation de la réserve exploitable de 170 millions de tonnes de charbon de terre est estimé à +240 800 000 tonnes d'équivalent en CO<sub>2</sub>.

## 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 ;

## 8. MESURES D'ATTÉNUATION DES IMPACTS NÉGATIFS ET DE RÉDUCTION DES NUISANCES GÉNÉRÉES PAR LE PROJET

Ce chapitre traite des mesures de correction et d'atténuation des nuisances pouvant être générées par le processus de transformation de la houille en combustible domestique.

### 8.1. Gestion des rejets liquides

Afin d'assurer une meilleure gestion des effluents liquides du processus de transformation de la houille en combustible domestique, on devra mettre en place :

- Une installation de traitement des eaux usées industrielles (rejets liquides de la transformation du charbon de terre en combustible) ;
- Une installation de traitement des rejets liquides domestiques (rejets liquides des cités) et des rejets liquides issus des toilettes, des bureaux et ateliers divers.

### **8.1.1. Dimension de l'installation de traitement des rejets liquides industriels**

Les rejets liquides industriels sont constitués par :

- les rejets de lavage du charbon à utiliser comme combustible de la centrale thermique ;
- les rejets liquides de l'extinction du coke ou semi-coke ;

#### *8.1.1.1. Rejets liquides de lavage du charbon*

Débit à traiter : 30 m<sup>3</sup>/j, soit 1,25 m<sup>3</sup>/h

Les charges polluantes sont constituées, principalement, de matières en suspension, les fines de charbon, et les matières minérales dissoutes.

L'installation de traitement sera constituée de :

- un décanteur de 4,75 m<sup>3</sup> de volume (L = 1,9 m ; l = 0,9 m ; h = 1,5 m) ;
- un lit de sable de 2,5 m<sup>3</sup> ;

#### *8.1.1.2. Rejets liquides de l'extinction du coke*

Débits à traiter : 10 m<sup>3</sup>/j, soit 0,42 m<sup>3</sup>/h ;

La charge polluante est constituée par les matières en suspensions du coke ou semi-coke.

L'installation de traitement sera constituée de :

- un décanteur de 2,5 m<sup>3</sup> de volume (L= 1,9 m ; l = 0,9 m ; h = 1,5 m) ;
- un lit de sable de 1,25 m<sup>3</sup> ;

Les rejets liquides industriels ainsi traités pourront être réutilisés dans le processus de transformation du charbon en combustible domestique pour économiser l'eau (l'eau est rare dans la zone, en période sèche). Le volume recyclable est estimé à 40 m<sup>3</sup> par jour.

### **8.1.2. Dimension de l'installation de traitement des rejets liquides domestiques des cités et des toilettes des bureaux et ateliers divers**

Débits à traiter : 35 m<sup>3</sup>/j, soit 1,46 m<sup>3</sup>/h

Charges polluantes :

- Matières en suspensions ;
- DBO<sub>5</sub> ;

- DCO.

L'installation de traitement sera constituée de :

- un bassin tampon de 15 m<sup>3</sup> ;
- un décanteur primaire de 6 m<sup>3</sup> de volume (L = 2,85 m ; l = 1,4 m ; h = 1,5 m) ;
- un lit bactérien de 11,33 m<sup>3</sup> ;
- un décanteur secondaire de 4 m<sup>3</sup> ;

### **8.1.3. Fonction de chaque élément constituant de l'installation de traitement**

#### *8.1.3.1. Bassin tampon*

Ce bassin assurera l'homogénéisation des rejets avec un temps de séjour de 10 heures environ.

#### *8.1.3.2. Bac de floculation*

D'une manière très simple, la floculation consiste en la formation de particules discrètes et précipitables. Plusieurs substances permettent d'obtenir un tel effet. Dans le cas qui nous concerne, en fonction des matières à floculer, on pourra utiliser du sulfate d'alumine ou du chlorure ferrique, de la chaux ou un mélange des deux produits.

#### *8.1.3.3. Bac de coalescence*

Le coalesceur renforce l'efficacité du flocculateur en assurant la formation de particules plus volumineuses et donc plus décantables.

#### *8.1.3.4. Décanteur primaire*

Il assurera la décantation des floccs formés dans les deux bacs ci-dessus, afin de séparer les matières flocculées et l'eau traitée.

#### *8.1.3.5. Régulateur du pH*

Très souvent, il est nécessaire de réguler le pH, soit pour l'ajuster afin d'obtenir les effets physico-chimiques et/ou biologiques attendus, soit pour mettre les effluents aux normes, avant leur évacuation vers l'extérieur.

#### *8.1.3.6. Bassin de traitement biologique*

Le bassin sera constitué par un lit bactérien. Le lit bactérien est une technique de traitement des eaux usées connue depuis longtemps. Il offre l'avantage d'assurer un système de traitement robuste, peu sensible aux variations de la qualité de l'effluent et d'un traitement de bon niveau des effluents. On peut utiliser du mâchefer comme support bactérien.

#### *8.1.3.7. Décanteur secondaire*

Il assurera l'élimination des boues secondaires, en excès, formées dans le lit bactérien.

#### 8.1.3.8. Bassin de filtration sur lit de sable

Un tel bassin devra assurer une vitesse de filtration suffisante pour le débit de traitement prévu. Il assurera l'élimination des matières en suspension résiduelles.

Le système de décolmatage du filtre de sable sera laissé à l'appréciation du promoteur : opérera-t-il pour un remplacement simple du lit de sable ou pour un système hydraulique ?

#### 8.1.3.9. Filtre à bandes pressantes

Souvent, il est recommandé de disposer d'un filtre à bandes pressantes afin de déshydrater les boues de décantation. En effet, les fosses à boues généralement utilisées donnent parfois de mauvaises surprises (odeurs, efficacité pouvant être médiocre...).

### 8.2. Gestion des rejets atmosphériques

Afin d'atténuer les impacts négatifs des rejets atmosphériques du projet, les dispositions à entreprendre seront :

- l'élimination des gaz toxiques issus de la cokéfaction du charbon de terre ;
- l'atténuation des émissions atmosphériques dues à la combustion du charbon de terre dans la chambre de combustion de la centrale thermique et du four à coke ;
- l'atténuation des émissions de poussières de charbon dues au broyage du charbon de terre et du charbon de bois.

#### 8.2.1. Élimination des gaz toxiques

##### 8.2.1.1. Méthodologie

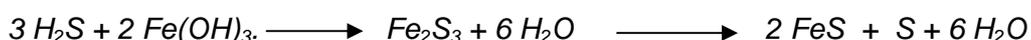
Le bilan du processus de transformation du charbon de terre en combustible domestique montre que la cokéfaction (ou semi-cokéfaction) génère des gaz toxiques tels que H<sub>2</sub>S, C<sub>2</sub>N<sub>2</sub>, HCN et CO, dangereux pour la santé humaine. Ainsi, ils nécessitent un traitement approprié pour les éliminer ou atténuer leur impact sur la santé.

Le traitement consiste à épurer chimiquement les gaz. Le but de l'épuration est de se débarrasser du sulfure d'hydrogène (H<sub>2</sub>S), d'éliminer le cyanogène (C<sub>2</sub>N<sub>2</sub>) et l'acide cyanhydrique (HCN), ainsi que le monoxyde de carbone (CO).

- **Traitement du sulfure d'hydrogène gazeux [39]**

La méthode consiste à faire passer le gaz à épurer à travers une solution d'hydroxyde ferrique [Fe(OH)<sub>3</sub>]

Le sulfure d'hydrogène réagit avec l'hydroxyde ferrique pour donner le sulfure ferrique (Fe<sub>2</sub>S<sub>3</sub>) et de l'eau (H<sub>2</sub>O). Le sulfure ferrique est très instable et se dédouble rapidement en sulfure ferreux (FeS) et soufre (S), suivant la réaction :



Le sulfure ferreux (FeS) est un composé stable, ne présentant ni risque, ni danger pour l'environnement.

- **Traitement du cyanogène et de l'acide cyanhydrique [25]**

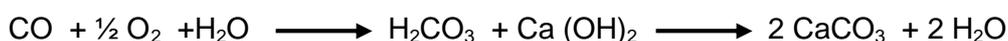
La méthode est similaire au traitement du sulfure d'hydrogène gazeux. Les composés azotés tels que C<sub>2</sub>N<sub>2</sub> ou HCN réagissent avec l'hydroxyde ferrique pour se transformer en composé complexe du fer, suivant la réaction chimique :



Le composé complexe ainsi obtenu est un ferricyanure ferrique. Il est stable et non toxique, donc ne présente pas de risque pour la santé humaine et l'environnement.

- **Traitement du monoxyde de carbone [25]**

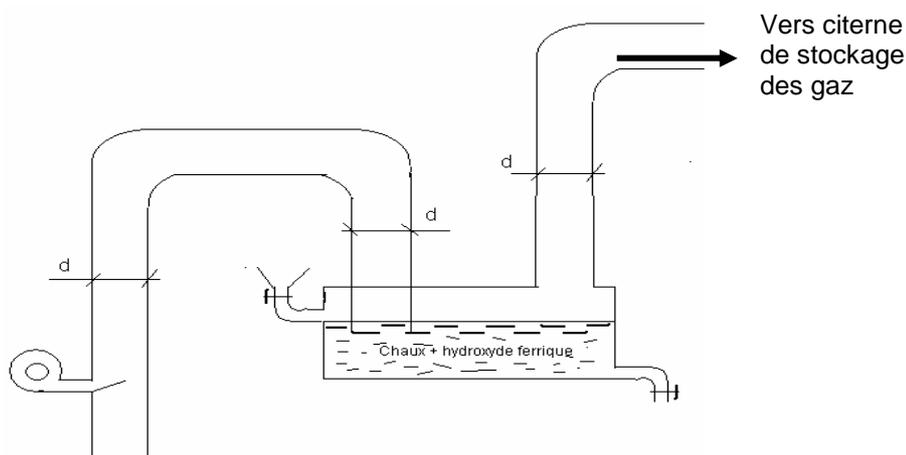
La méthodologie consiste à faire passer le gaz à épurer à travers le lait de chaux. Le monoxyde de carbone réagit avec la chaux pour former le carbonate de calcium, suivant la réaction :



Le carbonate de calcium est un composé stable. Il ne présente donc pas de danger pour l'environnement et la santé humaine.

### 8.2.1.2. Matériels et équipements de traitement

Afin d'éliminer les gaz toxiques issus de la cokéfaction de la houille, on devra mettre en place une cheminée munie d'un système de lavage de gaz. Les caractéristiques du système de lavage de gaz sont les suivantes :



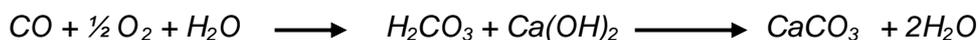
**Figure 23 : Système de lavage des gaz toxiques**

Les émissions toxiques telles que H<sub>2</sub>S, CO, C<sub>2</sub>N<sub>2</sub> ou HCN seront absorbées dans une solution aqueuse de chaux et d'hydroxyde ferrique. Le monoxyde de carbone réagit avec la chaux pour former le carbonate de calcium, tandis le sulfure d'hydrogène et les composés azotés réagissent avec l'hydroxyde ferrique pour former le sulfure de fer et un composé complexe du fer, du carbone et de l'azote, de formule chimique Fe[Fe(CN)<sub>6</sub>]. Les composés ainsi formés seront séchés et pourraient être mis en décharge contrôlée.

## 8.2.2. Atténuation des émissions atmosphériques dues à la combustion du charbon

### 8.2.2.1. Méthodologie [25]

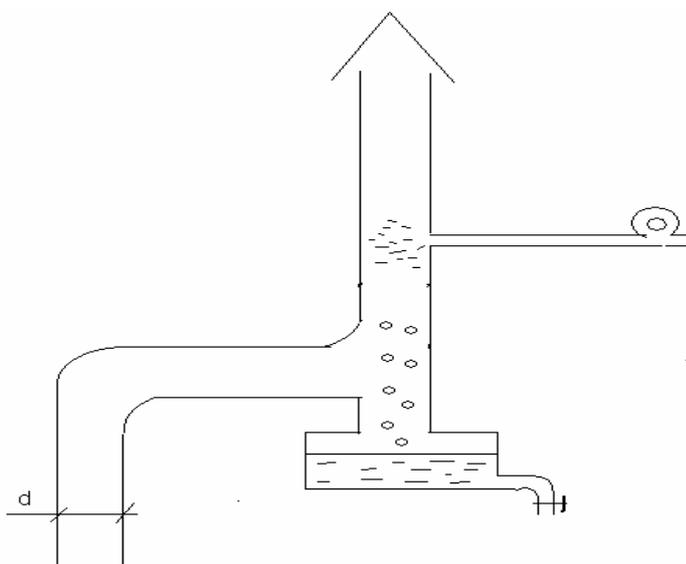
La méthode consiste à faire passer les gaz à épurer dans le lait de chaux. Les émissions constituées de CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, et NO<sub>x</sub> réagissent avec la chaux pour former le carbonate de calcium, le sulfate de calcium et le nitrate de calcium suivant les réactions suivantes :



Le carbonate de calcium et le sulfate de calcium sont des produits insolubles dans l'eau. Ils sont donc stables. Par contre, le nitrate de calcium est très soluble dans l'eau. Il est utilisé comme engrais azoté. Aussi, ils ne présentent pas de risque pour l'homme et son environnement.

### 8.2.2.2. Matériels et équipements de traitement

Afin d'atténuer les émissions de CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, dues à la combustion du charbon dans la chambre de combustion de la centrale thermique et du four à coke, nous suggérons de mettre en place une cheminée munie de pulvérisateur d'eau pour chaque foyer. La hauteur de la cheminée sera de 12m, au minimum. Le schéma du système de traitement est le suivant :



**Figure 24 : Schéma du pulvérisateur d'eau**

Les eaux acides ainsi récupérées seront traitées par la chaux pour avoir des composés calciques stables tels que le CaCO<sub>3</sub>, CaSO<sub>4</sub> ; Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> qui ne présentent pas de risque majeur pour l'environnement. On peut les mettre en décharge avec les déchets solides.

### **8.2.3. Atténuation des émissions de poussières**

Afin d'atténuer les émissions de poussières dues au broyage du charbon, il faudra l'arroser avec de l'eau de temps en temps, surtout en période sèche.

### **8.3. Gestion des déchets solides [26]**

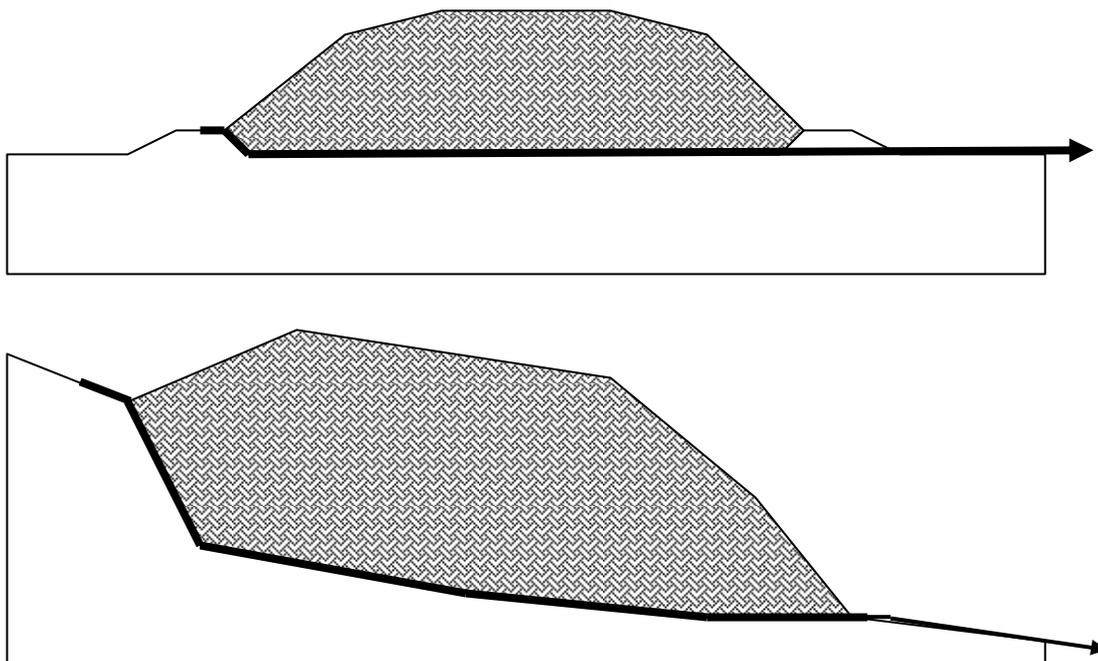
Les promoteurs devront veiller à ce que la gestion des déchets solides du projet n'évolue éventuellement pas vers un conflit social. Pour atteindre cet objectif, les activités à entreprendre seront :

- le recyclage des fines de charbon de terre dans le four à coke ;
- la mise en place d'un système de collecte de déchets solides (moyen de collecte et de transport...) ;
- l'aménagement d'une décharge contrôlée avec l'aval des autorités locales (maires, chef de district, chef de région) pour évacuer les déchets solides générés par les activités du projet (cendres, ordures ménagères, déchets solides issus des bureaux, boues d'épurations...). La localisation doit être désignée par la mairie. Elle ne devra pas affecter la qualité des eaux (souterraines ou de surface) de la zone. Les caractéristiques de la décharge sont :
  - la profondeur maximale est de 1,5 m ; pour une superficie de 5 ha ;
  - sol de nature argileuse, sinon, il devra être tapissé d'une couche d'argile d'au moins 80 cm d'épaisseur ou de géo-membrane (ou géo-textile).

Les critères de choix du site de la décharge sont :

- terrains naturels peu perméables ou du moins de couches imperméables suffisantes, pour protéger la nappe phréatique utile à l'approvisionnement en eau potable ;
- possibilité de garantir le drainage en continu de la masse des déchets par un écoulement naturel du lixiviat (par gravité) ;
- présence de zones déjà dégradées, qui pourraient être assainies et rendues à la nature, suite à une gestion correcte de la décharge ;
- espace suffisant, permettant une gestion correcte de la décharge et d'un volume permettant de rentabiliser la gestion, du point de vue économique, et d'investir pour la mise en place de contrôle approprié ;
- facilité d'accès, déterminé par le développement du réseau routier de la région, mais en prenant aussi en compte les nuisances générées pour les centres habités des environs, ainsi que la possibilité de relier la décharge aux éventuelles grandes voies de communication de la zone desservie ;
- possibilité d'insérer la décharge dans le paysage environnant, de façon à créer un impact visuel positif.

Dans le cadre de ce projet, les deux types de décharges suivants pourraient être mis en place :



**Figure 25 : Schémas des types de décharges**

#### **8.4. Bruits**

Afin d'atténuer les impacts des bruits sur la santé des employés et de la population environnante, les activités à entreprendre seront :

- le port de casque anti-bruit obligatoire pour les ouvriers qui travaillent à côté des matériels ou équipements qui génèrent le niveau de bruit élevé (broyeur, concasseur, centrale thermique...);
- le suivi de la santé des employés travaillant dans des postes sources de bruit.

#### **8.5. Gestion des forêts [12]**

Afin d'atténuer les impacts de la déforestation due à l'utilisation de fine charbon de bois dans le processus de production des briquettes de charbon de terre, il faudra mettre en place un système d'approvisionnement en bois-énergie du processus de transformation du charbon de terre en combustible domestique. Le système consiste à mettre en place une plantation d'arbres à croissance rapide. Les critères de choix des espèces sont :

- l'adaptation aux conditions climatiques de la zone (climat semi-aride dont la pluviométrie varie entre 400 et 800 mm par an) ;
- la croissance rapide et la capacité à rejeter des souches pour la gestion ultérieure en « taillis » ;
- la productivité de 7 à 10 m<sup>3</sup>/ha/an, jusqu'à l'âge d'exploitation qui se situe entre 7 et 10 ans, selon la fertilité du sol ;
- la résistance au passage du feu ;

Les études effectuées par le CiradCIRAD & consorts en 2005 ont montré que les espèces qui répondent à ces critères sont :

- Eucalyptus camaldulensis ;
- Eucalyptus crebra.

Le tableau suivant montre le besoin en bois-énergie du processus de transformation à partir de la 8<sup>e</sup> année de production :

**Tableau 100 : Évaluation de la plantation d'arbres à croissance rapide**

Désignation	Année 8	Année 9	Année 10	Année 11	Année 12	Année 13
Consommation en fine de charbon de bois du processus de transformation (t)	34 728	34 728	34 728	34 728	34 728	34 728
Équivalent en forêt des fines de charbon de bois (ha)	4 019	4 019	4 019	4 019	4 019	4 019
Consommation cumulée de bois-énergie du processus de transformation (ha)	4 019	8 038	12 057	16 076	20 095	24 114

Source : Auteur

Comme la régénération des souches de l'eucalyptus est de 5 à 6 ans, selon la fertilité du sol, la superficie nécessaire pour la plantation d'arbres à croissance rapide est donc de 24 114 ha

Le rendement de carbonisation dans des meules traditionnelles améliorées atteindra 15% (au lieu de 10% pour les meules traditionnelles actuelles).

Cependant, durant les sept premières années de production (la plantation d'arbre à croissance rapide ne sera pas encore exploitable), on utilisera l'élagage des arbres des forêts environnantes (District de Betioky-Atsimo, Cf. paragraphe 4.7.4). La superficie concernée par l'élagage sera de 13,6% de la forêt exploitable du District de Betioky-Atsimo.

La plantation des arbres à croissance rapide devra débuter avec l'installation des infrastructures du projet.

Toutefois, les aires de forêts affectées par la mise en place et le fonctionnement du projet seront compensées par le reboisement de celles-ci ou son équivalent dans les zones déboisées de la région.

La superficie à reboiser dans le cadre de ce projet est donnée dans le tableau suivant :

**Tableau 101 : Superficie à reboiser dans le cadre du projet**

DÉSIGNATION	Phase d'installation des infrastructures	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5	Année 6	Année 7
Installation des infrastructures (ha)	4	-	-	-	-	-	-	-
Exploitation de la mine (ha)	-	13	16	23	33	44	65	68
Culture de manioc (ha)	-	1 800	460	930	1 330	1 480	2 920	340
Production de charbon de bois (ha)	8 038	4 019	4 019	4 019	4 019	4 019	4 019	
<b>TOTAL (ha)</b>	<b>8 042</b>	<b>5 832</b>	<b>476</b>	<b>4 495</b>	<b>5 382</b>	<b>5 543</b>	<b>7 004</b>	<b>408</b>

Source : Auteur

## CONCLUSION

À travers les études et les analyses environnementales dont les résultats sont reportés dans cette dernière partie, on peut dire que les futures activités de la transformation du charbon de terre de la Sakoa en combustible domestique seront susceptibles de causer des dommages très significatifs à l'Environnement si des mesures ne sont pas prises.

Les pollutions et nuisances ainsi que les risques et dangers générés par les activités du projet ont été identifiés et évalués. Il s'agit :

- des pollutions atmosphériques dues à la combustion du charbon de terre dans les foyers de la centrale thermique et du four à coke ainsi que les émissions de gaz toxiques de la cokéfaction de la houille ;
- de la pollution des eaux de surfaces ou souterraines environnantes par les rejets liquides issus du processus de transformation du charbon et des cités des travailleurs ;
- des nuisances dues aux bruits générés par les différents matériels et équipements d'exploitation et de transformation du charbon en combustible domestique ;
- des nuisances dues aux déchets solides issus des habitations des employés et de la transformation du charbon ;
- des risques d'incendie et d'explosion dus à la présence massive de matières inflammables et des matières explosives ;
- des risques et dangers de la transformation du charbon en combustible domestique

Des mesures d'atténuation ont donc été proposées afin de réduire les impacts négatifs significatifs à des niveaux acceptables.

Si les mesures proposées sont appliquées correctement, les impacts résiduels se trouveront à des niveaux qui ne présenteront plus de risques ni dangers pour les différents composants de l'environnement.

L'étude a montré que l'utilisation des briquettes de charbon de terre comme combustible domestique ne présente ni risque ni danger pour les usagers et l'environnement.

Ainsi, le projet apportera une solution aux problèmes de combustible à usage domestique en mettant sur le marché local de source d'énergie capable de se substituer au bois-énergie qui se raréfie actuellement.

En outre, la substitution du charbon de bois et du bois de chauffe par les briquettes de charbon de terre permettrait de conserver une grande partie de la forêt locale. Les forêts ainsi conservées pourraient séquestrer du GES. Aussi, elle pourrait contribuer à l'atténuation de l'effet de serre provoqué par l'activité anthropique de l'homme et la pression sur les ressources forestières malgaches.

Le projet contribuera à la réalisation du programme du gouvernement à la lutte contre la pauvreté par la résorption du chômage. Il contribuera à la résolution du problème de l'énergie domestique que traverse le pays actuellement.

Le projet permettra aussi à la zone d'étude de se développer rapidement, par la réhabilitation des infrastructures routières, la présence de l'électricité et des eaux potables.

Les activités de l'exploitation et de la transformation du charbon de terre de la Sakoa en combustible domestique seront bénéfiques, non seulement, pour la Commune de Soamanonga mais aussi pour les communes environnantes, la Région Atsimo-Andrefana et Madagascar tout entière, qui bénéficieraient des avantages que le projet apportera.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

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 les plans technique, économique, financier et environnemental.

En effet, après une étude bibliographique sur le charbon de terre, à savoir, la définition, l'origine et la formation, la composition et les différents types de charbon de terre, la caractérisation, l'utilisation et les études effectuées sur le charbon de terre de la Sakoa, nous avons étudié les caractéristiques dudit charbon de terre de la Sakoa. Les échantillons ont été prélevés dans les secteurs de Namboreko, Andremby et Andranomanintsy. Les résultats de cette étude ont montré que la qualité du charbon de terre est variable d'un secteur à l'autre, et d'une couche à l'autre.

Ensuite, nous avons entrepris l'étude de la transformation du charbon de terre en combustible domestique, au niveau pilote. Elle 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 :

- P<sub>1</sub> : semi-coke lié par de la féculé de manioc, amorcé par du goudron ;
- P<sub>2</sub> : semi-coke lié par de la féculé de manioc, amorcé par de la fine de charbon de bois ;
- P<sub>3</sub> : semi-coke lié par de la féculé de manioc, amorcé par de la cire.

À partir des conditions ainsi déterminées, nous avons effectué la production de quelques quantités de produits P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> et P<sub>3</sub> 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 P<sub>2</sub> est le mieux apprécié par les 77% des utilisateurs qui ont testé les produits, avec un taux d'appréciation moyen de 57,31%.

Nous avons ensuite passé à l'analyse technico-économique et financière du projet qui nous a permis de déterminer les stratégies marketing pour l'écoulement du produit sur le marché, le montant des investissements initiaux ainsi que le plan de financement du projet.

L'évaluation financière du projet a montré des résultats, largement positifs, aussi bien pour les comptes de résultats prévisionnels que pour les tableaux de trésorerie prévisionnelle. De plus, les divers ratios simples de rentabilité nous confirment que le projet est rentable financièrement. En effet, pour des investissements initiaux de 64 313 millions d'ariary et un prix de vente moyen de 350 ariary/kg des briquettes de charbon de terre, soit 53,0 ariary/Mcal (70,2 ariary/Mcal pour le charbon de bois) :

- les ratios de rentabilité sont tous intéressants et évoluent rapidement pendant les six premières années de production ;
- le TRI est de 36,71%, largement supérieur au taux de l'emprunt pratiqué par le système bancaire actuel ;
- le seuil de rentabilité sera atteint en 11 mois d'activité ;
- le délai de récupération des investissements est 7 ans 10 mois 17 jours de production.

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 (27 058 083 ha à la fin du projet) ;
- 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 (240 800 000 tonnes d'équivalent en CO<sub>2</sub>, à la fin du projet).

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**

Elle a été rangée par ordre décroissant de publication.

1. **JAILLAIS C.** : « La filière charbon de bois dans la région de Tuléar » ENESAD & DAT, Mémoire d'ingénieur, Dijon (France) 1996.
2. **Microsoft Encarta (Encyclopédie Encarta)** « Charbon » « coke » « mine et exploitation du charbon » « environnement et chimie » Microsoft, 2005.
3. **RAMAMPIHERIKA K. D.** « Développer un terme de référence pour une étude de faisabilité complète de la transformation du charbon de terre de la Sakoa pour usage domestique » Rapport d'étude WWF – Toliara 2003.
4. **MUSSANO J.P.** « Le charbon » Mémoire Cycle Postgrade en énergie EPFL, Lausanne (Suisse) 1996.
5. **CHICHE P.** « Propriété du charbon. Réserve et utilisations. » Entropie N°114-115, 1983.
6. **TEISSIE J. & al** « Le charbon » Total Fina Elf, 2001.
7. **BLANC C.** « les bassins d'Andemby – Bevalaha. Le Golfe du Vohibory et le bassin de Beroy » Rapport BRGM N°1, 1953.
8. **BORE J.** « Société des charbonnages de la Sakoa. Le bassin houiller d'Andranomaninty » Rapport BRGM, 1950.
9. **BORE J.** « Société de charbonnage de la Sakoa. Rapport technique sur le gisement houiller de la Sakoa et avant projet d'équipement d'un siège de 600.000 à 1.000.000 de tonnes par les descenderies 43 et 45 » Rapport BRGM, 1947.
10. **VERCLEGEN J.** « Histoire du charbon » Paris 1965.
11. **Ministère de l'environnement, des eaux et forêts** « Convention Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques : Communication Nationale » MEEF – Antananarivo 2003.
12. **CIRAD, Département forêt** « 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 Janvier 2006.
13. **HEBDEN D. & STRAUD H.J.F.** « Coal gasification process » Chemistry of coal utilization » Edition John Wiley and Sons ; Elliot, 1981.
14. **NOWACKI P.** « Coal gasification process » Noyes Data 1981.

15. **ALPERN B.** « Essai de classification des combustibles fossiles solides » Document GERCHAR, 1977.
16. **LOISON R.** « Gazéification du charbon » Technique de l'Ingénieur J 4, J 5410, 1986  
**KARBOVIAC D.** « Méthodes de prévision de la qualité des cokes à partir des analyses pétrographiques. » Association technique de la sidérurgie, mars 1975
17. **BOUFELDJA B & al.** : « Guide biomasse énergie » Collection Etudes et filières IEPF.– Québec (Canada) 1994.
18. **RAVONINJATOVO A. O** : « Contribution à l'étude et à la valorisation de la biomasse à Madagascar » Thèse de docteur ingénieur ESPA – Antananarivo 2004.
19. **RAMAROSON J. D.** « Création d'une entreprise de production de sulfate d'alumine et de silicate de soude » Mémoire de d'obtention du DEPA, IFE/AUF – Réduit (Ile Maurice) 2001.
20. **GERONIMI M.** « De la Comptabilité à l'Analyse Financière » Gasbn Berger, Paris 1972.
21. **PRUDHON G.** « Combustibles solides. Caractéristiques. Propriétés. Analyse. » Technique de l'Ingénieur 5, A 3, A 1712, A 1714- 1986.
22. **Office National pour l'environnement** « Extrait du schéma directeur de gestion des énergies domestiques de Toliara » ONE – Antananarivo 2007.
23. **Ministère de l'énergie et des mines** « Charbon de la Sakoa » Service de la Géologie MEM – Antananarivo 2005.
24. **International Resources Group.** « Support de formation en Mécanisme de Développement Propre » Ministère de l'environnement/USAID, Antananarivo, 2001.
25. **HACKSPILL L.** « Chimie minérale » Tome I, Presse universitaire de France, Paris 1958 – p.739 à 772.
26. **GANDOLLA & AI** : « Techniques, exploitation et gestion des décharges contrôlées » Cours Postgrade en ingénierie et management de l'environnement EPFL – Lausanne (Suisse) 1997.
27. **RAHAMALITSIROFO H.** « 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 2008.

28. **Ministère de l'énergie et des mines** « Programme National énergie » MEM – Antananarivo 2005
29. **Office National pour l'environnement** « Tableau de bord environnemental de la province de Toliara 2003 » ONE – Antananarivo 2005.
30. **DENOE D. & LEROUGE N.** « La bataille du charbon en pays ancien » Paris 2003.
31. **Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo** « Elaboration de schémas directeurs de gestion des énergies domestiques - Toliara » Rapport d'étude ONE – Antananarivo, décembre 2003.
32. **RAMAMPIHERIKA K. D. & al** « Des paysans sur la vulgarisation des combustibles de substitution et de foyer amélioré » ASE, Rapport d'étude – Toliara 2002.
33. **Ministère de l'environnement** « Directive générale pour la réalisation d'une étude d'impact sur l'environnement » Minenv/ONE – Antananarivo Juillet 2000.
34. **BENOIT P.** « Le charbon de terre en Europe Occidentale avant l'usage du coke » Paris 1999.
35. **RANGUIN E. & FABE ETAL R.** « Combustibles solides » – Paris 1994.
36. **ONURSAL B.** « New cleaning technologies advance coal » Coal mining, Mai 1984
37. **ROUZAND J.M. & al** « La caractérisation des charbons et des cokes par microscopie électronique par transmission » Entropie, N°113-114, 1983.
38. **LEVY C. & MARJOT R.** « Production de chaleur à partir du charbon » Technique de l'ingénieur, B 21, B 2130, 1986  
**JOHNSON J.L.** « Fundamentals of coal gasification » Chemistry of coal utilisation – Edition John Wiley and Sons; Elliot M.A. 1981.
39. **MICHENER** « Presse pour le charbon de bois » Paris 1977
40. **ALPERN B.** « Combustibles solides » Les sciences, Encyclopédie Alpha, N° 106 – Mars 1976.
41. **CHANDELER J. L.** « Produire du charbon de bois – Le chemin facile » Paris 1970.
42. **LETORT P. & al** « L'évolution de la structure interne des houilles au cours de leur carbonisation » Journal de Chimie – Physique, 1963.

43. **BUMIFOM** « Rapport sur les possibilités de mise en exploitation des charbonnages de la Sakoa » Rapport BRGM, janvier 1957.
44. **ANICET J.P.J.** « Description d'un fourneau de cuisson construit de manière à pouvoir préparer tout espèce d'aliments sans être incommodé par la vapeur du charbon » Paris 1956.
45. **MESSNER E.** « Conditionnement, manutention, transport et stockage des charbons » Paris – 1952.
46. **CHARDONNER J.** « Le charbon, sa production, son rôle économique et social » Paris 1949.
47. **BASORE C. A. & MOORE** « La production de charbon de gros morceau de pin, sciure sans liant » Alabama 1942.
48. **PIETERS J.** « La production économique des agglomérés de charbon de bois grâce à la récupération économique des sous produits » Bruxelles 1938.

#### **WEBOGRAPHIE**

49. <http://www.perser.fr/web/revue/home/>
50. <http://www.maplandia.com/mad/Toliara/Betroka/Sakoa>
51. [http://www.pnae.mg/ee/audience pam - Sakoa/résumé](http://www.pnae.mg/ee/audience_pam_-_Sakoa/resume)

# ANNEXES

## **Annexe 1 : Dosage du carbone et du soufre**

### **1.1. Dosage du carbone**

Le carbone est dosé par la méthode de Liebig qui réalise une combustion de la prise d'essai suivi de l'absorption et du dosage du dioxyde de carbone et l'eau formé (NF M 03-032 et ISO 625)

### **1.2. Dosage du soufre**

Le soufre se trouve sous diverses formes dans la houille : soufre organique, soufre minérale, soufre pyritique ( $\text{FeS}_2$ ) et sulfate.

La détermination du soufre total est réalisée au moyen de la méthode Eschka. Il s'agit d'une combustion en milieu alcalin qui fixe les gaz formés sous forme de sulfates et de sulfites oxydés et sulfates. Le tout est dosé par précipitation du sulfate de baryum (NF 03-008 et ISO.334). Cette détermination peut également se faire par combustion à haute température (ISO.351).

Les normes BS 1016 : Part 11, ISO 157 et NF M 03-024 décrivent une méthode de dosage du soufre pyritique par dissolution dans l'acide nitrique, ainsi qu'une méthode de dosage du soufre sulfate par dissolution dans l'acide chlorhydrique.

## Annexe 2 : Teneur en matières volatiles

**Remarque** : on parle différemment de teneur en matières volatiles, de taux de matières volatiles ou d'indice de matières volatiles. L'indice s'exprime, comme la teneur et le taux en pourcentage massique.

La détermination du taux de matières volatiles (NF M 03-004 et ISO 562) consiste à maintenir à 900°C, à l'abri de l'air et pendant 7 mn, un échantillon de combustible.

Le taux de matières volatiles est sans aucun doute le test des combustibles solides en général, et des charbons en particulier, le plus répandu. Ce taux présente un grand intérêt pratique car, outre sa simplicité, il constitue un paramètre important de qualification des combustibles :

- Il est utilisé comme critère de rang pour des houilles de typologie semblable, notamment celles d'Europe et des Etats –Unis, caractérisées par une teneur en vitrinité élevée ;
- Il est en corrélation directe avec le rendement en coke de la cokéfaction industrielle ;
- Il joue un grand rôle en combustion directe car les matières volatiles favorisent l'allumage du foyer et le développement de la flamme ;

Le charbon à forte teneur en matières volatiles sont plus sensibles aux phénomènes d'auto-échauffement par fixation de l'oxygène de l'air ; Des précautions spéciales doivent être prises lorsque le taux de matières volatiles est supérieur à 20% en masse environ.

Le taux de matières volatiles peut être exprimé de différentes manières :

- **Taux de matières volatiles sur produits sec** : il est directement déduit de la pesée de l'échantillon sec à l'air avant et après pyrolyse, après correction de l'humidité ; la dépendance de ce taux avec la teneur en cendres gêne les comparaisons intra-bassin et interbassin

Dans la pratique, l'expression matières volatiles sur produit sec est la plus utilisée.

- **Taux de matières volatiles sur produits sec, sans cendres** : il s'exprime par la relation :

$$MV_{\text{sur produit sec sans cendres}} = \frac{MV_{\text{sur produit sec}} \times 100}{100 - C}$$

avec C (%) : teneur en cendre sur produit sec

Dans la pratique, on assimile l'expression MV sur produit sec, sans cendre à l'expression MV sur produit pur sans tenir compte du facteur minéral.

Le taux de matières volatiles constitue le paramètre directeur de la classification internationale de Genève de 1956.

## **Annexe 3 : Pouvoir calorifique**

### **3.1. Mesure du pouvoir calorifique**

Le pouvoir calorifique des combustibles solides est déterminé au moyen de la bombe calorimétrique (NF M 03-005 et ISO 1928).

Les normes fournissent les définitions du pouvoir calorifique supérieur (PCS) et du pouvoir calorifique inférieur (PCI).

Le PCS est la quantité de la chaleur, exprimée en joules par gramme, dégagée par la combustion complète de l'unité de masse de combustible, l'eau produite étant entièrement condensée et les autres produits de la combustion étant ramenés à la température initiale fixée à 25°C.

Le PCI est la quantité de chaleur, exprimée en joules par gramme dégagée par la combustion complète de l'unité de masse de combustible, l'eau demeurant à l'état de vapeur et les autres produits de la combustion étant ramenés à la température initiale fixée à 25°C ; il est plus directement utilisable dans les conditions normales de combustion.

La bombe calorimétrique est un récipient hermétiquement fermée, résistant à des pressions élevées, équipé d'un système d'allumage électrique et destiné à recevoir une prise d'essai de 1 g placé dans l'oxygène pur. La bombe est immergée dans un vase calorimétrique, contenant environ 2 litres d'eau, lui-même placé dans une jaquette à double paroi à circulation d'eau.

Le principe de la détermination du PCS consiste à mesurer l'élévation de la température du vase calorimétrique après combustion de l'échantillon à analyser.

Des corrections appropriées sont apportées par référence aux essais sur des substances étalons (acide benzoïque).

La mesure du pouvoir calorifique supérieur à la bombe calorimétrique est très précise si elle est effectuée avec soin. La répétabilité (écart entre deux mesures) indiquée par les normes est de 125 à 210 J/g ; elle peut en pratique descendre au dessous de 50 J/g.

### **3.2. Facteurs de variation du pouvoir calorifique**

Le pouvoir calorifique est évidemment l'une des caractéristiques les plus importantes des combustibles solides, et le principal critère d'appréciation de la valeur d'usage.

La bombe calorimétrique donne directement le pouvoir calorifique supérieur et, pour déterminer le pouvoir calorifique inférieur, il importe de mesurer la quantité d'eau condensée dans la bombe. Cette quantité d'eau condensée est en rapport direct avec l'humidité initiale de l'échantillon et avec la teneur en hydrogène du combustible.

Le pouvoir calorifique varie avec la typologie et le rang du combustible. Les charbons de type fusinisé et les charbons jeunes, les tourbes et les lignites ont un pouvoir calorifique plus faible.

Au cours de houillification, le pouvoir calorifique supérieur augmente avec le rang, à mesure de la réduction de la teneur en oxygène, il passe par un maximum à la transition entre les houilles

et les anthracites et diminue lentement au cours de la métagenèse, consécutivement à la diminution de la teneur en hydrogène dont le pouvoir calorifique supérieur est plus élevé que celui du carbone.

## **Annexe 4 : Analyse et caractéristiques des cendres**

La présence de matières minérales dans les houilles constitue une lourde sujétion pour la majorité es utilisation du charbon. Les contraintes sont certes en rapport avec la teneur en cendre du charbon lavé prêt à l'emploi, mais elles dépendent aussi très fortement de la composition chimique des cendres.

### **3.1. Matières minérales, cendres et facteur minéral**

Pour caractériser complètement les matières minérales, il faut incinérer la matière organique, recueillir les cendres et analyser celles-ci. Au cours de l'opération d'incinération, les matières minérales subissent des transformations qui altèrent quelques peu la nature :

- l'eau d'hydratation des différents composés s'évapore ;
- la pyrite est transformée en oxyde de fer ;
- les composés alcalins se volatilisent ;
- les carbonates se dissocient ;
- le résidu se trouve quasi entièrement oxydé.

Certaines de ces réactions conduisent à une augmentation de masse et d'autres ont l'effet inverse. On a vérifié que dans l'ensemble, la mesure du taux de cendre entraîne, le plus souvent, une sous estimation de la teneur initiale en matières minérales.

On appelle facteur minéral le rapport entre la masse de matières minérales et la masse de cendre.

Le facteur minéral est en général supérieur à 1 mais il peut varier entre 0,95 et 1,20. Des valeurs voisines de 1,1 sont les plus courantes. Il existe plusieurs méthodes pour mesurer le facteur minéral. Une méthode de détermination a été normalisée (ISO 602).

En raison du mode d'obtention par incinération, la composition chimique des cendres est exprimée en oxydes ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,...)

### **3.2. Types de cendres**

Les silico-aluminates sont les composés dominants dans la plupart des cas, mais il existe une grande variété de compositions chimiques parmi lesquelles on peut distinguer deux grands groupes de cendres :

- les cendres siliceuses, associées principalement au charbon ;
- les cendres calcaires, rencontrées surtout dans les gisements de lignite ; ces dernières contiennent une proportion élevée de calcium combiné sous forme de carbonates, sulfates et de chaux ; elles peuvent également renfermer des quantités élevées de magnésium et de composés alcalins.

### 3.3. Comportement des cendres

Dans les installations de combustion, et en particulier les chaudières à charbon pulvérisé et à cendres sèches (non fondues) des centrales thermiques, on constate principalement deux comportements gênants des cendres :

- La scorification (ou slagging) est caractérisée par la faculté des cendres, selon leur composition, leur degré de ramollissement ou de fusion, à former des grappes adhérant sur les tubes d'échange par rayonnement du foyer.
- L'encrassement (ou fouling) des faisceaux d'échange par convection de la chaudière, par les cendres volantes, est lié à la formation de sulfates alcalins, de sulfates alcalino-terreux et de trisulfates mixtes de fer et d'alcalins. Ces trisulfates, solubles à basse température (500 à 700 °C), adhèrent aux tubes et attaquent le métal.

Des indices empiriques, calculés à partir de la composition chimique des cendres, ont été proposés pour caractériser ces phénomènes :

- Indice scorification : Il est fonction de la teneur en composés basiques et acides des cendres ainsi que de la teneur en soufre du charbon
- Indice de corrosion : Il est fonction de la teneur en masse en oxyde sodium ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) des cendres.

### 3.4. Teneur en cendres

La détermination du taux de cendres consiste à incinérer un échantillon du charbon à 815 °C jusqu'à masse constante du résidu (NF M 03-003 et ISO 1171)

La teneur en cendre des charbons destinés à la cokéfaction et aux foyers domestiques est généralement comprise entre 5 et 10% en masse du charbon sec. Pour la combustion dans les petites chaudières, elle peut monter à 20 à 30%, tandis que les gros foyers des centrales thermiques acceptent des teneurs en matières minérales plus élevées (40 à 50% en masse). Dans ce dernier cas, la chaudière et l'installation de dépoussiérage des fumées sont conçues et dimensionnées en fonction des caractéristiques des cendres du combustible.

Le rôle des cendres, sur l'utilisation et la valeur d'usage des charbons, est tout autant, sinon davantage, déterminé par la composition chimique des matières minérales elles-mêmes que par la teneur pondérale globale.

Il en est de principe globalement plus économique de laver le charbon brut à la mine que de transporter et d'utiliser un combustible non lavé. L'incidence des cendres sur l'économie des centrales thermiques a fait aux Etats-Unis, l'objet d'études approfondies.

## Annexe 5 : Teneur en eau

### 5.1. Différentes formes de l'humidité

La teneur en eau des combustibles solides est un facteur important du prix (l'eau est un ballast sans valeur) et de la valeur d'usage (le séchage est une opération coûteuse), d'où l'importance attachée à la détermination précise de l'humidité.

#### 5.1.1. Eau liée

C'est l'eau qui est liée chimiquement, ou adsorbée, sur les sites hydrophiles des parois de la macromolécule organique.

#### 5.1.2. Capacité de rétention

Elle fait intervenir des phénomènes de capillarité dans la porosité fine du combustible. La frontière entre l'eau liée et la capacité de rétention n'est pas nettement délimitée. De plus la notion de capacité de rétention doit être interprétée par rapport à des conditions atmosphériques définies en humidité relative et en température.

La capacité de rétention d'eau est une caractéristique intrinsèque du combustible qui dépend de la typologie, du rang et du faciès. Généralement inférieure à 5% en masse dans les houilles, elle peut atteindre 10 ou 15 à 50 ou 60% en masse dans les lignites et monter à plus de 70 ou 80% en masse dans les tourbes.

#### 5.1.3. Humidité d'équilibre

C'est la teneur en eau d'un combustible séjournant au contact d'une atmosphère définie, par exemple, l'air ambiant du laboratoire d'analyse ou l'air libre sur une air de stockage. L'humidité d'équilibre varie avec la température et l'humidité relative de l'air. En moins d'une journée, l'humidité d'équilibre peut varier de plusieurs points (par exemple de 2 à 3%) sur le même site.

**Remarque :** La norme ISO 1018 définit les conditions de mesure de la capacité de rétention d'eau, en fixant la température à 30 °C et l'humidité relative à 96%.

Dans ces conditions, les notions de **capacité de rétention**, ou **d'humidité inhérente**, **d'humidité in situ**, **d'humidité d'équilibre** et **d'humidité interne** ont la même signification.

#### 5.1.4. Teneur en eau du charbon séché à l'air

Cette notion rejoint la définition de l'humidité d'équilibre, lorsque l'atmosphère au contact du charbon varie en température et en humidité relative. Il est commode, au laboratoire, de laisser égoutter et sécher à l'air les échantillons pour faciliter les opérations ultérieures de quartage et de réduction granulométrique. Les échantillons finaux soumis aux analyses quantitatives

chimiques (teneur en cendres, teneur en matières volatiles, pouvoir calorifique,...) portent généralement sur des prises d'essais séchées à l'air.

Ces prises d'essais possèdent donc une humidité résiduelle, qui doit être mesurée en parallèle et simultanément avec le test considéré, afin de ramener par le calcul le résultat sur produit (rigoureusement) sec.

**Remarque :** *Il n'est pas recommandé de sécher complètement la prise d'essai avant l'analyse car l'opération de séchage thermique à l'air peut altérer certaines propriétés du charbon : pouvoir calorifique, teneur en matières volatiles, propriétés cokéfiantes. Le recours à une atmosphère inerte compliquerait inutilement les opérations.*

#### 5.1.5. *Humidité superficielle ou humidité externe*

C'est en quelque sorte l'eau d'égouttage, adhérant à la périphérie des grains, qui est facilement éliminée par ressuage, ventilation ou chauffage. L'humidité superficielle exprime théoriquement la différence entre l'humidité totale et la capacité de rétention d'eau. Mais il arrive que l'humidité superficielle soit calculée comme la différence entre l'humidité totale et l'humidité du charbon séché à l'air.

#### 5.1.6. *Humidité totale*

C'est la teneur en eau mesurée sur un échantillon donné, après séchage complet de ce dernier. La norme ISO 589 prescrit de sécher l'échantillon dans une étuve ventilée dont la température est réglée à 105 °C, jusqu'à masse constante.

## Annexe 6 : Masse volumique

Le terme densité, consacré par l'usage, est également utilisé pour parler de la masse volumique

### 6.1. Densité en vrac

Elle correspond au rapport de la masse du matériau au volume total occupé par ce dernier (camion, benne, wagon, silo,...). La densité en vrac ne dépend pas seulement des propriétés intrinsèques du combustible, mais elle est beaucoup influencée par la granulométrie, l'état de la surface, l'humidité et les circonstances des manipulations (vibrations, secousses, ségrégation granulométrique,...)

La densité en vrac des combustibles est généralement inférieure à  $1 \text{ g/cm}^3$ . Celle des houilles peut varier entre  $0,70$  et  $0,80 \text{ g/cm}^3$ . Le matériau compacté peut atteindre  $1,10 \text{ g/cm}^3$  humidité comprise, pour une teneur en eau de 10% en masse. La densité en vrac du coke est beaucoup plus faible, elle se situe entre  $0,50$  et  $0,60 \text{ g/cm}^3$ .

Les produits carbonés les plus légers sont le semi-coke, le coke réducteur destiné à l'électrometallurgie et le charbon de bois dont les densités en vrac varient entre  $0,2$  et  $0,5 \text{ g/cm}^3$ .

### 6.2. Densité apparente

Elle caractérise la masse du matériau rapportée au volume délimité par le contour extérieur des grains. Elle est voisine de  $1,30 \text{ g/cm}^3$  pour les houilles de rang moyen et varie suivant le groupe macéral considéré :

- exinite :  $1,05$  à  $1,10 \text{ g/cm}^3$  ;
- vitrinite :  $1,25$  à  $1,30 \text{ g/cm}^3$  ;
- inertinite :  $1,40$  à  $1,50 \text{ g/cm}^3$  ;

La densité apparente des cokes se situe entre  $0,40$  et  $1 \text{ g/cm}^3$  selon le type de coke considéré :

- charbon de bois :  $0,30$  à  $0,50 \text{ g/cm}^3$  ;
- semi-coke :  $0,50$  à  $0,80 \text{ g/cm}^3$  ;
- coke :  $0,80$  à  $1,00 \text{ g/cm}^3$

### 6.3. Masse volumique réelle ou densité vraie

Elle exprime la masse de matière solide rapportée au volume de matière, porosité exclue. C'est une propriété intrinsèque du combustible qui dépend pour les houilles de la typologie, du faciès et du rang. Dans le cas des charbons, dont la porosité interne est faible, la densité vraie est très proche de la densité apparente. Elle est au contraire beaucoup plus élevée dans les cokes, où elle atteint des valeurs comprises entre  $1,5$  et  $2 \text{ g/cm}^3$ .

## **Annexe 7 : Protocole scientifique pour le test d'inflammabilité du charbon de terre de la Sakoa**

### **1. METHODOLOGIE**

La démarche adoptée pour la mesure du temps d'inflammabilité des briquettes de charbon de terre de la Sakoa requiert, à travers toutes les étapes à passer, d'opérer dans les mêmes conditions et selon l'ordre chronologique ci-après :

#### **1.1. Conditions de réalisation de la mesure :**

##### *1.1.1. Matériels utilisés*

- Trois (03) foyers améliorés identiques « petit modèle » fabriqués par le CNRIT ont été utilisés durant tout le test ;
- Un (01) chronomètre pour enregistrer la durée de chaque test.

##### *1.1.2. Combustible*

- Trois types de briquettes de charbon de terre identiques (60g chacun) fabriquées à partir de chacune des amorces seront les combustibles à tester ;
- 100 g de charbon de bois issu de même essence ou 100 g de tige de pins serviront d'amorce pour assurer le démarrage du feu ;

##### *1.1.3. Mise en place des briquettes dans le foyer amélioré*

Les trois briquettes à tester seront placées longitudinalement au dessus du tas d'amorces (100 g de charbon de bois ou 100 g de tiges de pins) avant chaque début de test (démarrage du feu). Ce mode de placement des briquettes permet non seulement un meilleur contact d'une grande partie superficielle des briquettes avec le feu mais aussi un meilleur temps d'inflammabilité.

##### *1.1.4. Mode de réalisation du test*

- Le test a été réalisé dans le laboratoire du Département Energétique du CNRIT à l'intérieur de la chambre de combustion
- Cinq tests par amorce (100 g de charbon de bois/ 100 g de tiges de pins) ont été réalisés pour déterminer l'inflammabilité des onze (11) amorces à tester.

#### **1.2. Déroulement du test :**

Une fois que les conditions énumérées ci-dessus sont remplies, c'est – à – dire que :

- les trois foyers améliorés sont prêts pour le test dans la chambre de combustion ;

- le tas d'amorce (100 g de charbon de bois ou 100 g de tiges de pins) pour démarrer le feu est placé sur la grille du foyer ;
- les briquettes sont déjà placées au-dessus du tas d'amorce juste au - dessus de la grille de chaque foyer amélioré,

Le test de mesure du temps d'inflammabilité du charbon de terre devra démarrer selon la séquence suivante :

- allumer, en même temps, le feu de chaque foyer amélioré ;
- déclencher le chronomètre une fois que le feu démarre.

### **1.3. Mesure du temps d'inflammabilité : Arrêt du chronomètre**

Le temps d'inflammabilité sera enregistré une fois que les briquettes brûlent indépendamment de tout apport d'air primaire

## **Annexe 8 : Processus de fabrication de la fécula de manioc**

Le principe de fabrication consiste à extraire les grains d'amidon de la chair de manioc. Cette dernière est réduite en petit morceau après avoir subi une opération de lavage et d'épluchage. Ensuite, on effectue le râpage qui consiste à désintégrer la pulpe pour libérer aisément les grains d'amidon.

On soumet ensuite les grains d'amidon à un courant d'eau puis on retient la cellulose sur un tamis.

On procède, ensuite, à une décantation ou par centrifugation pour séparer la partie aqueuse du lait féculant dite « eau verte » des substances fines en l'occurrence du grain d'amidon qui sera lavé avec l'eau. La fécula est séchée par la suite et mise dans des séchoirs à air chaud pour réduire son taux d'humidité entre 9 et 12 % à une température inférieure à la gélification de l'amidon.

D'après l'information sur la production agricole à Madagascar, recueillie auprès de l'INSTAT, la culture de manioc à Madagascar donne 30 à 40 tonnes/ha. Le rendement de conversion industrielle en fécula est de 20 %.

Compte tenu du rendement de 20%, la quantité de tubercule nécessaire à la production de fécula pour le régime de croisière est de 90.000 tonnes correspondant à un niveau de la production de 231.500 tonnes de brique.

Le meilleur moyen d'approvisionner le processus de transformation en fécula serait de promouvoir la mise en place de petites féculeries artisanales dans la région Atsimo Andrefana, surtout dans le district de Betioky-Atsimo et les communes avoisinant le site d'installation de l'usine de transformation.

En délocalisant l'unité de production de fécula de manioc, on réduit le volume d'investissement requis rendant possible l'intégration ou la reconversion des artisans charbonniers en artisans féculiers.

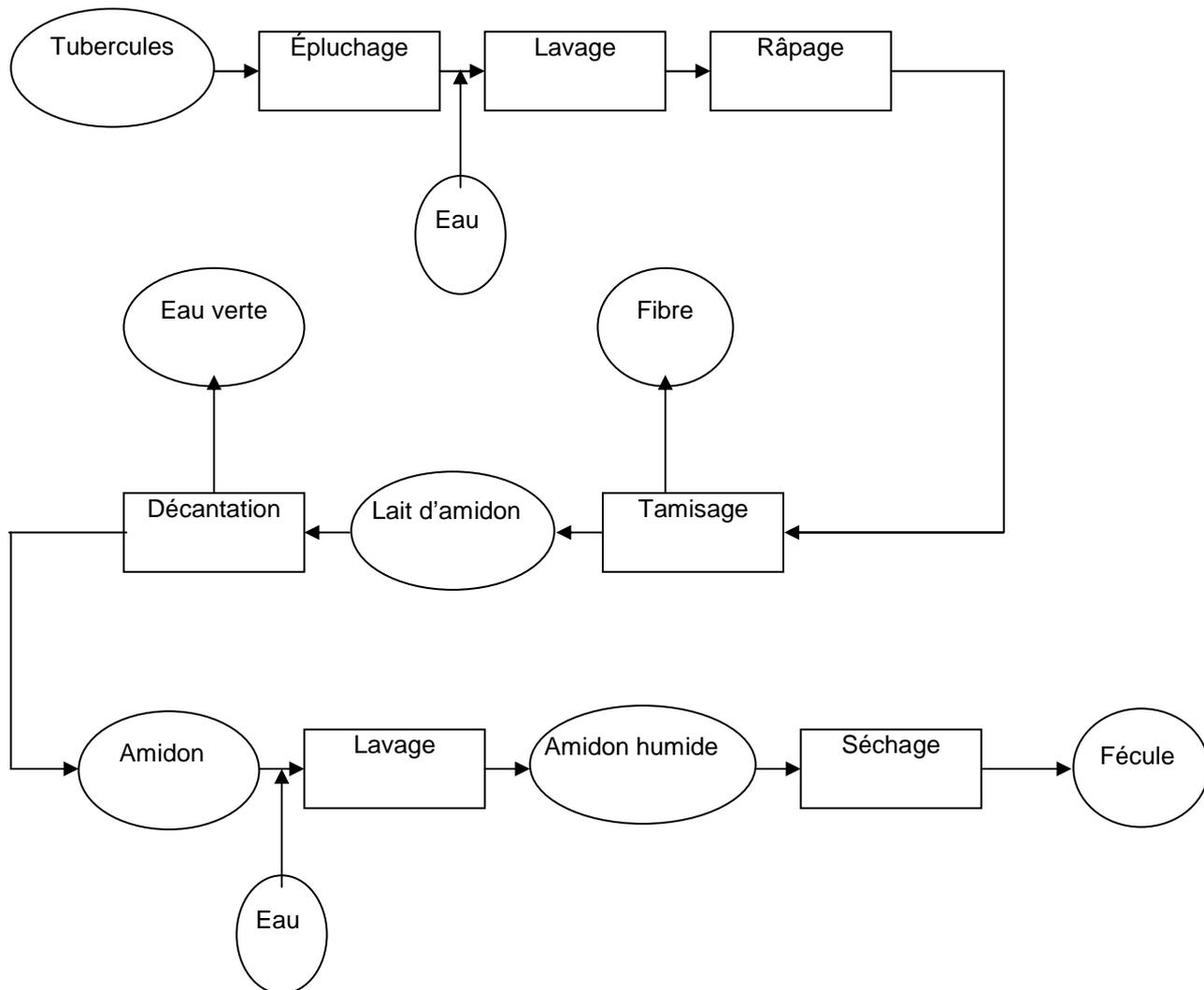
Selon la statistique du Ministère de l'agriculture et de l'élevage, la production de tubercule de manioc dans la province de Toliara dépasse 4 fois celui de la demande, alors qu'il est encore possible d'augmenter la superficie cultivable comme le reflète le tableau qui suit.

Une unité de production de fécula comporte les équipements minima suivants :

- Râpe mécanisée ;
- Filtre tamis ;
- Presse ;
- Bassin de décantation ;
- Séchoir ;
- Hangar de stockage.

L'unité de production de fécula de manioc, en question, pourrait produire environ 2 tonnes de fécula par jour. Il faudrait installer au moins 45 unités de ce genre pour pouvoir satisfaire la demande totale de l'usine.

Le schéma du processus de fabrication de la fécula est le suivant :



## Annexe 9 : Résultat d'analyse de la radioactivité du charbon



Ministère de l'Education Nationale et de la Recherche Scientifique

**Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires  
Madagascar I.N.S.T.N.**

"Le Nucléaire pour la Paix, la Protection de l'Environnement et le Développement Durable."

Directeur Général et Fondateur: **RAELINA ANDRIAMBOLOLONA**  
Professeur Titulaire de classe exceptionnelle



Votre réf :  
Notre réf : 07/04/24/0002/INSTN/DG/ATN/AS

Antananarivo, le 24 avril 2007

### Rapport d'analyse de la radioactivité

Rapport effectué le : 24 avril 2007  
Client : CNRIT  
Type d'échantillon : Charbon de Terre  
Description de l'échantillon : dans une boîte en carton  
Prélèvement : échantillon apporté par:  
RAVONINJATOVO Achille Olivier  
Quantité de l'échantillon : 0,082 kg  
Technique d'analyse : spectrométrie gamma, détecteur HP-Ge  
Mesure effectuée le : 23-04-07 à 16 :22 :41  
Durée de mesure : 54000 s (15 h)

#### Résultat

Famille	Radionucléide	Activité (Bq.kg <sup>-1</sup> )
K-40	K-40	57 ± 12
Th-232		
	Ac-228	18 ± 2
	Pb-212	15 ± 1
	Tl-208	15 ± 2
U-238		
	Pb-214	12 ± 1
	Bi-214	11 ± 1
Radionucléide artificiel	Cs-137	< 2

#### Conclusion :

L'échantillon analysé présente un niveau normal de radioactivité.

p / Le Directeur Général

Le Directeur Technique  
et du Développement

Prof. RAJAOBELISON JOEL

<b><u>Nom et prénoms</u></b>	: RAMAROSON Jean de Dieu
<b><u>Titre</u></b>	: « <b>Contribution à l'étude de la transformation du charbon de terre de la Sakoa en combustible domestique</b> »
<b><u>Nombre de pages</u></b>	: 158
<b><u>Nombre de tableaux</u></b>	: 101
<b><u>Nombre de figures</u></b>	: 25

## **RESUME**

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 de fine de charbon de bois et de fécule de manioc. Le mélange est, ensuite, pressé avec une force de 8.000 kgf. On obtient 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.

Des évaluations socio-économique et financière ont été effectuées pour connaître la rentabilité financière du projet.

Enfin, l'analyse environnementale a été réalisée pour cerner les enjeux environnementaux du projet.

## **ABSTRACT**

The present research proposes domestic fuel that could substitute the vegetable charcoal.

The used raw materials are the coal of earth, the fine of vegetable charcoal and the cassava starch.

The process of transformation consists to the cokéfaction of the coal in 900 °C, during 12 hours. Coke or semi-coke gotten thus is mixed with fine of vegetable charcoal and cassava starch. The mixture is, then, hurried with strength of 8.000 kgf. One gets the briquette of earth coal.

The investigations and tests of cooking have been led by the users to determine their degree of satisfaction opposite the new product.

Of the assessments socioeconomic and financial have been done to know the financial profitability of the project.

Finally, the environmental analysis has been achieved to surround the environmental stakes of the project

**Mots clés** : Charbon de terre - Combustible domestique – EIE – Coke – Gaz à effet de serre

**Directeur de Thèse** : RAKOTOMARIA Etienne, Professeur Titulaire à l'ESPA

**Adresse de l'auteur** : Lot III A 193 Tanjombato, 102 Antananarivo

Tel 033.12.399.40/ 034.02.399.40