
DEDICACES

Je dédie ce document à toutes les personnes qui m'ont accompagnée durant tout mon cursus scolaire, particulièrement ma famille qui m'a toujours soutenue.

Une mention spéciale à ma chère mère qui ne cesse guère de prier pour moi et de me motiver, afin que chaque jour, je sois une meilleure personne.

CITATION

« Cela semble impossible jusqu'à ce qu'on le fasse »

Nelson **MANDELA**

REMERCIEMENTS

Nos remerciements vont tout d'abord à l'encontre de tout le personnel de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (Institut 2iE).

Merci à tout le corps professoral, en particulier celui du département Génie Électrique et Énergétique, pour ces cinq années d'éducation et de formation ;

Nous remercions la responsable du laboratoire Energie Renouvelable et Efficacité Énergétique, Dr. Marie SAWADOGO, qui a accepté nous recevoir au sein du LabEREE pour notre stage de fin de cycle ;

Nos sincères remerciements à mon superviseur et mon encadrante, le Dr. Wennd Kouni Igor OUEDRAOGO et le Dr. Marie SAWADOGO, qui ont accepté diriger notre travail et n'ont fourni d'aucuns efforts dans notre accompagnement et notre encadrement durant ces huit mois de stage ;

Nous remercions également le Pr. Sayon SIDIBE dit Sadio, le Pr. Edem N'TSOUKPOE, le Dr. Aboubacar GOMNA, et tous les doctorants qui nous ont prêté main forte, et qui ont été disposés à répondre à nos questions durant notre stage ;

Aux techniciens du laboratoire, messieurs Innocent TANKOANO et Tahirou SIDI, nous leur disons grand merci pour leur disponibilité, leurs suggestions, leurs conseils et leur aide durant nos manipulations ;

Nous adressons également nos remerciements au Pr. Adamah MESSAN, responsable du Laboratoire d'Eco Matériaux de Constructions de 2iE (LEMC), et au technicien du laboratoire, qui nous ont permis d'effectuer des tests au sein de leur laboratoire ;

Aux stagiaires du laboratoire, Giraud Garsain MZANGA et Marushka Olivia MOUGOLA MIDOUMBOU, Scélé Pape YADE, Sobkika OUASSALET nous leur disons merci pour le chaleureux cadre de travail créé en notre faveur ;

RESUME

Le Burkina Faso regorge une énorme disponibilité de pieds de karité. En 2019, le nombre de pieds était estimé à **280 802 860**. De plus en plus, la filière karité, avec la production du beurre génère d'énormes quantités de déchets. Pour une valorisation annuelle d'amandes estimée à **1 247 295 tonnes**, cette filière génère plus de **210 294,24 tonnes de** tourteaux par an. Les besoins en chaleur des PME et des ménages exerçant dans la filière sont satisfaits par le bois, ce qui exerce une pression sur les ressources forestières et contribue à leur épuisement.

Notre étude porte sur la valorisation des tourteaux de karité en biocombustibles briquettes, qui pourraient être utilisés en substitution du bois de feu dans les PME et ménages, réduisant ainsi leurs dépenses énergétiques.

Une étude de caractérisation a été menée sur les tourteaux de presse et les tourteaux de barattage du karité. Les tourteaux de barattes ont été retenus pour la production des briquettes. Après avoir proposé plusieurs formulations sans liants, et avec liants (amidon de manioc), les meilleures briquettes ont été obtenues avec deux formulations : la formulation D.5.35 soit une teneur en amidon de 5 % de la masse (eau + amidon + tourteaux) et une teneur en eau de 35 % et la formulation D.10.35 soit une teneur en amidon de 10 % et une teneur en humidité de 35 %.

Les caractéristiques physico-chimiques et thermiques des briquettes D.5.35 étaient de 7,07 %, 19,8 MJ/kg, 4,29 %, 963 kg/m³, 662 kPa, 50 %, 83 %, 14,25 %, 152,20 g/l, 34,24 g/min respectivement pour la teneur en eau, le PCI, la teneur en cendre, la densité, la résistance à la compression, la résistance à l'impact et la durabilité, le rendement thermique, la consommation spécifique et la consommation horaire.

Les caractéristiques physico-chimiques et thermiques des briquettes D.10.35 étaient de 6,47 %, 19,45 MJ/kg, 4,17 %, 905 kg/m³, 510 kPa, 35 %, 78 %, 13,35%, 151,74 g/l, 29,43 g/min respectivement pour la teneur en eau, le PCI, la teneur en cendre, la densité, la résistance à la compression, la résistance à l'impact et la durabilité, le rendement thermique, la consommation spécifique et la consommation horaire.

Mots clés :

1. Tourteaux de karité
2. Caractérisation
3. Densification
4. Biocombustibles
5. Briquettes.

ABSTRACT

Burkina Faso has an enormous availability of shea plants. In 2019, the number of vines was estimated at 280 802 860. More and more, the shea sector, with the production of butter, produces enormous quantities of waste. For an annual valuation of almonds estimated at 1,247,295 tonnes, this sector processed more than 210,294.24 tonnes of cake per year. The heat needs of SMEs and households working in the sector are met by firewood, which leads to the clearing of several hectares of forests.

Our study focuses on the valorization of shea cake into biofuel briquettes, which could be used as a substitute for firewood in SMEs and households, thus reducing their economic expenditure.

A characterization study was carried out on press cakes and churn cakes. Churn cakes were selected for the production of briquettes. After having proposed several formulations without binders, and with binders (cassava starch), the best briquettes were obtained with two formulations. D.5.35, with a starch content of 5 % and a water content of 35 % and D.10.35 with a starch content of 10 % and a water content of 35 %.

The physico-chemical and thermal characteristics of briquettes D.5.35 were 7.07%, 19.8 MJ/kg, 4.29%, 963 kg / m³, 662 kPa, 50% 83% 14.25 %, 152.20 g/l, and 34.24 g/min respectively for the water content, the PCI, ash content, density, compressive strength, impact resistance and durability, thermal efficiency specific consumption and hourly consumption.

The physico-chemical and thermal characteristics of briquettes D.10.35 were 6.47%; 19.45 MJ/kg; 4.17%; 905 kg/m³; 510 kPa; 35%; 78%; 13.35%; 151.74 g /l; 29.43 g/min respectively for water content, PCI, ash content, density, compressive strength, impact resistance and durability, thermal efficiency, specific consumption and hourly consumption.

Key words:

1. shea meal
2. characterization
3. densification
4. biofuels
5. briquettes.

Liste des abréviations

<i>LabEREE</i> : Laboratoire Biomasse Energie et Efficacité énergétique	-
<i>PME</i> : Petites et Moyennes Entreprises	
<i>CRA</i> : Centre de Recherche Appliqué	-
<i>CDI</i> : Centre de Développement Industriel	-
<i>PCI</i> : Pouvoir Calorifique Inferieur	<i>MJ/kg</i>
<i>IRI</i> : Indice de Résistance à l'Impact	-
<i>RC</i> : Résistance à la Compression	<i>kPa</i>
<i>L_i</i> : longueur initiale	<i>m</i>
<i>L_f</i> : longueur finale	<i>m</i>
<i>MV</i> : matières volatiles	%
ρ : masse volumique	<i>kg/ m³</i>
<i>m</i> : la masse	<i>kg</i>
<i>v</i> : le volume	<i>m³</i>
<i>S</i> : Section	<i>m²</i>
<i>D</i> : le diamètre en mètre	<i>M</i>
<i>H_{ech}</i> : Teneur en hydrogène	%
<i>H_{anhydre}</i> : Teneur en humidité de la matière sèche	%
<i>Q</i> : quantité de chaleur	<i>J</i>
<i>C_e</i> : Capacité calorifique de l'eau	<i>J/(kg.K)</i>
<i>T_f</i> : Température finale de l'eau	<i>°C</i>
<i>T_i</i> : Température initiale de l'eau	<i>°C</i>
<i>M_{ev}</i> : Masse d'eau évaporée	<i>m</i>
<i>L_v</i> : Chaleur latente évaporation de l'eau	<i>kJ/kg</i>
<i>m_b</i> : Masse de briquelette consommée	<i>kg</i>
η_{th} : efficacité thermique	%
<i>Ch</i> : Consommation horaire	<i>g/min</i>
<i>Cs</i> : Consommation spécifique	<i>g/l</i>
<i>Mmei</i> : masse de la marmite et de l'eau initiale à la phase	<i>kg</i>
<i>Mm</i> : masse de la marmite à vide	<i>kg</i>
<i>Mci</i> : masse de la briquelette initiale	<i>kg</i>
<i>Mcf</i> : masse de la briquelette finale	<i>kg</i>

Figure 1: L'arbre de karité (a) et les fruits frais (b).	3
Figure 2: Les noix de karité (c) et les amandes de karité (d)	3
Figure 3: Carte de la répartition nationale des pieds de karité.	5
Figure 4: Mécanismes de déformation des particules de poudre de biomasses soumises à la pression.	9
Figure 5: Processus de fabrication des briquettes.	13
Figure 6: Grandes étapes de l'étude.	14
Figure 7: Amidon de manioc délayé avec l'eau. Figure 8: Tourteaux d'amandes broyées.	15
Figure 9: Montage de l'analyse thermogravimétrique.	25
Figure 10: Courbes de TG et dTG des tourteaux de presse et de barattes.	29
Figure 11: Briquette C4.	30
Figure 12: Briquette C7.	30
Figure 13: Briquettes C5.	30
Figure 14: Variation de la teneur en eau des formulations et briquettes après 21 jours de séchage.	33
Figure 15: Pouvoir calorifique des briquettes séchées.	34
Figure 16: Teneur en cendre des briquettes suivant les formulations.	34
Figure 17: Densité des briquettes suivant les formulations.	35
Figure 18: Dureté des briquettes suivant les formulations.	36
Figure 19: Résistance à la compression des briquettes suivant les formulations.	37
Figure 20: Résistance des briquettes à l'impact.	37
Figure 21: Variation du rendement thermique en fonction du PCI.	38
Figure 22: Variation du rendement thermique suivant le PCI en fonction des briquettes.	39
Figure 23: Consommation horaire des briquettes.	40
Figure 24: Evolution des fumées durant la combustion des briquettes.	42
Figure 25: Test de résistance à la compression.	58
Figure 26: Aspect des briquettes D.5.50 et D.10.50. Figure 27: Aspect des briquettes D.5.35	58
Figure 28: Aspect des briquettes D.5.60 après séchage. Figure 29: Aspect des briquettes D.10.60 après séchage.	58
Figure 30: Pesse locale à vis conique.	59
Figure 31 : Analyseur thermogravimétrique.	60
Figure 32: Foyer contenant les briquettes avant la combustion. Figure 33 Etat de la flamme 9 minutes après allumage	61
Figure 34: Foyer + marmite. Figure 35: Marmite + Braises + flamme après retrait de la marmite	61
Figure 36: Foyer contenant le charbon du bois. Figure 37: Etat de la flamme 19 minutes après allumage du feu	62
Figure 38: Marmite + Foyer + Braises	62
Figure 39: Foyer contenant des morceaux de bois de chauffe. Figure 40: Marmite + foyer + fumées.	63

Liste des tableaux

Tableau I: Population et potentiel de l'espèce vitellaria paradoxa au Burkina Faso en 2017. ...	4
Tableau II: Comparaison des différents types de presse.	12
Tableau III: Paramètres standards et caractéristiques des briquettes.	14
Tableau IV: Caractéristiques du moteur de la presse.	16
Tableau V: Formulations des briquettes de tourteaux de karité sans liants.	26
Tableau VI: Formulations de briquettes avec liants.	27
Tableau VII: Résultats de la caractérisation des tourteaux de karité et de l'amidon.	27
Tableau IX: Tableau de calcul du PCI des tourteaux de presse.	48
Tableau X: Tableaux de calcul du pouvoir calorifique du charbon de bois.	49
Tableau XI: Tableau de calcul de la résistance à la compression des briquettes sans liants.	49
Tableau XII: Tableau de calcul de l'indice de résistance des briquettes de la formulation D.5.35.	50
Tableau XIII: Tableau de calcul de l'indice de résistance des briquettes de la formulation D.5.35.	50
Tableau XIV: Tableau de calcul de la densité des briquettes de la formulation D.5.35.	50
Tableau XV: Tableau de calcul de la durabilité des briquettes de la formulation D.5.35.	51
Tableau XVI: Tableau de calcul de l'indice de résistance à l'impact des briquettes de la formulation D.5.35.	51
Tableau XVII: Tableau de synthèse des résultats de la caractérisation des briquettes.	51
Tableau XVIII: Résultats des tests d'ébullition de l'eau des briquettes.	52
Tableau XIX: Résultats des tests d'ébullition de l'eau du charbon de bois et du bois de chauffe.	54
Tableau XX: Tableaux des Rendements thermiques des briquettes, du charbon de bois et du bois de chauffe.	55
Tableau XXI: Tableaux des Consommation spécifiques des briquettes, du charbon de bois et du bois de chauffe.	56
Tableau XXII: Consommation horaire des briquettes, du charbon de bois et du bois de chauffe.	57

Table des matières

DEDICACES	i
CITATION	ii
REMERCIEMENTS	iii
RESUME	iv
ABSTRACT	v
Liste des tableaux	viii
INTRODUCTION	1
I. Synthèse bibliographique	3
I.1 Généralité sur la filière karité	3
I.1.1 Présentation de la filière karité et sa disponibilité au Burkina Faso	3
I.1.2 Fabrication de beurre de karité au Burkina Faso et débouchés	6
I.1.3 Tentatives de valorisation des résidus de karité issus de la transformation du beurre de karité (tourteaux et coques de karités)	7
I.2 Densification et production des briquettes	8
I.2.1 Définition de la densification et paramètres de la densification	8
I.2.2 Matériels de densification	10
I.2.3 Types de briquettes et de liants	12
II. Matériels et Méthodes	14
II.1 Matériels	14
II.1.1 Matériels de caractérisation de la biomasse	15
II.1.2 Matériels de production des briquettes	15
II.1.3 Matériels de caractérisation des briquettes	16
II.2 Méthodes de caractérisation des tourteaux et des briquettes	17
II.2.1 Détermination du taux d'humidité (teneur en eau)	17
II.2.2 Détermination de la teneur en huile contenue dans les tourteaux de karité	17
II.2.3 Détermination de la masse de matière volatiles	18
II.2.4 Détermination du taux de cendre	18
II.2.5 Détermination du Pouvoir Calorifique Inferieur	19
II.2.6 Masse volumique des briquettes	21
II.2.7 Test de résistance à la compression des briquettes	21
II.2.8 Test de dureté des briquettes	22
II.2.9 Test de résistance à l'impact	22
II.2.10 Water boiling test simplifié	22
II.2.11 Détermination de l'ATG	25

II.3	Formulations et Production des briquettes	25
II.3.1	Préparation de la biomasse	25
II.3.2	Densification de la biomasse sans ajout de liants	26
II.3.3	Densification de la biomasse avec ajout de liant (amidon de manioc)	26
III.	Résultats et discussion.....	27
III.1	Caractérisation des résidus du karité et de l'amidon.....	27
III.2	Analyse thermogravimétrique des tourteaux de presse et de barattes	28
III.3	Formulation de briquettes	29
III.3.1	Description de l'aspect physique des briquettes	29
III.3.2	Caractérisation physicochimique des briquettes	32
III.3.3	Tests physico-mécaniques des briquettes.....	35
III.3.4	Test d'ébullition de l'eau.....	38
IV.	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	43
V.	BIBLIOGRAPHIE	45
	Annexes	48

INTRODUCTION

Au Burkina Faso, la croissance démographique entraîne une augmentation des besoins énergétiques. Plus de 90% du bois coupé sert de bois de chauffe dans les ménages et de source de chaleur pour des besoins des petites et moyennes entreprises (PMEs). Par an, il est estimé qu'environ 250 000 hectares de forêt sont détruits pour satisfaire les besoins en bois de chauffe (Ozer 2004). La ressource en bois se raréfie d'année en année, ce qui entraîne une augmentation des prix. Cette ressource est donc une charge économiquement importante pour les PME. Pour satisfaire leurs besoins énergétiques, les PME font recours aux combustibles fossiles (gaz butane), au bois de chauffe ou à l'électricité. L'utilisation de combustibles fossiles entraîne l'émission de grandes quantités de gaz à effet de serre (GES), des impacts sur la santé des êtres vivants et les changements climatiques.

Par ailleurs, les industries agroalimentaires produisent des déchets qui sont de potentielles sources d'énergie renouvelable. La filière karité connaît de plus en plus un essor ; sa transformation est source de revenus de plusieurs familles au Burkina. La disponibilité de la ressource est estimée à **280 802 860 pieds** (Agence pour la Promotion des Exportations du Burkina 2019) soit **1 247 295 tonnes** d'amandes à valoriser (KABORET, SAMA, and ZAMBELONGO 2018). La transformation d'une aussi importante quantité d'amande en beurre entraîne d'importants besoins en énergie (chaleur et électricité). Le bois de chauffe reste la source première de chaleur, bien que cela entraîne d'importantes dépenses pour les PME et la destruction du couvert végétal. La filière karité, dans la production de beurre, génère des résidus constitués de coques et de tourteaux d'amandes de karité. Environ 32% du potentiel en terme d'amande est valorisé, soit **404 412 tonnes** (KABORET, SAMA, and ZAMBELONGO 2018). L'extraction du beurre de karité se fait suivant 3 processus :

- Le premier, appelé extraction artisanale représente la plus ancienne forme d'extraction. Elle se fait à la main ou à l'aide d'une baratte artisanale plus ou moins évoluée. Ce processus génère comme résidus les tourteaux de baratte, appelés boues de barattage.
- L'extraction mécanique ou semi-industrielle est en plein essor. Elle se fait grâce aux presses et génère comme résidus les tourteaux de presse.
- L'extraction au solvant est la forme la moins développée compte tenu de la complexité de la méthode et des coûts que cela engendre.

Selon le procédé d'extraction, les tourteaux issus de la transformation du beurre de karité représentent entre 52 % et 57 % de la masse d'amandes (Alés 2019; KABORET, SAMA, and

ZAMBELONGO 2018) soit plus de **210 294,24 tonnes** de tourteaux d'amandes de karité par an. Ces résidus sont utilisés en substitution du bois de chauffe, mais pas de manière optimale. En effet, la non-uniformité des blocs les rend parfois inadaptés aux foyers améliorés créant une combustion non uniforme. De plus, leur faible densité entraîne des problèmes de manutention, de transport et de stockage (les blocs se brisent facilement et occupent beaucoup trop d'espace pour une faible masse). Par ailleurs, la combustion produit de faibles quantités de charbon. Malheureusement, malgré les politiques adoptées pour la promotion de la filière karité, très peu d'études sont menées sur le sujet de la valorisation énergétiques des résidus. Toutefois, plusieurs voies de valorisation sont possibles. Dans le cadre de ce mémoire, il sera question d'étudier les possibilités de valorisation des tourteaux d'amandes de karité en biocombustibles briquettes, plus appropriés aux foyers améliorés (dans les ménages et au sein des PME), substituables au bois de feu, avec un meilleur potentiel énergétique. Une briquette de biomasse est un biocombustible issu d'un processus de compactage ou de densification qui permet d'augmenter la masse volumique d'une biomasse (Grover and Mishra 1996; CDI and CRA 1993). D'après la norme EN 14961, la valeur de la masse volumique devrait être supérieure ou égale à 900 kg/m^3 . Ces propriétés dépendent du type de biomasse, des intrants ainsi que des paramètres de densification.

Dans le cadre de notre étude, nous nous intéresserons aux tourteaux de barattes et aux tourteaux de presse. Il s'agira spécifiquement de :

- Caractériser et comparer les propriétés physico-chimiques des résidus de la transformation des amandes de karité obtenu par presse et barattage ;
- Formuler et caractériser des biocombustibles briquettes obtenus des résidus bruts avec et sans liants.

Ce document est subdivisé en trois grandes parties. La première partie portera sur la synthèse bibliographique de la thématique de notre travail. La deuxième partie présentera le matériel et les méthodes utilisés pour atteindre nos objectifs. La troisième partie portera sur l'analyse et la discussion des résultats obtenus.

I. Synthèse bibliographique

I.1 Généralité sur la filière karité

I.1.1 Présentation de la filière karité et sa disponibilité au Burkina Faso

Le karité est un arbre tropical qui pousse uniquement en Afrique. De l'ordre des Ericales, ses fruits sont comestibles et les amandes de ses noix sont utilisées pour la fabrication du beurre de karité. Cet arbre pousse dans les savanes arborées de l'Afrique de l'Ouest et de l'Afrique centrale. (Alés 2019; Agence pour la Promotion des Exportations du Burkina 2019).

Grand de 12 à 20m, le karité « vitellaria paradoxa » donne ses premiers fruits à 15 ans et atteint sa maturité à 25 ans ou 30 ans (Pages 2009). Il a une espérance (Burkina karité) de vie de plus de deux (02) siècles. Il produit 15 à 20kg de fruits frais par pied et sa production maximale se situe entre 50 ans et 100 ans (Pages 2009).



Figure 1: L'arbre de karité (a) et les fruits frais (b).

La floraison a lieu en saison sèche et la cueillette en saison pluvieuse, entre Juin et Septembre. Son diamètre peut atteindre 1 m voire plus. Ces fruits se présentent sous forme de grappes de fruits ovoïdes de 4 à 8 cm de long. Ce sont des baies charnues renfermant des noix de couleur brune, qui représentent entre 45% et 50% de la masse du fruit (Pages 2009).



Figure 2: Les noix de karité (c) et les amandes de karité (d)

En matière de disponibilité, le Burkina Faso regorge plus de **280 millions** de pieds de karité, dont 68% restent inexploités. Les peuplements les plus denses sont dans le Centre-Ouest, la Boucle du Mouhoun, les Hauts-bassins et le Sud-Ouest (Alés 2019). Il est le deuxième pays exportateur après le Nigeria. Par contre, en matière de qualité des produits, le Burkina Faso occupe le premier rang (Agence pour la Promotion des Exportations du Burkina 2019). En effet, il existe deux (02) espèces de karité : l'espèce « vitellaria paradoxa » (la variété disponible au Burkina Faso) et l'espèce « vitellaria nilotica ». En termes de qualité, l'espèce « vitellaria paradoxa » est celle qui fournit les éléments les plus recherchés (Agence pour la Promotion des Exportations du Burkina 2019). En effet, le beurre issu de cette espèce à un point de fusion plus élevé et contient de la stéarine en grande quantité (Alés 2019). Ce qui fait du beurre de karité burkinabè, la qualité la plus recherchée dans les industries mondiales cosmétique, agroalimentaire, pharmaceutique. D'après le rapport de l'étude sur les aspects socioéconomiques des filières prioritaires des produits Forestiers non ligneux (KABORET, SAMA, and ZAMBELONGO 2018) diligentée par le Ministère en charge de l'environnement, plus de 1 247 295 de tonnes d'amandes sont produites par an avec un taux d'exploitation de 32%. Le tableau I présente la répartition du karité au Burkina Faso.

Tableau I: Population et potentiel de l'espèce vitellaria paradoxa au Burkina Faso en 2017.

REGIONS	Peuplement d'arbres de Karité		Potentiel		Potentiel réellement exploité
	Nombre de pieds	Pourcentage (en %)	Tonnes d'amandes de Karité	Pourcentage (en %)	Tonnes d'amandes de karité
Boucle du Mouhoun	29 586 960	10,54	166 119	13,32	80 060
Cascades	43 935 223	15,65	252 119	20,21	75 636
Centre	2 541 136	0,9	3 099	0,25	930
Centre-Est	8 475 318	3,02	10 335	0,83	3 100
Centre-Nord	2 007 043	0,71	2 447	0,2	734
Centre-Ouest	43 455 260	15,48	211 978	17	63 593
Centre-Sud	19 819 308	7,06	56 628	4,54	16 988
Est	34 892 868	12,43	42 548	3,41	12 765
Hauts Bassins	45 466 080	16,19	255 274	20,47	76 582

Nord	4 610 532	1,64	5 830	0,47	1 749
Plateau Central	3 965 164	1,41	4 835	0,39	1 451
Sahel	0	0	0	0	0
Sud-Ouest	42 047 965	14,97	236 083	18,93	70 825
National	280 802 860	100	1 247 295	100	404 412

Source : (Agence pour la Promotion des Exportations du Burkina 2019).



Figure 3: Carte de la répartition nationale des pieds de karité.

Dans l'espace CEDEAO, le Burkina Faso est le premier pays producteur-exportateur de karité. En 2017, sa part d'exportation était estimée à 50% (Agence pour la Promotion des Exportations du Burkina 2019) pendant que celles du Mali, du Nigeria étaient estimées à moins de 15%. Les amandes sont exportées à travers le monde, en particulier vers le Danemark, l'Espagne, le Singapour, les Pays-Bas, la Malaisie, l'Inde, le Ghana et le Togo.

Le karité est valorisé aussi bien dans l'alimentation que dans le cosmétique et dans la médecine. Allant des racines jusqu'aux feuilles, passant par l'écorce, les fruits et les fleurs, toutes les parties du karité sont exploitées. Les racines sont utilisées dans la pharmacopée, les fleurs et les feuilles sont utilisées comme huiles essentielles tandis que les fruits sont consommés et les amandes utilisées pour la fabrication du beurre.

I.1.2 Fabrication de beurre de karité au Burkina Faso et débouchés

Au Burkina Faso, il existe trois modes de fabrication du beurre de karité. La fabrication traditionnelle, la fabrication semi-industrielle et la fabrication industrielle.

I.1.2.1 Technique traditionnelle d'extraction du beurre de karité

Le beurre de karité au Burkina Faso est majoritairement extrait de façon traditionnelle. Une fois les noix de karité collectées, elles sont portées à ébullition environ 1 à 2 heures de temps, afin d'activer les lipases des micro-organismes. Ensuite, elles sont séchées au soleil durant 5 à 8 jours (Womeni et al. 2007) afin de réduire la teneur en eau et conservées dans des endroits secs. Lorsque vient le moment de produire le beurre, elles sont décortiquées grâce à des mortiers. Les amandes sont triées et lavées. Après un séchage au soleil (deux ou trois jours), elles sont concassées dans des mortiers, torréfiées dans de grandes marmites avec du bois de chauffe et moulues dans des mortiers ou grâce à des pierres servant de moulins traditionnels. Il en résulte une pâte à beurre épaisse et maronne, à laquelle est ajoutée de l'eau, puis pétrie à la main (barattage) jusqu'à ce qu'elle ait un aspect blanchâtre. Plus la pâte est fine et molle, meilleur sera le rendement d'extraction. Une fois le barattage terminé, la pâte est immergée dans de l'eau, ce qui entrainera une séparation du beurre (flottant) et des impuretés (boue de barattage). La couche flottante est recueillie et lavée plusieurs fois à l'eau chaude ou tiède, et rincée également avec de l'eau froide. Une fois refroidi, le beurre de karité brut est bien malaxé et mis au feu pour une cuisson, durant deux heures environ (utilisation de bois de chauffe ou de tourteaux), afin d'obtenir un beurre mieux purifié et débarrassé d'une importante quantité d'eau. Il est ensuite refroidi dans desalebasses et conservé. La technique d'extraction traditionnelle présente parfois des variantes d'une association à une autre, d'une famille à une autre, mais reste très proche de celle décrite. Le travail est pénible, énergivore et surtout long à réaliser. La qualité du produit final varie d'un lot de production à un autre, d'une association à une autre.

I.1.2.2 La fabrication semi-industrielle ou technique d'extraction mécanique du beurre par presse

Une autre façon d'extraire le beurre de karité des amandes est l'utilisation de la presse. Dans cette technique, les paramètres de pression, de température et de temps sont encore mieux définis. Il est aisé de contrôler la production et prévoir la qualité du beurre. Les amandes de karité sont lavées, séchées, concassées et torréfiées durant 30 à 60 minutes sous une température allant de 70°C à 90°C. Elles sont ensuite versées dans la trémie d'approvisionnement de la

presse, d'où sortent l'huile et les tourteaux de deux orifices distincts. Il existe sur le marché plusieurs types de presses, mais les plus utilisées pour l'extraction de l'huile sont les presses hydrauliques car elles présentent de meilleurs rendements, environ 43%. Toutefois, des études réalisées à Bobo Dioulasso ont montré que le rendement d'extraction pourrait être amélioré au-delà de 80%, en variant les paramètres de température, de pression et de granulométrie de la biomasse (Yé et al. 2007). La quantité d'huile résiduelle dans les tourteaux varie en générale entre 6% et 14%.

1.1.2.3 La fabrication industrielle ou technique d'extraction par solvant

Ce procédé d'extraction du beurre de karité est basé sur l'utilisation de solvants. Il s'agit d'ester de pétrole, de chloroforme, de benzène et de n-hexane. D'après une étude menée par Iddrisu Abdul-Mumeen et al. sur les techniques d'extraction de beurre de karité au Ghana, le n-hexane serait le meilleur solvant car il permettrait l'extraction d'une plus importante quantité d'huile (Iddrisu, Didia, and Abdulai 2019). L'extraction du beurre de karité au n-hexane consiste à faire passer l'hexane (solvant) dans la mouture d'amandes. Cela permet une meilleure extraction, avec un rendement pouvant atteindre 99%. La quantité d'huile résiduelle dans les tourteaux varie entre 0,5% et 0,7%. Cette technique est la moins répandue du fait des coûts qu'elle entraîne. A l'échelle industrielle, certaines entreprises à Bobo Dioulasso extraient le beurre de karité à l'hexane.

1.1.3 Tentatives de valorisation des résidus de karité issus de la transformation du beurre de karité (tourteaux et coques de karités)

Il est estimé qu'environ 51 % de l'espace national est favorable à la culture du karité. Mais, d'après les travaux de Dimobe (Dimobe et al. 2020), les arbres de karité pourraient perdre 14,94% de leur espace favorable. Cela s'expliquerait par les différents changements climatiques. En 2017, la quantité d'amandes valorisées était estimée à 404 412 tonnes. En 2019, cette quantité a été estimée entre 400 000 tonnes et 600 000 tonnes (Agence pour la Promotion des Exportations du Burkina 2019). La transformation du beurre de karité produit des déchets (coques et boues de barattages). La production traditionnelle de beurre de karité générerait environ 52 % de déchets (boues de barattage humide de 33 %) contre 57 % pour l'extraction mécanique (Alés 2019; KABORET, SAMA, and ZAMBELONGO 2018). Partant sur la base de 52 % de déchets sur la quantité d'amandes valorisée, la quantité de tourteaux issue de la transformation de karité est estimée à **210 294,24** tonnes par an. L'extraction du beurre de karité est énergivore. Bien que le bois de feu, soit la source d'énergie la plus utilisée, les groupements et associations producteurs de beurre de karité réutilisent parfois les tourteaux séchés dans des

foyers tout au long du processus de production du beurre. Toutefois, cette utilisation n'est pas optimisée car le combustible à un faible potentiel énergétique dû à la faible masse volumique. De plus, les consommations spécifiques et horaires sont élevées par rapport au bois de feu. Il existe des études sur l'optimisation de la production du beurre, sur la production de charbon actifs (Tchakala et al. 2012) grâce aux tourteaux de karité (Noumi, Dabat, and Blin 2012).

1.2 Densification et production des briquettes

1.2.1 Définition de la densification et paramètres de la densification

La densification, est l' « ensemble de traitement physiques, appliqués aux végétaux ou au débris végétaux, qui visent à l'obtention d'éléments solides caractérisés par une masse volumique élevée » (CDI and CRA 1993). Elle peut être aussi définie comme étant « un ensemble de technologies de conversion de la biomasse en combustibles » (Grover and Mishra 1996). On parle également de briquetage pour désigner les méthodes de la densification qui donnent comme résultats, les briquettes. La densification peut se faire par ajout de liants ou sans ajout de liants. Dans le premier cas, la cohésion entre les particules de biomasse est soutenue par l'ajout du liant, et dans le second cas, il s'agit uniquement d'appliquer une certaine pression à la biomasse pour avoir un résultat plus dense. La pression due au compactage crée des forces de Van Der Waals permettant l'agglomération des particules (Grover and Mishra 1996; CDI and CRA 1993).

En effet, certains résidus de biomasse issus des transformations de l'agro-industrie sont utilisés comme combustibles. Mais le transport de ces sous-produits engendre d'énormes dépenses du fait de la masse volumique peu élevée, et de la fragilité de la biomasse. De plus, leur potentiel énergétique est faible. En outre, du fait de la faible cohésion entre les particules, une grande quantité de chaleur est délivrée durant la période de flammes, lors de la combustion. Mais cette combustion produit une faible quantité de braises, et la chaleur est moins importante que celle délivrée par les braises de bois (CDI and CRA 1993). La densification rend la biomasse plus dense, plus solide, réduit les problèmes de transport, de stockage, et améliore le potentiel énergétique de la biomasse et la masse volumique (Grover and Mishra 1996; CDI and CRA 1993).

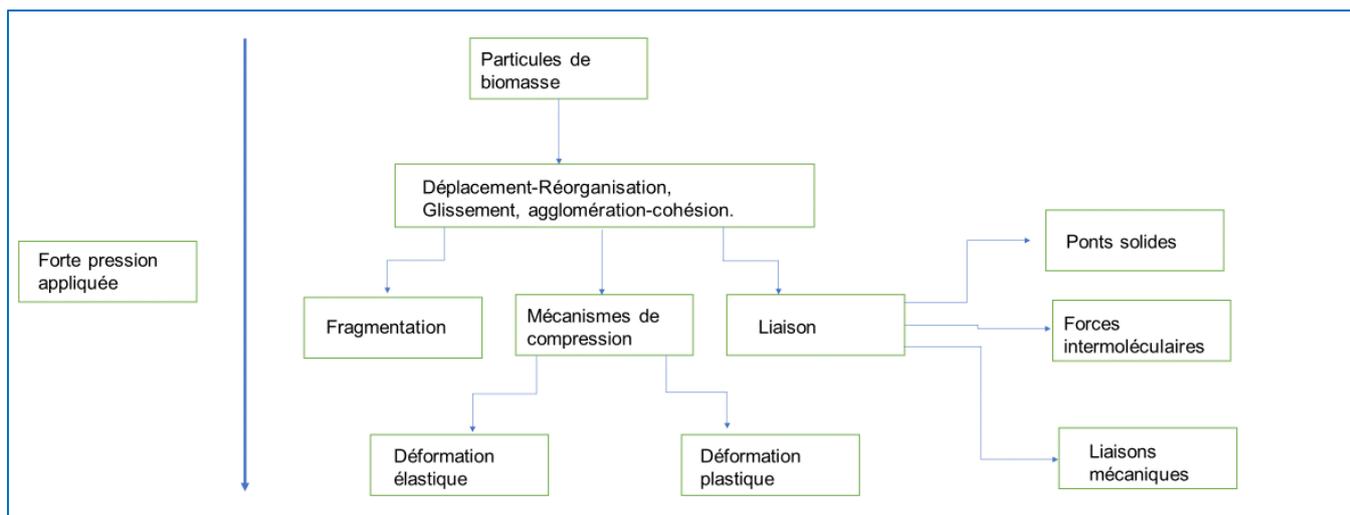


Figure 4: Mécanismes de déformation des particules de poudre de biomasses soumises à la pression.

Sources : (Tumuluru et al., 2011)

Pour une bonne densification, il est important de maîtriser les paramètres liés à la teneur en eau, la granulométrie des particules de biomasse, la pression, la nature et la quantité de liants utilisés. D'autres paramètres comme la teneur en cendre, en protéine, en fibre, en lignine peuvent influencer sur la qualité de la densification.

➤ Effet de l'eau

L'eau est un composé capital dans le processus de densification de la biomasse, elle facilite l'adhésion des particules hydrosolubles contenus dans la biomasse. La qualité des briquettes dépend des paramètres de la densification ; la teneur en eau de la biomasse est idéalement comprise entre 8 et 15% (CDI and CRA 1993). Des études menées par Mani ont indiqué que pour les épis de maïs broyées, les briquettes les plus dures et les plus denses sont obtenues pour une teneur en eau comprise entre 5 % et 10 % (Mani, Tabil, and Sokhansanj 2006). En effet, les résultats obtenus dans cette étude montrent que pour une teneur en eau inférieure à 5 %, les briquettes sont très peu solides et se brisent lors du transport, et pour une teneur en eau supérieure à 15 %, il en résulte l'apparition de moisissures. Plusieurs autres études menées sur d'autres biomasses s'alignent dans cet intervalle. La quantité initiale de l'eau doit donc être choisie de manière à ce que la teneur finale soit comprise dans l'intervalle indiquée. Toutefois, il est important de souligner qu'en fonction du type de presse utilisée pour la confection des briquettes, une quantité admissible d'eau est indiquée. D'après Grover et Mishra, une biomasse appropriée pour la densification devrait avoir une teneur en eau comprise entre 10 % et 15 % (Grover and Mishra 1996).

➤ Effet des protéines et des matières grasses

Les protéines contenues dans la biomasse, sous l'effet de la température et de la pression lors de la densification, développent une plasticité et se comportent comme des liants, ce qui augmente la dureté et la durabilité de la biomasse densifiée (Briggs et al. 1999). Toutefois, plus la biomasse est riche en huile, plus la durabilité des produits densifiés diminue. D'après Briggs et ses collaborateurs qui ont travaillé sur les tourteaux de soja et de maïs, la durabilité diminue considérablement lorsque la teneur en huile excède 7,5 %.

➤ Effet de la lignine

La lignine également a des propriétés de liants. Sous forte température, elle favorise la liaison des particules, ce qui augmente la durabilité et la résistance des produits densifiés (Kaliyan and Vance Morey 2009). Plus la biomasse contient de la lignine, meilleure est la densification (Kers et al. 2010).

➤ Taille des particules

La taille des particules soumises à la densification peut avoir un effet sur la durabilité des produits finaux. D'après *Kaliyan* et *Vance Morey*, plus les particules sont fines, plus elles tolèrent l'humidité et plus les produits issus de la densification ont une meilleure durabilité (Kaliyan and Vance Morey 2009). La taille des particules peuvent varier d'une biomasse à une autre et d'une presse à une autre. Plusieurs auteurs s'accordent sur une granulométrie comprise entre 0,5 mm et 1 mm. Au-delà de 1 mm, les briquettes pourraient présenter des fissures (Kaliyan and Vance Morey 2009).

➤ Pression et température

La pression et la température ont des effets sur la densification. Ces paramètres varient en fonction de type de presse, et du type de biomasse. La température varie généralement entre 280 et 290 °C (Grover and Mishra 1996). Lorsque la température est inférieure à 280 °C, la densification nécessite une forte pression allant de 100 à 1500 bars (Grover and Mishra 1996). D'après les travaux de Kers, suivant la pression, nous avons la densification à faible pression, entre 300 et 600 bars, et la densification à forte pression, entre 1200 et 2500 bars (Kers et al. 2010). La densité des produits finaux dépend fortement de ces deux paramètres.

1.2.2 Matériels de densification

La densification se fait grâce à une presse. Il existe plusieurs types de presses. La forme des briquettes, la taille, et la granulométrie dépendent du type de presse.

➤ Presse manuelle

La pression de la densification est fournie par un système de levier qui s'actionne manuellement. (Grover and Mishra 1996). Pour obtenir une meilleure cohésion des particules, il est essentiel d'utiliser des liants comme la gomme arabique ou l'amidon. En effet, la faible pression exercée sur la biomasse ne permet pas une importante déformation de la matière. Ce qui explique la mauvaise cohésion.

➤ Presse à piston

La matière est poussée dans un cylindre doté d'un étranglement conique. Le compactage est dû à l'accumulation de la matière dont la progression est freinée au niveau de l'étranglement (Grover and Mishra 1996). Le mouvement résulte de l'énergie transmise au piston par un moteur électrique par le biais d'un système hydraulique de fluide à haute pression (en général de l'huile) (Grover and Mishra 1996). Ce principe de fonctionnement implique de faible température, donc une faible cohésion de la matière, d'où des briquettes de faible qualité. La presse à piston tolère une biomasse dont l'humidité est comprise entre 12 et 16 % et dont la granulométrie comprise entre 10 et 15 mm (CDI and CRA 1993). D'après *Grover* et *Mishra* la teneur en humidité admise est comprise entre 10 et 15 % (Grover and Mishra 1996).

➤ Presse à vis conique et presse à vis et à manteau chauffant

La densification de la biomasse dans le cas de la presse à vis conique est effectuée grâce à une vis conique qui compacte la matière au cours de sa progression ; tandis que dans le cas de la presse à vis et à manteau chauffant, la densification est due à la poussée et au chauffage de la matière par une vis cylindrique dont la pression et la température sont réglables. Ces principes de fonctionnement impliquent une forte élévation de température. La presse à vis conique tolère la biomasse dont la teneur en humidité est inférieure à 10 % et dont la granulométrie est comprise entre 6 et 12 mm (CDI and CRA 1993). D'après *Grover* et *Mishra* la teneur en humidité admise est comprise entre 8 et 9 % (Grover and Mishra 1996). La presse à vis et à manteau chauffant par contre tolère plus l'humidité de la matière. La qualité très appréciable des briquettes produites par ces types de presse, les rendent convenables pour des usages domestiques.

➤ Presse à granuler ou Pelletiseur

La densification de la matière est due à une pression fournie par des rouleaux. Les briquettes sont extrudées au travers d'un anneau, et donc se présentent sous forme d'anneaux et sont

couramment appelés pellets. Cette technologie tolère une biomasse dont la granulométrie est comprise entre 3 et 6 mm (CDI and CRA 1993). La presse à granuler est généralement utilisée pour le comptage de résidus de la filière agro-industrielle, pour la consommation du bétail. Le tableau II récapitule et compare différents types de presses.

Tableau II: Comparaison des différents types de presse.

Caractéristiques	Presse à piston	Presse à vis conique	Presse manteau chauffant	Presse manuelle
Humidité de biomasse	10-16%	8-9%	> 9 %	-
Pression	Forte	Forte	Forte	Faible
Dépense énergétique	50kWh/tonne	60kWh/tonne	60kWh/tonne	-
Densité de la brique	1 à 1,2 kg/cm ³	1 à 1,4 kg/ cm ³		-
Performance de combustion des briquettes	Pas très bien	Très bien	Très bien	-
Homogénéité des briquettes	Non-homogène	Homogène	Homogène	Non-homogène sans liants
Diamètre	50 à 100 mm	25 à 100 mm	50 mm	Variable
Capacité	50 à 1000 kg/h	500 à 1000 kg/h	50 à 600 kg/h	±25 kg/h

Sources : (Grover and Mishra 1996; CDI and CRA 1993).

1.2.3 Types de briquettes et de liants

Les briquettes sont des biocombustibles, obtenus par densification (compactage) d'une biomasse lignocellulosique qui pourraient être utilisés en substitution du bois de chauffe. D'après le guide fourni par le CDI et le CRA sur les briquettes à base de déchets végétaux (CDI and CRA 1993), elles se présentent sous plusieurs formes ; cylindriques, parallépipédique ou hexaédriques. Il arrive parfois de voir des briquettes en rondelles. Les diamètres varient entre 8 mm et 150 mm. Les briquettes cylindriques sont les plus répandues. Les briquettes peuvent être produites avec de la matière brute sans traitement thermique préalable, ou avec de la matière ayant subi une carbonisation.

Les briquettes sans liants sont obtenues par compactage de la biomasse ajoutée à de l'eau. La cohésion des molécules est due dans ce cas à la hausse de température et la pression exercées

par la presse. Pour augmenter les forces de cohésion entre les particules, des liants organiques sont souvent utilisés ; il s'agit de l'amidon de manioc, l'amidon de maïs, la gomme arabique, la mélasse. Certains liants inorganiques comme l'argile peuvent également être utilisés. La nécessité d'utiliser les liants dépend qu'il s'agisse d'une matière brute ou d'une matière carbonisée (char). Mélangés à de l'eau, sous l'effet de la température, la gomme arabique et l'amidon de manioc développent une plasticité. Cette plasticité entraîne une meilleure cohésion des particules de biomasse. En général, l'argile est peu utilisée car elle ne brûle pas et donc réduit considérablement le pouvoir calorifique des briquettes. Les liants les plus utilisés sont la gomme arabique et l'amidon. Toutefois, le coût plus élevé de la gomme arabique fait de l'amidon le premier choix en matière de densification.



Figure 5:Processus de fabrication des briquettes.

Source :Adapté de Cleaner production in Burkina Faso : Case study of fuel briquettes made from cashew industry wastes (Sawadogo et al. 2018).

La qualité des briquettes, qu'elles soient produites sans liants ou avec liants se mesure suivant plusieurs paramètres ; l'indice de d'inflammation, le rendement thermique de combustion, la consommation horaire, la consommation spécifique, le taux d'humidité, le taux de cendre, le pouvoir calorifique. Les résistances à l'impact et à la compression, la durabilité (dureté), l'inflammabilité, la densité sont également des paramètres de mesure de la qualité qui sont influés par la pression de la densification, la température de la densification, la granulométrie de la biomasse, la qualité et la quantité du liant, la teneur de l'eau (Tumuluru et al. 2011). Le tableau III est une synthèse de paramètres caractéristiques physico-chimiques et énergétiques des briquettes.

Tableau III: Paramètres standards et caractéristiques des briquettes.

Caractéristiques	Valeurs standard	Sources
Teneur en eau	$\leq 15 \%$	Norme EN 14961
Taux de cendre	$\leq 4 \%$	(Grover and Mishra 1996)
Pouvoir calorifique inférieur	$\geq 4,15 \text{ kWh/kg}$	Norme EN 14961
Masse volumique	900kg/m ³	Norme EN 14961
Indice d'inflammation	30-60	(CDI and CRA 1993)
Resistance à l'impact	50	(CDI and CRA 1993)
Résistance à la compression	350 kPa	Norme EN 14961

II. Matériels et Méthodes

Dans cette partie matériels et méthodes, il est question de présenter tout le processus de notre travail, allant de la collecte de la biomasse à production et la caractérisation des briquettes. Le schéma ci-dessous présente les étapes de notre étude.

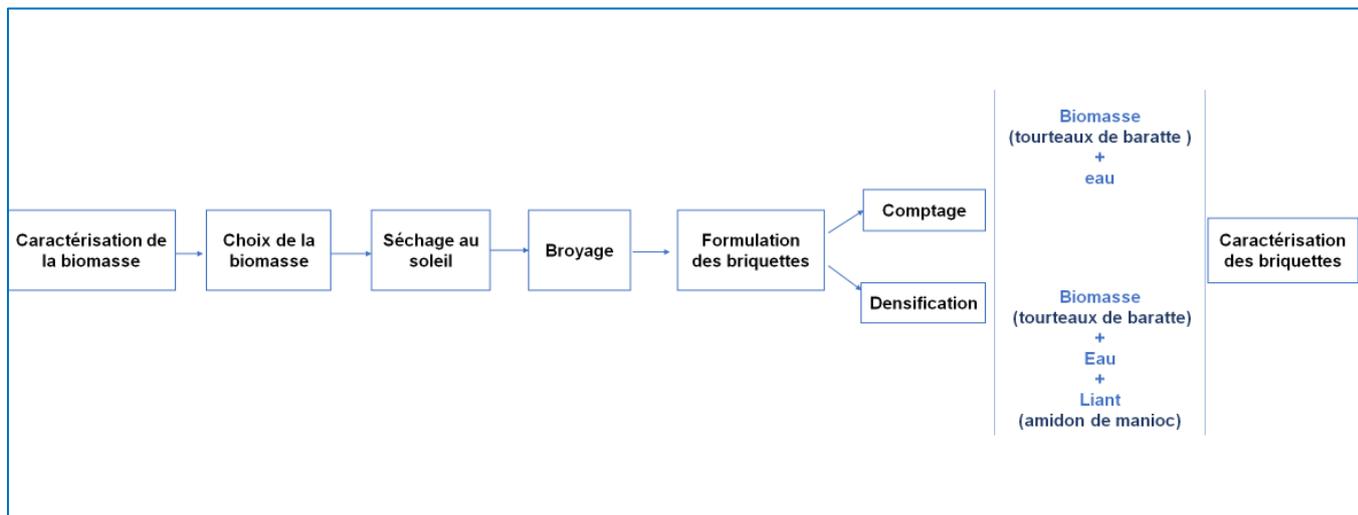


Figure 6:Grandes étapes de l'étude.

II.1 Matériels

Le beurre de karité considéré dans notre étude est obtenu par deux méthodes ; la méthode traditionnelle, l'extraction par presse. Nous avons procédé à une collecte de tourteaux de presse, recueillis auprès de l'association Wendlasida de Arbolle, et une collecte de boue de barattage

recueillie auprès d'une productrice indépendante à Ouagadougou. Nous avons utilisé comme liant l'amidon de manioc, vendu au marché.

II.1.1 Matériels de caractérisation de la biomasse

Une fois la biomasse collectée, une caractérisation est réalisée au laboratoire afin de déterminer les paramètres tels que la teneur en humidité, la teneur en matière volatile, le taux de cendre, la teneur en huile résiduelle, le potentiel énergétique. Un certain nombre de matériels a été utilisé à savoir :

- Une étuve $105^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ pour le séchage des échantillons et la détermination de la teneur en humidité ;
- Un four à moufle pour la détermination de la teneur en matières volatiles et la teneur en cendre ;
- Un dessiccateur contenant de la silice permettant de refroidir les échantillons sans qu'ils ne prennent de l'humidité ;
- Un calorimètre adiabatique pour la détermination du pouvoir calorifique des tourteaux ;
- Un montage au Soxhlet et de l'hexane pour l'extraction de l'huile résiduelle contenue dans les tourteaux ;
- Un évaporateur rotatif pour la séparation de l'huile et de l'hexane après extraction ;
- Analyseur thermogravimétrique SETSYS-1750 pour la détermination de la perte de masse ;
- Une balance analytique pour les mesures de masses.

II.1.2 Matériels de production des briquettes

Les matières entrantes dans la production des briquettes sont les tourteaux de karité, l'eau et le liant qui dans notre cas est de l'amidon de manioc (confère figure 7 et 8).



Figure 7: Amidon de manioc délayé avec l'eau.



Figure 8: Tourteaux d'amandes broyés.

Nous avons également utilisé une balance pour la mesure de masse, une plaque chauffante pour la gélatinisation de l'amidon. Pour la production des briquettes, nous avons utilisé une presse locale à vis conique (Annexe 14 : Figure 30:Pesse locale à vis conique.). Les paramètres de la presse sont définis dans le tableau IV.

Tableau IV: Caractéristiques du moteur de la presse.

Puissance du moteur	1,5 kW
Nombre de tours/minute	1500 trs/min
Rapport de réduction	1/45
Capacité de production	50 kg/h

II.1.3 Matériels de caractérisation des briquettes

Afin de mieux évaluer la qualité des briquettes, après séchage, elles sont soumises à des tests chimiques, thermiques et physico-mécaniques. Les tests chimiques, thermiques, et physiques ont été réalisés grâce aux appareils du LabEREE. Par contre, les tests physiques ont été réalisés au laboratoire Génie Civil.

- Une étuve $105^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ pour le séchage des échantillons et la détermination de la teneur en humidité ;
- Un four à moufle pour la détermination de la teneur en matières volatiles et la teneur en cendre ;
- Un calorimètre adiabatique pour la détermination du pouvoir calorifique des tourteaux ;
- Un décimètre pour présurer la hauteur de suspension des briquettes ;
- Une balance de précision ;
- Tamis de 20 mm ;
- Une machine à compression pour déterminer la résistance à la compression ;

Pour les tests thermiques, il s'agissait d'un test d'ébullition d'eau avec les différentes briquettes obtenues. Pour réaliser ces tests, le matériel utilisé était composé :

- D'un foyer céramique ;
- D'une marmite métallique ;
- D'éthanol pour amorcer la flamme ;
- D'un thermocouple ;
- Des morceaux de briquettes récupérés après réalisation des tests de destruction ;

➤ D'eau.

II.2 Méthodes de caractérisation des tourteaux et des briquettes

II.2.1 Détermination du taux d'humidité (teneur en eau)

La teneur en humidité représente la quantité d'eau contenue dans la matière. La détermination de la teneur en eau contenue dans les tourteaux de karité a été faite suivant la méthode par étuvage, qui a été élaborée suivant la Norme Européenne EN 14774-1 et la Norme Américaine ASTM D 2867-70. Elle s'applique aux biocombustibles et biomasses solides. La méthode de détermination de la teneur en eau consiste à sécher un échantillon préalablement broyé et tamisé à une température de $105^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, et à le maintenir à cette température jusqu'à l'obtention d'une masse constante. La teneur en eau est calculée à partir de la perte de masse de l'échantillon entre l'échantillon pris au début, et l'échantillon retiré de l'étuve. Trois essais sont réalisés et la valeur moyenne sera retenue en prenant en compte les marges d'erreurs admissibles.

Elle se calcule suivant la formule :

$$W = \frac{(m_2 - m_1)}{(m_5 - m_1)} * 100 \quad (1)$$

W : Teneur en humidité ;

M₁ : masse du creuset à vide en g ;

M₂ : masse du creuset avec l'échantillon anhydre en g ;

M₅ : Masse du creuset avec l'échantillon but en g.

II.2.2 Détermination de la teneur en huile contenue dans les tourteaux de karité

La teneur en huile est la quantité d'huile contenue dans les tourteaux de karité. La méthode d'extraction utilisée est la méthode au Soxhlet. Il s'agit de laver la biomasse à l'hexane durant 6 à 8 heures et ensuite extraire l'hexane grâce à un évaporateur rotatif afin d'en recueillir l'huile. La teneur en huile est calculée suivant la formule suivante :

$$T_{\text{huile}} = \frac{M_2 - M_1}{M_0} * 100 \quad (2)$$

M_0 : masse de la prise d'essai en g ;

M_1 : masse du ballon vide en g ;

M_2 : Masse total du ballon et de l'huile recueilli après l'évaporation de l'huile et le passage à l'étuve en g.

II.2.3 Détermination de la masse de matière volatiles

Les matières volatiles sont des matières qui peuvent s'échapper très rapidement du biocombustible solide sous forme de poussières, lorsque le biocombustible est soumis à une haute température (900°C) en absence d'air.

La méthode de détermination des matières volatiles et du carbone fixe consiste à chauffer, dans un four à moufle à 900°C ± 10°C, en absence d'air, les tourteaux préalablement broyés, tamisés et séchés. Les échantillons sont maintenus à cette température pendant 7 minutes. Le taux de matières volatiles est déduit de la perte de masse de l'échantillon ; le taux de carbone fixe est obtenu par la différence des taux de matières volatiles et de cendres. Cette méthode a été élaborée suivant les normes française NF M03-004 et internationale ISO 562. La teneur en matière volatile est obtenue suivant la formule :

$$T_{MV} = \frac{M_2 - M_3}{M_2 - M_1} * 100 \quad (3)$$

T_{MV} : Teneur en matière volatile ;

M_1 : masse du creuset à vide avec son couvercle en g ;

M_2 : masse du creuset avec l'échantillon anhydre en g ;

M_3 : Masse du creuset avec son couvercle et le résidu cendrex en g.

II.2.4 Détermination du taux de cendre

Le carbone fixe est le carbone qui reste dans le biocombustible solide anhydre après qu'on ait soustrait à la masse de l'échantillon, celle de la matière volatile et celle de la cendre. La cendre est une matière grise, obtenue après que les tourteaux (échantillons anhydre) aient subis une incinération complète.

Pour la détermination du taux de cendre, la biomasse doit être préalablement séchée. Il est estimé grâce à la perte de poids de la matière en début d'expérience et en fin d'expérience. La matière dans les creusets (dont on note les masses) est mise dans le four à température ambiante. On procède donc à une élévation de la température jusqu'à 250 °C durant 1 heure, ensuite, de 250 °C à 550 °C durant 1 heure, de 550°C à 815°C durant 1 heure. Enfin, une fois la dernière température atteinte, elle est maintenue 1 heure durant, avant le retrait des échantillons qui seront refroidis dans le dessiccateur et pesés. Cette méthode a été mise en place grâce à la norme française NF V03-922 et la formule est comme suit :

$$T_c = \frac{M_2 - M_3}{M_2 - M_1} * 100 \quad (4)$$

T_c : Teneur en matière volatile ;

M_1 : masse du creuset à vide avec son couvercle en g ;

M_2 : masse du creuset avec l'échantillon anhydre en g ;

M_3 : Masse du creuset avec son couvercle et le résidu cendrex en g

II.2.5 Détermination du Pouvoir Calorifique Inferieur

Le pouvoir calorifique inferieur peut se définir plus simplement, comme étant la quantité de chaleur dégagée par la combustion d'une matière. Il permet de quantifier le potentiel énergétique de la biomasse.

Pour la détermination du PCI, nous utiliserons une méthode élaborée suivant les normes française NF M03-005, européenne EN 14918, et internationale ISO 1928. A l'aide de la balance analytique, les échantillons sont pesés à environ 1 g et mis dans des coupelles. La coupelle est ensuite placée dans l'électrode à anneau de la bombe pendant que les deux bornes sont reliées par le fil d'allumage de 11 cm. Il faudra s'assurer que le fil soit en contact avec la biomasse. La bombe fermée est ensuite chargée d'oxygène grâce à une valve située sur sa tête, jusqu'à une pression de 25 atm. Dans un sceau métallique, 200 g d'eau à une température comprise entre 24 °C et 25 °C est pesée et mis dans l'enceinte adiabatique. La bombe calorimétrique ainsi prête est placée dans le seau et connectée aux deux fiches-bananes des fils de mise en feu, au niveau des connecteurs électriques situés sur sa tête. Le calorimètre est mis par la suite en marche, et la température d'équilibre entre l'enceinte (thermomètre jaune) et le

vase calorimétrique (thermomètre blanc) est relevée. Enfin, la mise a feu est effectuée grâce au bouton « **IGNITE** » que l'on garde enfoncé, un moment durant. La température des deux enceintes grimpe et le pic de température dans le vase est relevé. Pour chaque échantillon, il faut répéter l'opération deux fois, afin de comparer les valeurs et faire une moyenne.

L'élévation de la température de l'eau est due à la quantité de chaleur dégagée lors de la combustion de la biomasse. Le pouvoir calorifique supérieur (PCS) est obtenu grâce à cette température. Quant au pouvoir calorifique inférieur (PCI), il est déduit de la valeur du PCS.

Le pouvoir calorifique supérieur des combustibles s'obtient en appliquant la formule suivante :

$$PCS_{brut} = \frac{K_1 * E_{cal} * (T_m - T_i) - K_1 * E_{pt} * (L_i - L_f)}{m_{échantillon}} \quad (5)$$

E_{cal} : Équivalent calorimétrique du calorimètre et ses accessoires. Sa valeur est 2460 cal/°C.

E_{pt} : Pouvoir calorifique du platine. Sa valeur est 2,3 cal/cm ;

K_1 : Facteur de conversion des calories en joules. Sa valeur est 4,1855 J/Cal ;

T_m : Température maximale en degré Celsius ;

T_i : Température initiale en degré Celsius ;

L_i : Longueur initiale du fil de platine en cm ;

L_f : Longueur finale du fil de platine en cm ;

$m_{échantillon}$: Masse de l'échantillon en g.

Connaissant le PCS, le pouvoir calorifique inférieur se calcule comme suit :

$$PCI_{brut} = PCS_{brut} \left(\frac{E_{cond} * K_2 * H_{ech}}{100} + \frac{E_{cond} * W}{100} \right) \quad (6)$$

E_{cond} : Chaleur de condensation de l'eau. Sa valeur est 2511J/g ;

K_2 : Facteur de proportionnalité. Sa valeur est 8,937 ;

H_{ech} : Teneur en hydrogène de l'échantillon en % ;

W : Teneur en humidité.

$$H_{anhydre} = H_{ech} * \frac{100}{100-W} . \text{ Donc } H_{ech} = H_{anhydre} * \frac{100-W}{100}$$

II.2.6 Masse volumique des briquettes

La masse volumique est un rapport entre la masse et le volume des briquettes. Plus la densité des briquettes est élevée, plus le potentiel énergétique par volume est élevé. Aussi, ce paramètre très important dépend de la température, de la pression, de la durée de la densification et enfin, de la densité initiale de la biomasse (Kers et al. 2010). La densité s'obtient suivant cette formule :

$$\rho = \frac{m}{v} \text{ Avec } v = \frac{\pi D^2 H}{4} \quad (7)$$

ρ : masse volumique en kg/ m³ ;

m : la masse de la briquette en kg ;

v : le volume de la briquette en m³ ;

D : le diamètre de la briquette en m ;

H : la hauteur de la briquette en m.

Cette opération est répétée 5 fois avec des briquettes de même taille afin d'en retenir la valeur moyenne.

II.2.7 Test de résistance à la compression des briquettes

La résistance est un critère essentiel dans la caractérisation des briquettes. Elle est mesurée grâce à une machine à essai de compression de force maximale 50 kN (Figure 25: Test de résistance à la compression. Sur une plaque métallique horizontale, on place la briquette, à laquelle on applique une force initiale de 2 kN. On fait varier de façon constante la force de 0,5 N/s jusqu'au craquage de la briquette (Huko, Kamau, and Ogola 2015). La résistance se calcule en faisant le rapport de la charge appliquée au moment de la rupture de la briquette, et la surface de la section transversale de la fissure. La formule est la suivante :

$$RC = \frac{F}{S} \quad (8)$$

RC : la résistance en kPa ;

F : la charge en kN ;

S : la section transversale en m².

Cette opération est répétée 5 fois avec des briquettes de même taille afin d'en retenir la valeur moyenne.

II.2.8 Test de dureté des briquettes

Ce test consiste à placer la briquette à une hauteur de 1,8 m d'une surface métallique, et la laisser ensuite tomber sur cette surface. La dureté de la briquette est obtenue en calculant le pourcentage de masse de briquette qui reste sur un tamis de 20 mm posé sur la surface métallique (Chaiklangmuang, Supa, and Kaewpet 2007). Cette opération est répétée 5 fois avec des briquettes de même taille afin d'en retenir la valeur moyenne.

II.2.9 Test de résistance à l'impact

Le test de résistance à l'impact consiste à suspendre la briquette à une hauteur de 2 m, la laisser tomber sur un sol en béton, et répéter l'action jusqu'à ce qu'elle se brise (Chaiklangmuang, Supa, and Kaewpet 2007). L'impact de résistance correspond au rapport entre le nombre de chute qu'il a fallu effectuer jusqu'à ce que la briquette se brise, et le nombre de morceaux de la briquette cassée (Gado et al. 2013). Les petits morceaux dont la masse ne vaut pas 5 % de la masse initiale ne sont pas pris en compte. Cette opération est répétée 5 fois avec des briquettes de même taille afin d'en retenir la valeur moyenne.

$$IRI = 100 * \frac{N}{n} \quad (9)$$

IRI : indice de résistance à l'impact en % ;

N : nombre de chute de la briquette ;

n : nombre de morceaux.

II.2.10 Water boiling test simplifié

Le Water boiling test, en français test d'ébullition de l'eau est un test qui consiste à mettre en ébullition une quantité d'eau contenue dans une marmite, avec un combustible bien précis, afin de mesurer l'efficacité avec laquelle le foyer utilise le combustible pour chauffer l'eau, et la quantité d'émission produite. Ce test permet l'évaluation de trois critères à savoir le temps d'ébullition, la consommation spécifique du combustible et l'efficacité thermique. Pour réaliser ce test, nous avons utilisé un foyer amélioré en céramique, une marmite en aluminium et deux thermocouples.

La méthode utilisée est celle simplifiée qui est proposée par le LabEREE. Le Water Boiling Test classique a pour objectif de quantifier la masse de combustibles utilisée pour porter une certaine masse d'eau à ébullition suivant trois phases dont les démarrages à froid, à chaud et la phase de maintien à ébullition durant 45 minutes. Dans la méthode simplifiée, nous avons effectué le démarrage à froid. La quantité d'eau utilisée équivaut à 2/3 de la marmite. La masse initiale de combustibles est 1,2 kg. Avec un peu d'éthanol, de feu, la combustion est amorcée. Une fois que la combustion des briquettes se stabilise, la marmite est posée sur le feu jusqu'à l'ébullition de l'eau. L'eau est très vite retirée du feu et la quantité de charbon combustibles ou de charbon restant est mesurée. Les informations prises en compte sont les suivantes :

- La température initiale de l'eau ;
- La température d'ébullition de l'eau ;
- La quantité initiale de combustibles ;
- La quantité finale de charbon ou charbon + combustibles ;
- La quantité initiale d'eau portée sur le feu ;
- La quantité restante de l'eau après ébullition ;
- Le temps entre l'allumage du feu et le début de la combustion des briquettes ;
- Le PCI du charbon ou charbon + combustibles.

II.2.10.1 L'efficacité thermique

L'efficacité thermique est le rapport entre la quantité d'énergie transmise à l'eau dans la marmite et la quantité d'énergie produite par les briquettes. Elle permet d'évaluer les performances du foyer, mais permet également d'évaluer les performances thermiques du combustible. Il s'exprime en pourcentage (Global Alliance for Clean Cookstoves 2014).

$$\eta = \frac{m_e * C_e (T_f - T_i) + m_{ev} * L_v}{m_b * PCI} * 100 \quad (10)$$

Avec :

η : efficacité thermique en % ;

m_e : Masse d'eau en kg ;

C_e : Capacité calorifique de l'eau en kJ/(kg.K) ;

T_f : Température finale de l'eau en K ;

T_i : Température initiale de l'eau en K ;

mev : Masse d'eau évaporée en kg ;

Lv : Chaleur latente évaporation de l'eau en (kJ/kg) ;

mb : Masse de briquelette consommée en kg ;

PCI : Pouvoir calorifique de la briquelette en (kJ/kg).

II.2.10.2 La consommation spécifique

La consommation spécifique détermine la quantité de briquelette nécessaire pour porter un litre d'eau à ébullition. Elle correspond à la masse initiale de combustible sec moins l'énergie du charbon de briquelettes restant, divisé par la quantité d'eau restante après l'ébullition (Global Alliance for Clean Cookstoves 2014). Elle est donnée par l'expression suivante :

$$C_s = \frac{((M_{ci} - M_{cf}) * (1 - \%H_2O))}{(M_{mei} - M_m)} \quad (11)$$

Cs= Consommation spécifique en (g/l)

Mmei = masse de la marmite et de l'eau initiale à la phase en kg ;

Mm = masse de la marmite à vide en kg ;

Mci = masse de la briquelette initiale en kg ;

Mcf = masse de la briquelette finale en kg ;

%H₂O : Humidité des briquelettes

II.2.10.3 Temps d'ébullition

Le temps d'ébullition est obtenu en divisant l'équivalent de briquelettes consommées par la durée du test :

$$\text{Consommation horaire} = \frac{mb}{\Delta t} \quad (12)$$

Δt : Durée du test en minutes

II.2.11 Détermination de l'ATG

L'analyse thermogravimétrique (ATG) est un procédé de détermination des composés d'une biomasse, la température de décomposition de certains composés de cette biomasse et la vitesse à laquelle les éléments se décomposent. Il s'est agi de prélever une petite quantité de chacun des deux échantillons de biomasse (entre 20 et 25 mg) puis de placer l'échantillon contenu dans le petit creuset puis de suspendre ce creuset dans l'enceinte de combustion. Le gaz réactif en entrée qui amorce la combustion dans notre cas a été l'azote.

L'analyseur peut atteindre 1000 °C. Cette opération dure 2 heures de temps. Cette analyse se fait grâce à l'analyseur thermogravimétrique SETSYS-1750 CSEVOL grâce au montage ci-dessous :

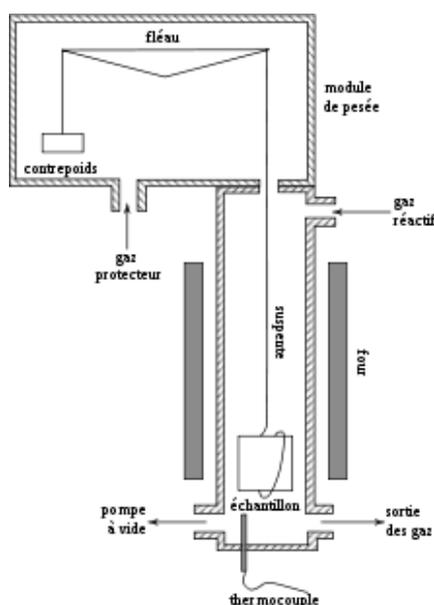


Figure 9: Montage de l'analyse thermogravimétrique.

II.3 Formulations et Production des briquettes

II.3.1 Préparation de la biomasse

Pour produire les briquettes, la boue de barattage a été séchée durant une semaine au soleil, puis broyée. Les tourteaux séchés ont été écrasés suivant une granulométrie de 0,5 mm grâce au broyeur à couteaux Retsch. La matière broyée a été encore séchée au soleil durant une semaine et ensuite gardée dans des bocaux en plastiques. Un thermo-flash a été utilisé pour mesurer la température à l'intérieur de la presse. Les températures mesurées sont comprises entre e 37 °C

et 51°C. Deux types de briquettes ont été produites : les briquettes sans liants, et les briquettes avec liants. Dans tous les deux cas les briquettes ont une longueur de 12,80 cm et un diamètre de 4,8 cm. La densification a été effectuée durant les mois de Janvier et Février.

II.3.2 Densification de la biomasse sans ajout de liants

La teneur en humidité initiale des tourteaux broyés était de 19,62 % en raison des conditions climatiques. A cette biomasse, des quantités d'eau différentes ont été ajoutées. Faisant varier cette quantité d'eau de 0 kg à 1,25 kg pour chaque kg de biomasse, 7 formulations ont été proposées. Le tableau V ci-dessous illustre les différentes proportions proposées. Les briquettes présentant les meilleures textures ont été retenues, séchées durant 21 jours à l'abri du soleil, puis caractérisées.

Tableau VI: Formulations des briquettes de tourteaux de karité sans liants.

Briquettes sans liants				
Formulations	Teneur en eau initiale des tourteaux de karité	Quantité de matière broyée (kg)	Quantité d'eau (kg)	Teneur en eau finale des tourteaux de karité
C1	19,62 %	1	0	19,62 %
C2		1	0,25	35,70%
C3		1	0,35	40,46%
C4		1	0,5	46,41%
C5		1	0,75	54,07 %
C6		1	1	59,81 %
C7		1	1,25	64,27 %

II.3.3 Densification de la biomasse avec ajout de liant (amidon de manioc)

Compte tenu de sa disponibilité et de son coût relativement abordable, l'amidon de manioc a été utilisé comme liant dans le processus de densification. Il a été gélatinisé dans le but de mieux développer ses propriétés d'élasticité. Pour se faire, dans chaque formulation, ¼ de la quantité prévue a été utilisé pour gélatiniser l'amidon. L'ensemble (eau + amidon + biomasse) a été porté dans la briqueteuse. Le tableau VII ci-dessous illustre les différentes proportions

proposées. Les briquettes présentant les meilleures textures ont été retenues, séchées durant 21 jours à l'abri du soleil, puis caractérisées.

Tableau VIII: Formulations de briquettes avec liants.

Formulations	Teneur en amidon	Teneur en eau	Biomasse	Masse totale du mélange
D.5.35	5 %	35 %	60 %	100 %
D.5.50		50 %	45 %	100 %
D.5.60		60%	35 %	100 %
D.10.35	10%	35 %	55 %	100 %
D.10.50		50 %	40 %	100 %
D.10.60		60 %	30 %	100 %

III. Résultats et discussion

III.1 Caractérisation des résidus du karité et de l'amidon

La connaissance de caractéristiques physico-chimiques d'un gisement de déchets est déterminante pour une meilleure valorisation de ce dernier. Les résultats de la caractérisation des deux échantillons (tourteaux de presse et boue de barattage) ont permis d'identifier le résidu qui présente les caractéristiques requises pour la production des briquettes (Tableau VII).

Tableau IX: Résultats de la caractérisation des tourteaux de karité et de l'amidon.

	Humidité (%)	Matière volatile (%)	Taux de cendre (%)	Taux de carbone fixe (%)	Huile résiduelle (%)	PCI(MJ/kg)
Tourteaux de presse	7,78	84,60	3,24	12,12	27,10	32,39
Boue de barattage	35,60	82,05	4,44	13,51	7,02	20,15
Amidon	12,23	94,7	1,65	3,65	--	12,89

Le pouvoir calorifique des tourteaux de presse est nettement supérieur à celui des tourteaux de barattage. Le pouvoir calorifique de la biomasse lignocellulosique varie entre 16 MJ/kg et

18 MJ/kg. La teneur en huile résiduelle dans les tourteaux de presse est de 27,10 %, ce qui est supérieur à la valeur maximale 14 % proposée par (Yé et al. 2007). Cette observation serait probablement liée à un dysfonctionnement de la presse d'extraction utilisée. Le pouvoir calorifique de l'huile étant plus élevé que celui de la biomasse lignocellulosique, nous pouvons justifier la valeur 32,39 MJ/kg par la teneur importante en huile contenue dans les tourteaux. Pour une bonne densification, la teneur en huile de la biomasse doit être inférieure à 7,5 % (Briggs et al. 1999). Ce résultat montre que les tourteaux de presse sont inadaptés à la densification. Bien que la boue de barattage séchée ait un faible potentiel énergétique par rapport aux tourteaux de presse, il reste meilleur que le bois de feu dont le potentiel énergétique est d'environ 18 MJ/kg. De plus, elle présente une teneur résiduelle en huile acceptable. Par ailleurs, quoique l'écart soit relativement faible, la teneur en matière volatile des boues de barattage est plus faible que celle des tourteaux de presse. Moins la teneur en matière volatile est élevée, moins les particules s'effritent et meilleure est la densification. D'après les travaux de Grover (Grover and Mishra 1996), pour une densification, la teneur en humidité de la biomasse doit être inférieure à 15 % et le taux de cendre inférieur à 4 %. Dans notre cas, le taux d'humidité des boues de barattage (35,6%) est largement au-dessus du taux requis. Un séchage préalable est donc nécessaire.

Une caractérisation physico-chimique de l'amidon a également été réalisées. Le PCI de l'amidon (12,89 MJ/kg) est plus faible que celui des tourteaux de presse et boue de barattage. L'augmentation de la teneur en liant réduira donc le PCI des briquettes. Ce qui implique le besoin de trouver un bon dosage qui permettrait d'avoir des briquettes dont le PCI final est proche, voire supérieur à celui du bois.

III.2 Analyse thermogravimétrique des tourteaux de presse et de barattes

Les pics observés sur la courbe de la dérivée thermogravimétrique (dTG) illustrent la décomposition thermique des éléments constituant les tourteaux. La TG illustre la perte de masse liée à la décomposition de ces éléments. D'après les travaux de Michael MELZER (MELZER 2013), les pertes de masse comprises entre 25°C et 150 °C correspondent des départs d'eau. Les hémicelluloses se décomposeraient entre 150°C et 300 °C. Quant à la cellulose, elle se décomposerait entre 330 °C et 360 °C. la décomposition de la lignine commence autour à 110 °C mais elle est surtout importante à partir de 400 °C jusqu'à 900 °C. Pour de la biomasse oléagineuse, la décomposition des huiles commence après 300 °C.

Les courbes dTG et TG des deux échantillons obtenus présentent la même allure. Les pics de décomposition thermique observés sur les dTG (figure 10) à 79 °C, 265 °C, 335 °C et 417 °C sont attribuables à l'eau, aux hémicelluloses, à la cellulose et aux lignines respectivement. Le rendement de la carbonisation des tourteaux est donc estimé à 19,45 %. Quant aux boues de barattage, le rendement de la carbonisation de cet échantillon est estimé à 25,77 %. La forte teneur en huile résiduelle dans les tourteaux de presse serait à l'origine de la forte perte de masse observée dans l'échantillon (80,55 %). Les tourteaux de presse contiennent donc plus de matières volatiles que les tourteaux de barattes. De plus, ces résultats montrent qu'une carbonisation rapide à 900 °C entraîne non seulement la perte des matières volatiles, mais d'autres constituants non volatiles de la biomasse.

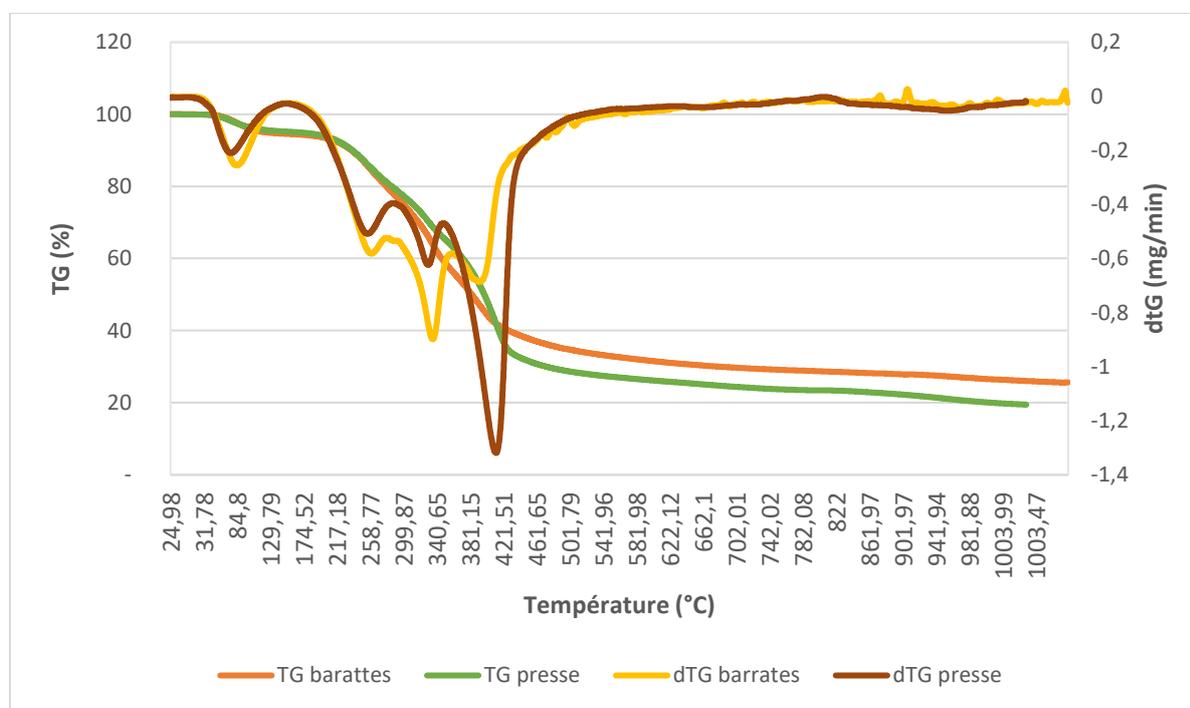


Figure 10: Courbes de TG et dTG des tourteaux de presse et de barattes.

III.3 Formulation de briquettes

III.3.1 Description de l'aspect physique des briquettes

III.3.1.1 Briquettes sans liants

Les briquettes sans liants ont été obtenues en variant la teneur en eau dans les différentes formulations. Les formulations réalisées sont C1, C2, C3, C4, C6 et C7.

Les briquettes obtenues à partir des formulations C1 et C2 étaient non compactes et s'effritaient à la sortie de la briqueteuse. La faible teneur en eau n'a pas permis une bonne cohésion des particules dans la formulation. Les briquettes obtenues à partir des formulations C3 et C4 étaient un peu plus compactes que les briquettes des formulations C1 et C2, mais présentent des fissures le long du corps. La faible tenue physique pourrait se justifier d'une part par les faibles pression et température de densification observées dans la presse, d'autre part d'une quantité insuffisante d'eau dans les formulations. En effet, plus ces deux paramètres ont des valeurs élevées, plus la lignine et les protéines contenues dans la biomasse se décomposent en développant des propriétés d'élasticité. La température minimale recommandée est d'environ 120 °C. Dans notre cas, à la température mesurée était inférieure à 51 °C. Les briquettes obtenues à partir de la formulation C5 étaient plus uniformes, et ne présentaient que quelques rares fissures superficielles. Les briquettes obtenues à partir des formulations C6 et C7 étaient pâteuses au toucher et n'avaient aucune forme consolidée sur leurs longs. Ce résultat pourrait s'expliquer par la teneur en humidité relativement supérieure à la valeur limite nécessaire.



Figure 11: Briquette C4



Figure 12: Briquette C7.



Figure 13: Briquettes C5.

III.3.1.2 Briquettes avec liants (densification)

Les briquettes avec liants ont été préparées en variant deux paramètres, à savoir la teneur en eau et la teneur en amidon de manioc. Au total 6 formulations ont été réalisées : D.5.35 ; D.5.50 ; D.5.60 ; D.10.35 ; D.10.50 ; D.10.60.

Les briquettes produites à partir des formulations D.5.35 et D.5.10 ont présenté des formes moins consolidées avec apparition de nombreuses fissures au cours du séchage. Comme précédemment observé, ce phénomène pourrait s'expliquer d'une part par une faible teneur en eau dans les formulations, et d'autre part par une pression et une température de presse relativement faibles. En effet, les paramètres comme la pression, la température et la teneur en liant favorisent la densification de la biomasse. Plus la température et la pression sont élevées, avec un bon dosage en eau et en amidon, plus le liant acquiert de l'élasticité, agglomérant au mieux les particules. Chaque type de presse a des teneurs minimale et maximale en eau acceptables. Lorsque la teneur en eau est inférieure à la teneur minimale acceptable, la cohésion des particules n'est pas totale. Dans notre cas, nous pouvons dire que la teneur en eau est inférieure à la teneur minimale admise par la presse. Les briquettes des formulations D.5.50 et D.5.50 ont présenté des aspects assez uniformes avec peu de fissures superficielles au cours du séchage, induisant une meilleure cohésion des particules de ces dernières. Les formulations D.5.60 et D.10.60 ont donné des briquettes pâteuses, aux aspects irréguliers avec des étranglements. Cette observation résulte du fait que la teneur en eau de ces formulations est relativement élevée et supérieure à la teneur maximale admise par la briqueteuse.



Image 1: Formulation D.5.35



Image 2: Formulation D.10.35



Image 3: Formulation D.5.50



Image 4: Formulation D.10.50

Pour les tests physico-chimiques, mécaniques et thermiques, nous retiendront les formulations **C5 ; D.5.35 D.10.35 ; D.5.50 et D.10.50** dont les briquettes avaient les meilleures textures.

III.3.2 Caractérisation physicochimique des briquettes

III.3.2.1 Teneur en humidité

D'après la norme européenne Norme EN 14961 et (Grover and Mishra 1996), la teneur en eau des briquettes doit être inférieure à 15 %. Après 3 semaines de séchage au laboratoire (à l'abri du soleil), les briquettes ont présenté des teneurs en eau constantes inférieure à la valeur normalisée. Les résultats obtenus sont illustrés par la figure 14.

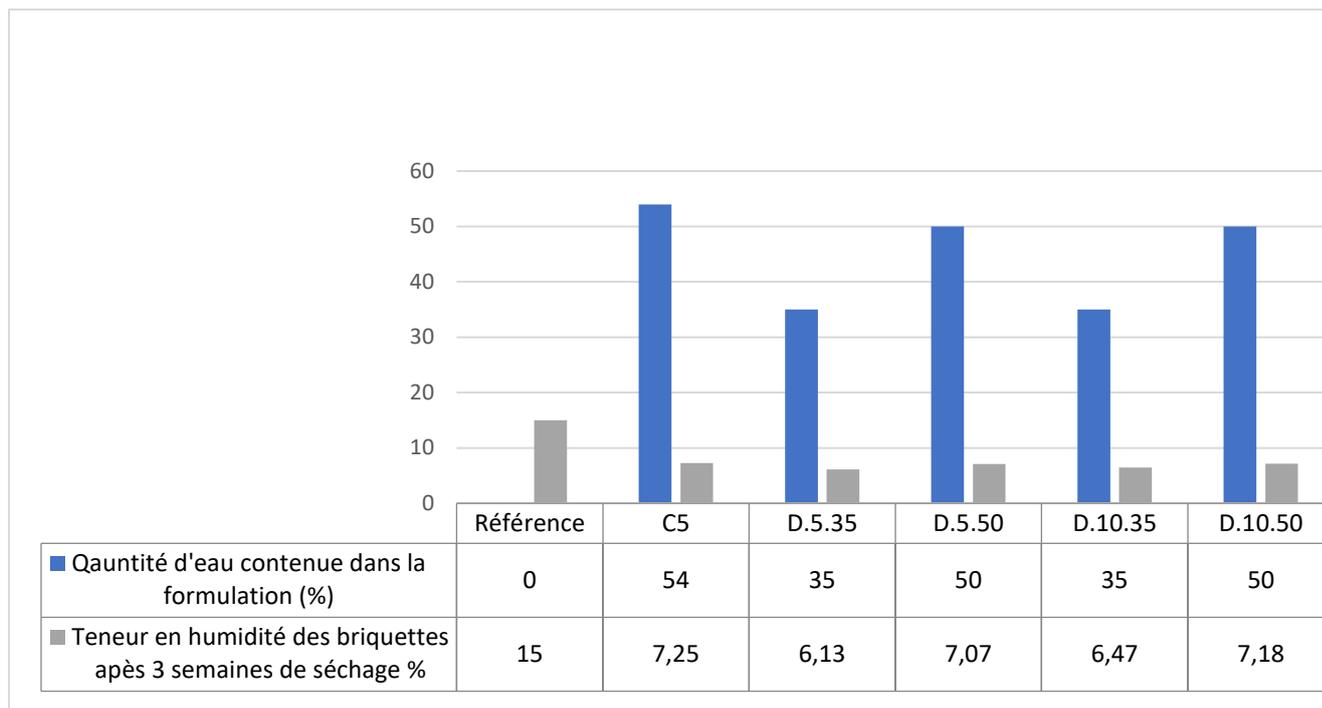


Figure 14: Variation de la teneur en eau des formulations et briquettes après 21 jours de séchage.

III.3.2.2 Pouvoir Calorifique Inferieur

Les tests de détermination du pouvoir calorifique des briquettes ont donné les résultats conférés dans la figure 15 ci-dessous. Le PCI des briquettes sans liants (formulation C5) est resté constant. Quant aux PCIs des briquettes avec liants, ils sont relativement inférieurs au PCI de la matière initiale. Cela se justifie par l'ajout du liant amidon, dont le PCI est plus faible par rapport aux tourteaux de barattage. De plus, on constate que les PCIs des formulations D.5.35 et D.5.50 sont supérieurs aux PCIs des formulations D.10.35 et D.10.50. Cette différence est liée à la teneur en amidon dans la formulation. Plus la quantité de liants est élevée, moins le PCI des briquettes est élevé. Les différentes formulations proposées ont permis d'avoir des briquettes dont les PCIs sont supérieurs à celui du bois (estimé à 18,4 MJ/kg). De plus, d'après la norme européenne EN 14961, le PCI des briquettes doit être supérieur à 4,5 kWh/kg, soit 14,96 MJ/kg. Les résultats obtenus sont conformes à la norme européenne, démontrant une possible valorisation des tourteaux de karité en biocombustibles briquettes.

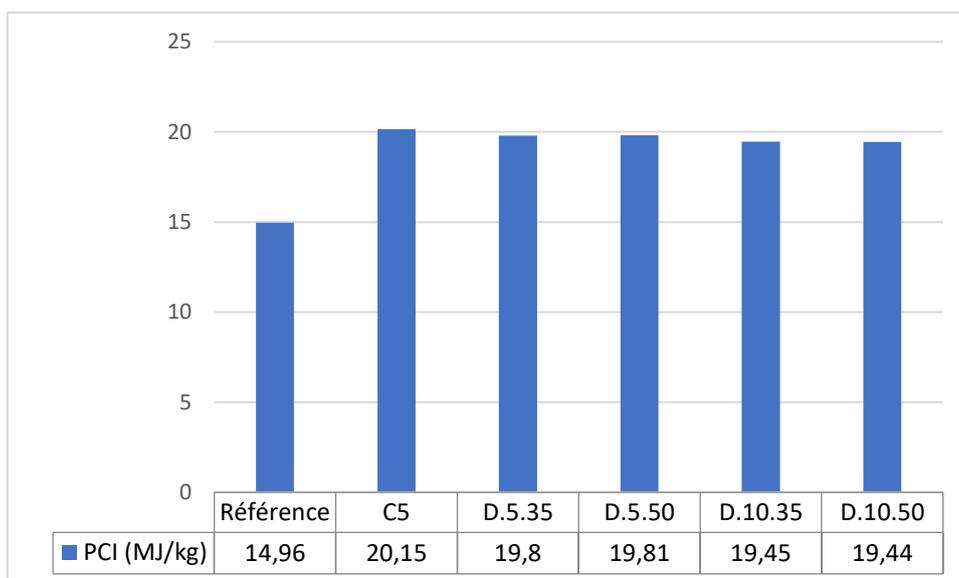


Figure 15: Pouvoir calorifique des briquettes séchées.

III.3.2.3 Taux de Cendre

D'après les tests préliminaires de caractérisation menés sur les tourteaux de barattes, la teneur en cendre est de 4,44 %. Les résultats des tests de caractérisation réalisés sur les briquettes après séchage sont présentés sur la figure 16. La teneur en cendre maximale que doivent avoir des briquettes est 4 % (Grover and Mishra 1996). Dans notre cas, les teneurs en cendre des différentes formulations sont comprises entre 4,1 et 4,5 %. La marge des valeurs observées n'étant pas très grande, elles peuvent être considérées acceptables.

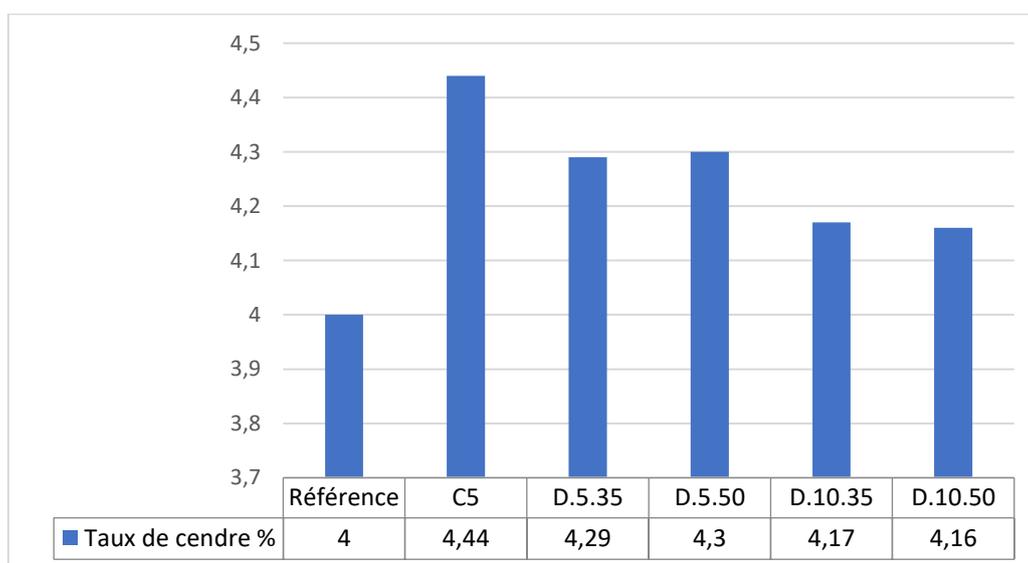


Figure 16: Teneur en cendre des briquettes suivant les formulations.

III.3.3 Tests physico-mécaniques des briquettes

III.3.3.1 Densité

Le plus grand avantage de la densification est l'augmentation de la masse volumique. Plus les briquettes sont denses, meilleure est le potentiel énergétique, et donc la combustion (Grover and Mishra 1996; CDI and CRA 1993). Selon la norme EN 14961, la valeur de référence de la densité est 900 kg/m³. Les résultats obtenus montrent que la formulation C5 donne des briquettes dont la densité est inférieure à la référence (figure 17). Ceci pourrait s'expliquer par les faibles température et pression de compactage, qui limitent la cohésion des particules. Cependant, les formulation D.5.35 et D.5.50 ont fourni des briquettes plus denses, pour les mêmes pression et température. Ceci s'explique par la présence du liant dans la densification, qui permet une meilleure cohésion des particules de biomasse, donc une masse volumique plus élevée. Pour une teneur en liant supérieure à 5 %, les briquettes présentent de plus faibles densités. Aussi, ces résultats montrent que la teneur en eau peut s'avérer être un facteur limitant la densification. Au-delà d'une certaine valeur de la teneur en eau ou de la teneur en amidon, les forces de cohésions entre les particules sont limitées.

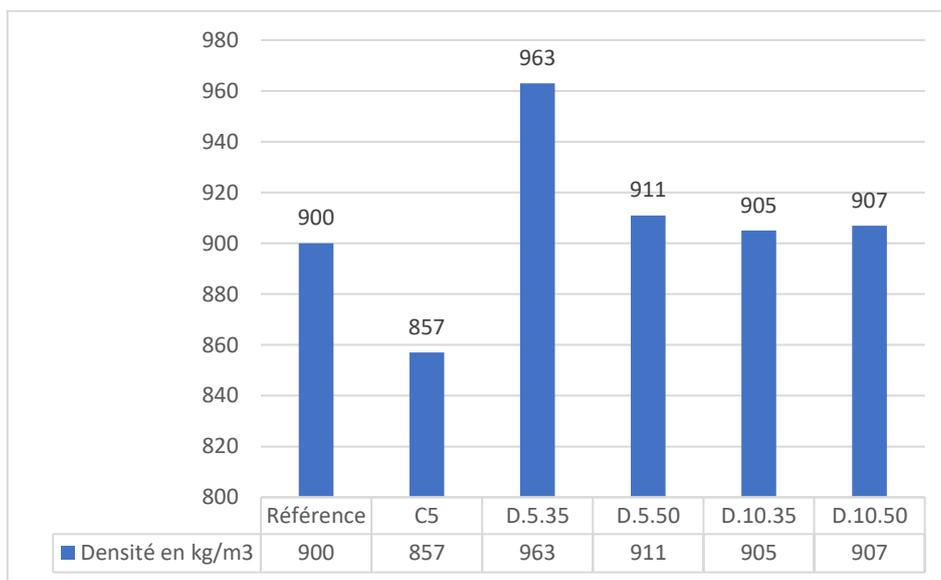


Figure 17: Densité des briquettes suivant les formulations.

III.3.3.2 Dureté

D'après (Chaiklangmuang, Supa, and Kaewpet 2007), plus la valeur de la dureté est élevée, plus les briquettes sont dures et résistantes. Cet indice sert à comparer plusieurs briquettes issues du même procédé de transformation afin d'en retenir les plus solides. Dans notre cas, nous pouvons mener une analyse critique entre les différentes formulations. Ainsi donc, la meilleure

formulation est D.5.35 (figure 18). Les briquettes produites grâce à cette formulation resteraient mieux que les autres, aux chocs liés au transport.

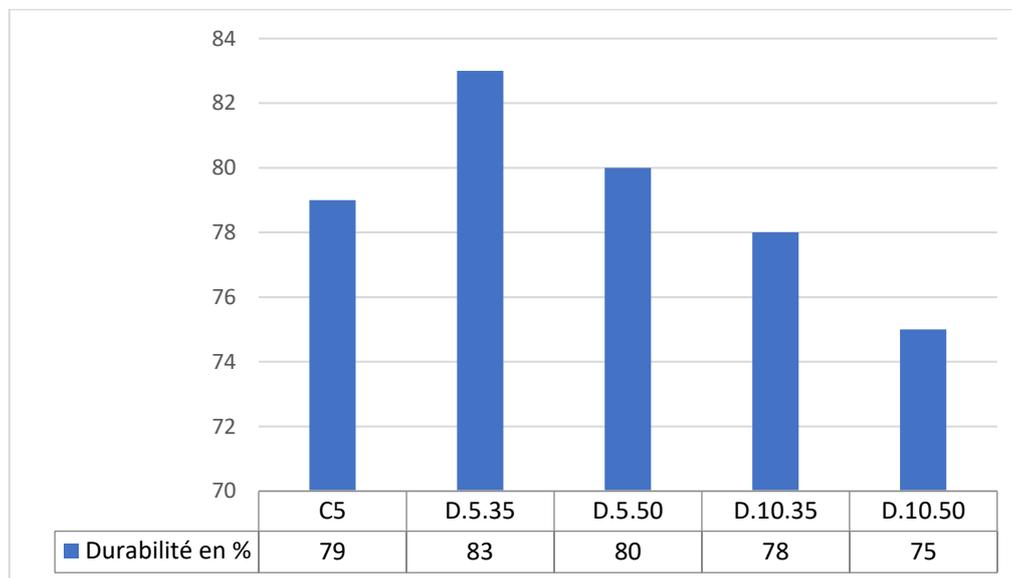


Figure 18: Dureté des briquettes suivant les formulations.

III.3.3.3 Test de résistance à la compression

D'après la norme, la résistance à la compression (RC) des briquettes doit être supérieure ou égale à 350kPa. Les formulations C5, D5.35 et D.10.35 ont donné des briquettes dont les RC sont supérieures à la valeur proposée par la norme. Toutefois, les briquettes D5.35 ont présenté une meilleure résistance à la compression comparée aux briquettes D.10.35. Les résultats obtenus montrent que l'augmentation des teneurs en eau et en amidon respectivement à 50 % et 10 % limitent les RC de nos biocombustibles. En effet, il existe une proportionnalité entre les teneurs en eau et amidon. Plus la quantité du liant par rapport à celle de l'eau, est augmentée, moins les particules hydrosolubles absorbent l'eau et moins elles acquièrent de l'élasticité. Et plus la teneur en eau par rapport à celle du liant est augmentée, plus l'activation de la gélatinisation est réduite par l'effet de dilution. Dans notre cas, la meilleure combinaison était 5 % de liant, 35 % d'eau et 60 % de biomasse, soit la formulation D.5.35.

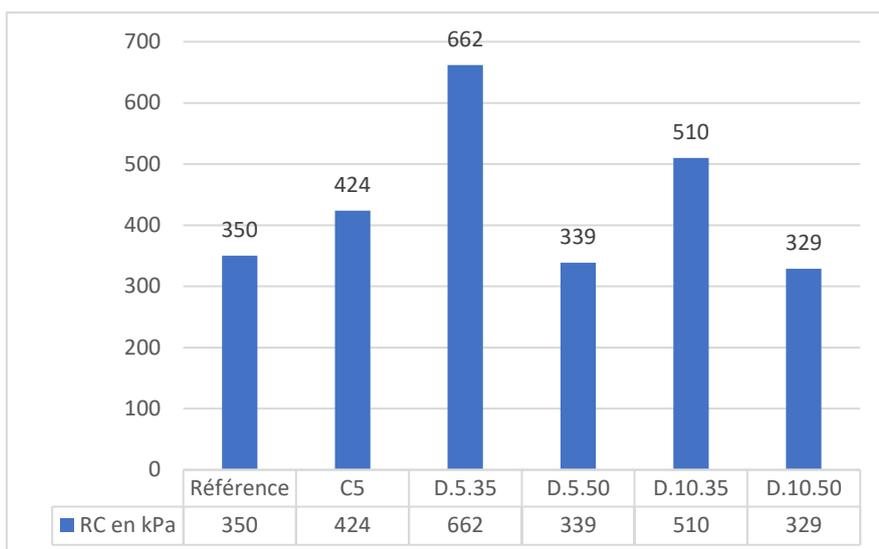


Figure 19: Résistance à la compression des briquettes suivant les formulations.

III.3.3.4 Test de résistance à l'impact IRI

L'indice de résistance à l'impact est également un critère de durabilité. Sa valeur standard est 50 (CDI and CRA 1993). Les résultats ci-dessous (figure 20) montrent que seules les briquettes de la formulation D.5.35 ont un indice de résistance à l'impact qui atteint la valeur normalisée. Cette forte résistance à l'impact D.5.35 comparativement à C5, D.5.5, D.10.35 et D.10.50 pourrait s'expliquer par les relations de proportionnalité entre les teneurs en eau et amidon, décrites plus haut.

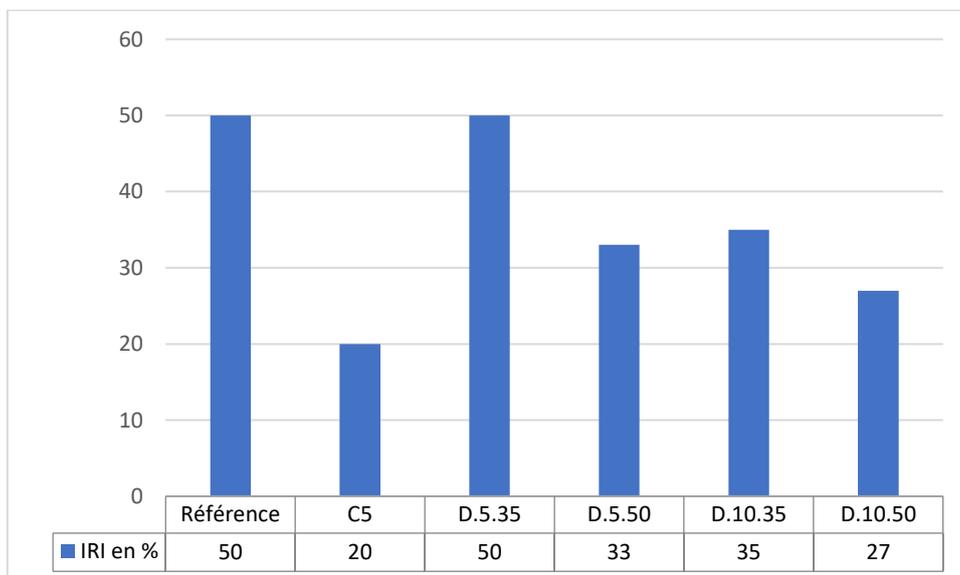


Figure 20: Résistance des briquettes à l'impact.

III.3.4 Test d'ébullition de l'eau

Les tests d'ébullition de l'eau menés avec les briquettes nous ont permis d'obtenir les résultats conférés dans les graphes ci-dessous. Les briquettes de tourteaux d'amandes de karité sont destinées à remplacer le bois de feu dans la combustion. Nous avons également choisi de mener des tests d'ébullition de l'eau avec le charbon de bois et le bois, pour comparer nos biocombustibles. Il faut noter que la teneur en humidité des briquettes a légèrement varié, le temps de mener les tests d'ébullition d'eau. Il est donc nécessaire d'évaluer leurs paramètres thermiques afin de savoir si elles présentent des propriétés permettant leur valorisation.

III.3.4.1 Rendement thermique

Le rendement thermique permet d'évaluer l'efficacité thermique du foyer mais également celui des briquettes. Les briquettes D.10.35 sont les plus efficaces. Le rendement thermique est lié au PCI. Plus le PCI est élevé, meilleur est le rendement thermique. Il dépend aussi de la teneur en matières volatiles du combustible. En effet, les flammes représentent des pertes thermiques, car elles représentent de la chaleur perdue dans l'atmosphère. Cela s'illustre par la valeur élevée du rendement thermique du charbon, qui présente le meilleur PCI et qui brûle sans flamme. Les briquettes D.10.35 présentent le meilleur rendement thermique, comparé aux autres formulations et au bois. Cela pourrait s'expliquer par la faible production de flammes, due à la présence du liant. Les autres formulations ont des valeurs certes inférieures à celle du bois, mais elles n'en sont pas loin.

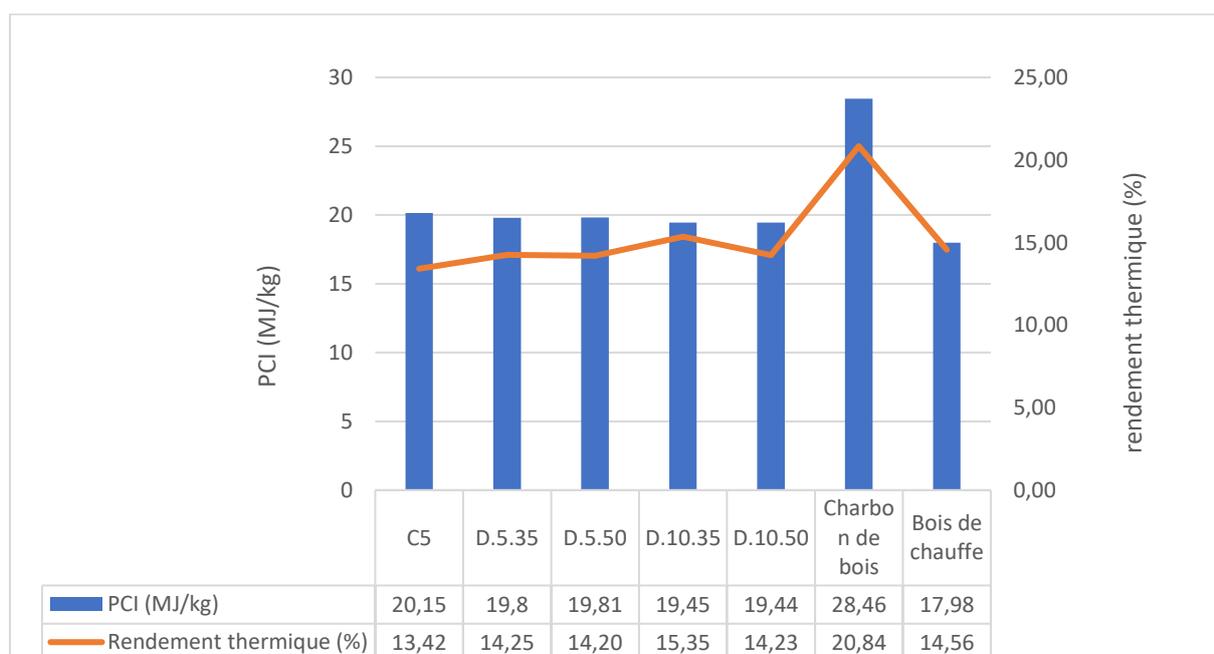


Figure 21: Variation du rendement thermique en fonction du PCI.

III.3.4.2 Consommation spécifique

La consommation spécifique dépend de la teneur en matière volatiles et du pouvoir calorifique. Elle représente la masse de biocombustible qu'il faut brûler pour porter à ébullition un litre d'eau. Plus la teneur en matière volatile est élevée, plus les briquettes produisent des flammes qui représentent des pertes thermiques. Ce qui entraîne un fort besoin en biocombustibles. De plus, plus le PCI est élevé, moins on aura besoin de biocombustible pour faire bouillir un litre d'eau. En effet, les combustibles aux PCI élevés produisent une grande quantité de chaleur pour une faible masse. D'après la figure 22 ci-dessus, les valeurs de consommations spécifiques des briquettes et du bois sont sensiblement égales, mais plus de deux fois supérieures à celle du charbon. Ceci s'explique par le PCI élevé du charbon.

Les briquettes qui ont présenté les meilleures consommations spécifiques sont les briquettes D.10.35 et D.10.50. Lorsque l'amidon est mélangé à de l'eau et chauffé, il devient élastique, et entraîne une cohésion des particules, rendant ainsi les briquettes moins friables. Ceci explique donc pourquoi les deux formulations contenant 10 % d'amidon produisent moins de flammes et ont une meilleure consommation spécifique.

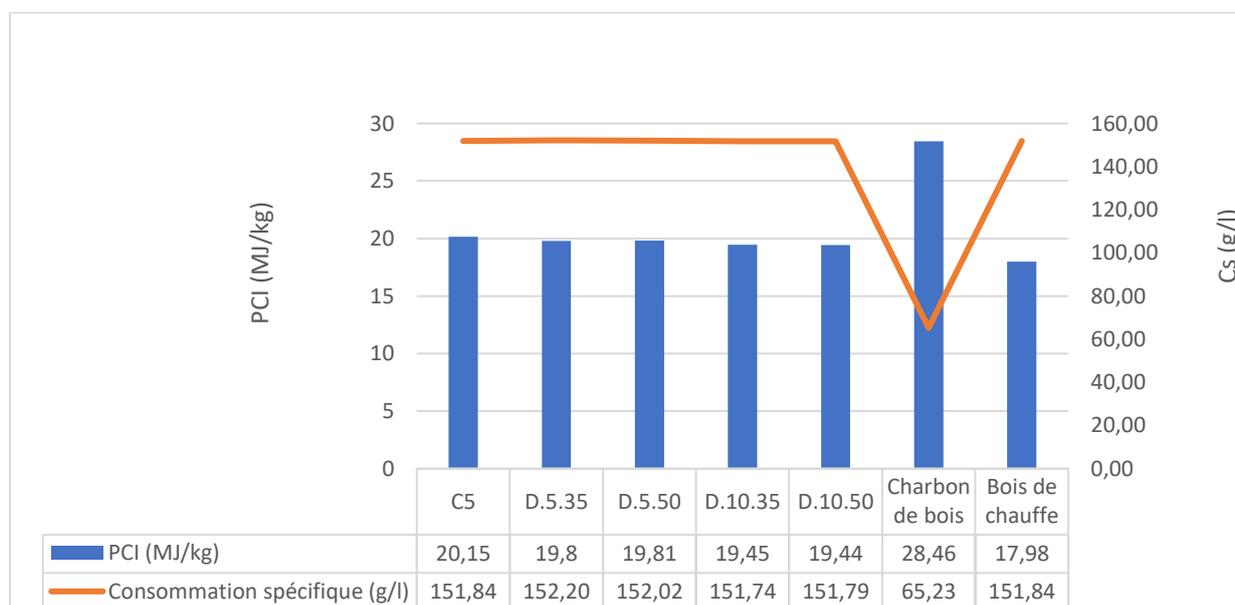


Figure 22: Variation du rendement thermique suivant le PCI en fonction des briquettes.

III.3.4.3 Consommation horaire

La consommation horaire permet de déterminer la vitesse à laquelle les briquettes sont consommées. Elle est liée à la teneur en matières volatiles. Moins la teneur en matière volatile est élevée, moins la consommation horaire est élevée.

Dans notre cas, les briquettes D.10.35 ont présenté la consommation horaire la moins élevée, suivies des briquettes D.10.50. Les résultats obtenus plus hauts montrent que les briquettes D.5.35 sont les plus denses, suivies des briquettes D.5.50. Le fait que les briquettes D.10.35 et D.10.50 se consomment plus lentement pourrait être justifié par la plus forte proportion d'amidon contenue dans la formulation. En effet, plus la teneur en amidon est élevée, moins le PCI du combustible est élevé. La consommation horaire des briquettes C5 est la plus élevée, ce qui se justifie par sa faible densité et la faible cohésion des particules.

La consommation horaire du charbon de bois était la moins élevée avec 17,5 g/min. Cela se justifie par le fait que la carbonisation réduit la teneur en matière volatile de la biomasse. La consommation horaire du bois était de 35,85 g/l. Les briquettes densifiées avec le liant ont donc une meilleure consommation horaire que celle du bois.

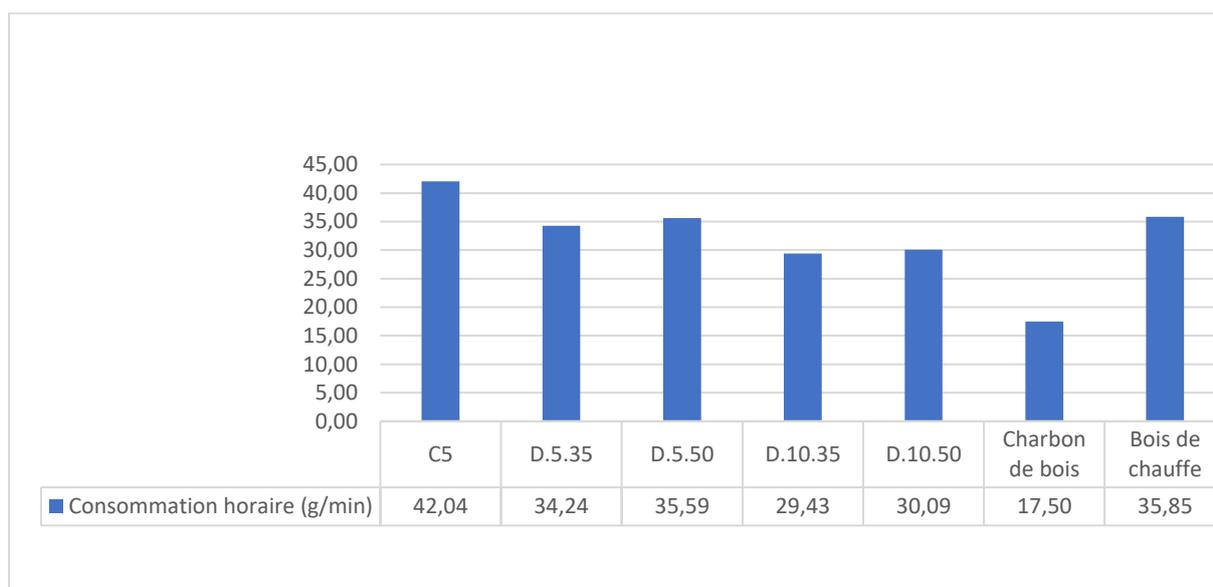


Figure 23: Consommation horaire des briquettes.

III.3.4.4 Qualité de la combustion

Pour faciliter l'allumage pour l'ensemble des briquettes C5, D.5.35, D.5.50, D.10.35, D.10.50, les briquettes dans le foyer en céramique ont été aspergées avec de l'éthanol.

De façon générale, tous les tests ont présenté de faibles émissions de fumées. De plus, les briquettes présentaient de meilleures flammes que le bois. Ces flammes s'éteignent lorsque la marmite est en contact direct avec le feu, du fait du manque d'air, créant ainsi d'énormes

fumées. Toutefois, l'émission des fumées s'estompaient lorsque le feu embrasait toute la quantité de combustible dans le foyer. On obtenait en ce moment un charbon vif, sans dégagement de fumées, (voir annexe : figure 61)

Les briquettes sans liant présentaient de meilleures flammes et moins de fumées que les briquettes avec liant issues de la densification. Après l'amorçage de la flamme, il a fallu attendre 8 minutes pour obtenir une combustion stable.

Quant aux briquettes issues de la densification, les formulations avec 5 % d'amidon ont présenté moins de fumées et plus de flammes que les formulations avec 10 % d'amidon. Après l'amorçage de la flamme, la combustion se stabilise après 9 minutes.

Le charbon brûle sans fumées, même après le dépôt de la marmite. La combustion est stable en moyenne 19 minutes après l'amorçage de la flamme. Ce qui s'explique par la faible teneur en matière volatile et la forte cohésion entre les particules (voir annexe : page 62).

Tandis que les briquettes présentaient des fumées denses, grises ou blanchâtres, la combustion du bois dégageait des fumées noirâtres, contenant donc une plus grande quantité de carbone. Une fois la flamme amorcée, le bois s'embrase et produit des flammes en moyenne 3 minutes après.

Pour de tels combustibles brûlant avec des flammes, le foyer amélioré en céramique que nous avons utilisé pour nos tests n'était pas adapté. Il est donc nécessaire de trouver des foyers plus adaptés. La figure 24 ci-dessous présente l'évolution des fumées au cours de la combustion des briquettes.



Figure 24: Evolution des fumées durant la combustion des briquettes.

IV. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Notre travail était de proposer des voies de valorisation des tourteaux de presse et de barattes en biocombustibles briquettes, afin de réduire les besoins en bois de chauffe ou de charbon dans les ménages et/ou PME.

Des tourteaux obtenus par deux processus (presse et par barattage) de transformation des amandes de karité ont été utilisés. Les résultats sur la caractérisation des tourteaux ont montré que les tourteaux obtenus par barattage répondent mieux aux caractéristiques de production de briquettes. L'amidon de manioc a été utilisé comme liant et les briquettes ont été produites à l'aide d'une presse artisanale. Nous sommes parvenus à produire des briquettes qui répondent aux normes et valorisables sous forme de biocombustibles. Il ressort de notre étude les conclusions suivantes :

- Notre presse admet une teneur maximale en eau, comprise entre 35 % et 50 % ; Avec l'ajout du liant, on obtient des produits plus denses, même si le PCI des briquettes est réduit proportionnellement à la teneur en liant. L'augmentation de la teneur en eau et la teneur en amidon dans la densification réduit les performances physiques des briquettes, bien qu'elle leur confère une meilleure texture ;
- Les briquettes produites par adjonction de liants ont de meilleurs rendements thermiques, meilleures consommations spécifiques et horaires que les briquettes sans liants et le bois. Cependant, plus les briquettes contiennent de l'amidon, plus elles produisent de la fumée. Bien que nous n'eussions pas d'appareils pour quantifier l'émission de fumée, à vue d'œil, les briquettes produisent moins de fumées que le bois.
- Les briquettes D.5.35 présentent les meilleures caractéristiques physico-chimiques et mécaniques. Toutefois, le rendement thermique est légèrement inférieur à celui du bois (ordre de 2 %) et sa consommation spécifique est très légèrement supérieure à celle du bois (ordre de 0,23 %). Les briquettes D.10.35 présentent les meilleures caractéristiques thermiques. Du point de vue de la teneur en humidité, de la densité et de la résistance à la compression, les briquettes sont conformes à la norme. Toutefois, la valeur de la résistance à l'impact n'est pas conforme à la norme (10 % inférieur à la norme). Somme toute, nous retiendrons les formulations **D.5.35** et **D.10.35** comme celles ayant donné les meilleures briquettes.

Durant notre stage, nous avons rencontré quelques difficultés. Ces difficultés sont surtout liées à la presse et aux conditions climatiques auxquelles nous faisons face à cette période de l'année

(Janvier et Février). La presse utilisée dans le cadre de cette étude ne disposait pas de moyen de contrôle des paramètres déterminants de densification tels la pression et la température. Les températures que nous avons enregistrées sont restées relativement faibles, variant entre 37 °C et 51 °C. Les mois de janvier et février au Burkina Faso sont habituellement caractérisés par un vent très chaud le jour, plus froid la nuit, et très sec, appelé « Harmattan ». Ces conditions rudes ont fortement contribué au craquellement de certaines briquettes durant le séchage.

Pour optimiser les résultats de la densification, et palier les problèmes rencontrés lors de notre étude, nous proposons les perspectives et recommandations suivantes :

- Remplacer la presse locale par une presse améliorée à vis conique qui permettrait de varier les paramètres de densification tels que la pression et de température ;
- Pour limiter l'émission des fumées, utiliser des foyers plus appropriés qui permettraient d'éviter le contact direct entre la marmite et le combustible.
- Mener des études avec la gomme arabique, dont les propriétés liantes rapportées sont meilleures et bien que plus onéreuse que l'amidon.

V. BIBLIOGRAPHIE

- Agence pour la Promotion des Exportations du Burkina. 2019. Monographie de la filiere karite. Burkina Faso : AGENCE POUR LA PROMOTION DES EXPORTATIONS DU BURKINA.
<http://www.importateur.apexb.bf/wp-content/uploads/monographie-karite-1.pdf>.
- Alés Jesús. 2019. Stratégie Nationale de Développement Durable de La Filière Karité Du Burkina Faso 2015-2019. le Centre du Commerce International (ITC).
https://cir-burkina.org/wp-content/uploads/2018/11/Burkina_Karite_Strategie.pdf.
- Briggs JI, and al. 1999. Effect of Ingredients and Processing Parameters on Pellet Quality. *Poultry Science* 78 (10) : 1464–71.
<https://doi.org/10.1093/ps/78.10.1464>.
- CDI and CRA. 1993. Les Briquettes à base de déchets végétaux. Centre de développement Industriel.
- Chaiklangmuang Suparin, Suwit Supa, and Kaewpet Prattana. 2007. Development of Fuel Briquettes from Biomass-Lignite Blends. *Chiang Mai Journal of Science* 35 (1): 43–50.
- Dimobe Kangbénié, and al. 2020. Climate Change Reduces the Distribution Area of the Shea Tree (*Vitellaria Paradoxa* C.F. Gaertn.) in Burkina Faso. *Journal of Arid Environments*, October 2020, (181) : 104–237.
<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104237>.
- Gado Ibrahim H., and al. 2013. Characterization of Briquettes Coming from Compacting of Paper and Cardboard Waste at Low and Medium Pressure. *Science + Business Media*, November 24, 2013.
- Global Alliance for Clean Cookstoves. 2014. Test D'ébullition de L'eau. Global Alliance for Clean Cookstoves.
[https://www.cleancookingalliance.org/technology-and-fuels/testing/protocols.html#:~:text=The%20Water%20Boiling%20Test%20\(WBT,of%20emissions%20produced%20while%20cooking.](https://www.cleancookingalliance.org/technology-and-fuels/testing/protocols.html#:~:text=The%20Water%20Boiling%20Test%20(WBT,of%20emissions%20produced%20while%20cooking.)
- Grover P.D., and Mishra S.K. 1996. Biomass briquetting: technology and practices. 46. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. FAO Regional Wood Energy Development Programme in Asia.
<http://leehite.org/biomass/documents/Biomass%20Briquetting%20Technology%20and%20Practices%20FAO.pdf>.
- Huko D., Kamau D.N., and Ogola W.O. 2015. Effetcts of Varying Particle Size on Mechanical and Combustion Characteristics of Mango Seed Shell Cashew Nut Shell. *International Journal of Engineering Science Invention* 4 (5): 32–39.
- Iddrisu Abdul-Mumeen, Didia Beauty, and Abdulai Adam. 2019. Shea Butter Extraction Technologies : Current Status and Future Perspective. *African Journal of Biochemistry Research* 13 (2) : 9–22.
<https://doi.org/10.5897/AJBR2018.1007>.
- KABORET Barthélémy, SAMA Passingbamba, and ZAMBELONGO Paulin. 2018. Stratégie Nationale de Développement de L'accès Des Produits Forestiers Non Ligneux (PFNL) Aux Marchés. 11.
https://www.un-page.org/files/public/strategie_commercialisation.pdf.
- Kaliyan Nalladurai, and Morey R. Vance. 2009. Factors Affecting Strength and Durability of Densified Biomass Products. *Biomass and Bioenergy* 33 (3): 337–59.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.08.005>.
- Kers Jesper, and al. 2010. “Determination of Physical, Mechanical and Burning Characteristics of Polymeric Waste Material Briquettes.” *Estonian Journal of Engineering* 16 (4): 307.
<https://doi.org/10.3176/eng.2010.4.06>.

- Mani Sudhagar, Tabil Lope G., and Sokhansanj Shahab. 2006. Specific Energy Requirement for Compacting Corn Stover. *Bioresource Technology* 97 (12): 1420–26. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.06.019>.
- MELZER Michael. 2013. Energetic Valorisation of Agricultural By-products in the sub-Saharan Zone : Biomass Pre-conditioning via Flash Pyrolysis. Burkina Faso : International Institute of Water and Environmental Engineering (2iE). <http://www.theses.fr/2013COMP2098>.
- Noumi Eric, Dabat Marie-Hélène, and Blin Joel. 2012. “Developpement Durable de La Transformation Traditionnelle Du Karite En Valorisant Energetiquement Les Residus Organiques” 4 (39): 239–45. <https://doi.org/10.13140/2.1.3417.8888>.
- Ozer Pierre. 2004. Bois de Feu et Déboisement Au Sahel: Mise Au Point. *Science et Changements Planétaires / Sécheresse*, 15 (3) : 243–51.
- Pages Xavier. 2009. Production, Obtention et Valorisation Des Beurres Exotiques. *Oléagineux, Corps Gras, Lipides* 16 (4-5-6): 248–53. <https://doi.org/10.1051/ocl.2009.0282>.
- Sawadogo Marie, and al. 2018. “Cleaner Production in Burkina Faso: Case Study of Fuel Briquettes Made from Cashew Industry Waste.” *Journal of Cleaner Production*, 195 (185) : 1047–56. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.261>.
- Tchakala I., and al. 2012. Optimisation Du Procédé de Préparation Des Charbons Actifs Par Voie Chimique À Partir Des Tourteaux de Karité et Des Tourteaux de Coton. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 6 (1): 461–78. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v6i1.42>.
- Tumuluru Jaya Shankar, and al. 2011. A Review of Biomass Densification Systems to Develop Uniform Feedstock Commodities for Bioenergy Application. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 5 (6) : 683–707. <https://doi.org/10.1002/bbb.324>.
- Womeni H.M., et al. 2007. “Séchage Des Amandes de Karité et Qualité Du Beurre : Impact Du Séchage Traditionnel Au Soleil. *TROPICULTURA* 25: 7.
- Yé Siédouba, et al. 2007. Étude Des Paramètres Opératoires de Pressage Mécanique Des Amandes de Vitellaria Paradoxa Gaertn C.F. (Karité). *Agricultural Science and Technology Information* 11 (4): 267–273.

Sites internet :

- **CIRAD. 2017. Tourteau de karité, huile > 5 %. Consulté [en ligne] le 23/09/2020**
« <https://Feedtables.com/fr/conten/tourteau-de-karite-huile-5> »
- **Gu Paul. 2007. Analyse thermogravimétrique et thermo différentielle. 2020. Consulté [en ligne] le 18/11/2021** « https://cristallographie.free.fr/title=Analyse_thermogravim%C3%A9trique_et_thermodiff%C3%A9rielle »
- **G. Laurent. 2010. Combustion du bois. Consulté [en ligne] le 17/01/2021**
« <https://energieplus-lesite.be/theories/chauffage11/combustion-du-bois/> »
- **DOUARD Frédéric. 2010. Le charbon de bois est-il un biocombustible satisfaisant ? Consulté [en ligne] le 23/06/2021** « www.bioenergie-promotion.fr/4703/le-charbon-de_bois-est-il-un-combustible-satisfaisant-pour-le-tiers-monde/ »

Annexes

Annexe 1 : Calcul du PCI des tourteaux de barattes.

Tableau VIII:Tableau de calcul du PCI des tourteaux de barattes.

Pouvoir Calorifique Inferieur (PCI)			
Données	1er essai	2ème essai	3ème essai
PCS brut moyen	21988,27024	21984,4204	21976,3026
Econd (J/g)	2511	2511	2511
K2	8,937	8,937	8,937
H anhydre	6,5	6,5	6,5
Héch	4,186	4,186	4,186
W	35,6	35,6	35,6
PCI brut (kJ/kg)	20154,98206	20151,1322	20143,0144
PCI brut moyen(kJ/kg)	20149,71		

Annexe 2 : Calcul du PCI des tourteaux de presse.

Tableau IX:Tableau de calcul du PCI des tourteaux de presse.

Pouvoir Calorifique Inferieur (PCI)			
Données	1er essai	2ème essai	3ème essai
PCS brut moyen	33888,58021	33615,927	34295,6966
Econd (J/g)	2511	2511	2511
K2	8,937	8,937	8,937
H anhydre (%)	6,5	6,5	6,5
Héch (%)	5,9943	5,9943	5,9943
W (%)	7,78	7,78	7,78
PCI brut (kJ/kg)	32348,05511	32075,4019	32755,1715
PCI brut moyen (kJ/kg)	32392,88		

Annexe 3 : Détermination du PCI du charbon de bois.

Tableau XI: Tableaux de calcul du pouvoir calorifique du charbon de bois.

Pouvoir Calorifique Inferieur (PCI) charbon de bois			
Données	1er essai	2ème essai	3ème essai
PCS brut moyen	30049,16123	29527,11346	30177,73899
Econd (J/g)	2511	2511	2511
K2	8,937	8,937	8,937
Hanhydre (%)	6,5	6,5	6,5
Héch (%)	6,5	6,5	6,5
W (%)	0	0	0
PCI brut (kJ/kg)	28590,50878	28068,46101	28719,08653
PCI brut moyen (kJ/kg)	28459,35		

Annexe 4 : Tableau de calcul de la résistance à la compression des briquettes sans liants.

Tableau XII: Tableau de calcul de la résistance à la compression des briquettes sans liants.

Briquettes sans liants C5					
Échantillons	Force de rupture	Diamètre	Section transversale	Resistance	Résistance moyenne
B1	0,73	0,045	0,0016	458,9950	424
B2	0,513	0,044	0,0015	337,3823	
B3	0,717	0,045	0,0016	450,8211	
B4	0,716	0,045	0,0016	450,1923	

Annexe 5 : Calcul de l'indice de résistance des briquettes de la formulation F5.35

Tableau XIII:Tableau de calcul de l'indice de résistance des briquettes de la formulation D.5.35.

Formulation D.5.35					
Échantillons	Force de rupture	Diamètre	Section transversale	Resistance	Résistance moyenne
B1	1,231	0,048	0,0018	680,2769	662
B2	1,148	0,048	0,0018	634,4093	
B3	1,227	0,049	0,0019	650,6726	
B4	1,237	0,048	0,0018	683,5926	

Annexe 6 : Tableau de calcul de l'indice de résistance des briquettes de la formulation D.5.50

Tableau XIV:Tableau de calcul de l'indice de résistance des briquettes de la formulation D.5.50.

Formulation D5.50					
Échantillons	Force de rupture	Diamètre	Section transversale	Resistance	Résistance moyenne
B1	0,85	0,049	0,0019	450,7512	453
B2	0,854	0,049	0,0019	452,8724	
B3	0,851	0,049	0,0019	451,2815	
B4	0,857	0,0488	0,0019	458,1960	

Annexe 7 : Calcul de la densité des briquettes de la formulation D.5.35

Tableau XV:Tableau de calcul de la densité des briquettes de la formulation D.5.35.

Formulation D5.35							
	Masse	Longueur	Diamètre	Section	Volume	Densité	Densité moyenne
B1	0,2169931	0,124	0,048	0,0018	0,0002	967,0566	963
B2	0,2130109	0,124	0,048	0,0018	0,0002	949,3094	
B3	0,2162026	0,124	0,048	0,0018	0,0002	963,5336	
B4	0,218102	0,124	0,048	0,0018	0,0002	971,9985	

Annexe 8: Calcul de la dureté des briquettes de la formulation D.5.35.

Tableau XVI:Tableau de calcul de la durabilité des briquettes de la formulation D.5.35.

Formulation D5.35			
Échantillons	Masse initiale	Masse finale	Dureté
1	239	201	84
2	235	195	83
3	237	196	83

Annexe 9 : Calcul de l'indice de résistance à l'impact des briquettes de la formulation D.5.35

Tableau XVII:Tableau de calcul de l'indice de résistance à l'impact des briquettes de la formulation D.5.35.

Formulation D.5.35			
Échantillons	N chute	n morceaux	IRI
1	2	4	50
2	2	4	50
3	2	5	40
4	2	4	50
5	2	4	50

Annexe 10 : Synthèse des résultats de la caractérisation physique des briquettes.

Tableau XVIII:Tableau de synthèse des résultats de la caractérisation des briquettes.

Résultats de la caractérisation physique des briquettes				
	Densité en kg/m ³	IRI en %	RC en kPa	Dureté en %
Référence	900	50	350	–
D.5	857	20	424	79
D.5.35	963	50	662	83
D.5.50	911	33	339	80
D.10.35	905	35	510	78
D.10.50	907	27	329	75

Annexe 11 : Résultats des tests de combustion.

Tableau XIX: Résultats des tests d'ébullition de l'eau des briquettes.

Résultats du Water Boiling Test															
	Formulation C5			Formulation D.5.35			Formulation D.5.50			Formulation D.10.35			Formulation D.10.50		
	Test 1	Test 2	Moyenne	Test 1	Test 2	Moyenne	Test 1	Test 2	Moyenne	Test 1	Test 2	Moyenne	Test 1	Test 2	Moyenne
Masse initiale de combustible (kg)	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Température initiale d'eau (°C)	28,9	29	28,9	28,9	28,9	28,9	29	28,7	28,75	28,7	28,7	28,7	29,1	29,1	29,1
Température finale d'eau (°C)	98	98	98	98	98	98	98	98	98,05	98,3	98,1	98,2	98	98	98
Quantité initiale d'eau (kg)	7,33	7,3	7,33	7,33	7,33	7,33	7,3	7,33	7,33	7,33	7,33	7,33	7,33	7,33	7,33
Quantité finale d'eau (kg)	7,086	7,1	7,09	7,01	7,06	7,03	7	7,029	7,03	6,93	6,97	6,95	7,059	7,038	7,049

Temps d'amorçage des flammes (mn)	8	8	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Durée d'ébullition de l'eau (mn)	23	24	23,5	27	26	26,5	28	28	28	35	33	34	32	34	33
Masse du charbon (kg)	0,266	0,3	0,26	0,21	0,21	0,21	0,2	0,206	0,204	0,198	0,201	0,1995	0,21	0,204	0,207
PCI du charbon (MJ/kg)			24,6			24,6			24,33			23,6			23,82

Tableau XX: Résultats des tests d'ébullition de l'eau du charbon de bois et du bois de chauffe.

	Charbon de bois			Bois de chauffe		
	Test 1	Test 2	Moyenne	Test 1	Test 2	Moyenne
Masse initiale de combustible (kg)	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Température initiale d'eau (°C)	28,1	28	28,1	27,7	27,9	27,8
Température finale d'eau (°C)	98	98	98,2	98,3	98,1	98,2
Quantité initiale d'eau (kg)	7,33	7,3	7,33	7,33	7,33	7,33
Quantité finale d'eau (kg)	6,978	7	6,99	7,03	7,04	7,04
Temps d'amorçage= des flammes (mn)	20	18	19	3	3	3
Durée d'ébullition de l'eau (mn)	28	28	28	31	29	30
Masse du charbon (kg)	0,702	0,7	0,71	0,12	0,13	0,12
PCI du charbon (MJ/kg)			28,46			17,98

Tableau XXI: Tableaux des Rendements thermiques des briquettes, du charbon de bois et du bois de chauffe.

Évaluation du rendement thermique des briquettes							
	C5	D.5.35	D.5.50	D.10.35	D.10.50	Charbon	Bois
Masse initiale de l'eau	7,33	7,33	7,33	7,33	7,33	7,33	7,33
Masse d'eau évaporée	0,245	0,296	0,3	0,38	0,2815	0,336	0,2925
Température initiale en °C	28,9	28,7	28,75	28,7	29,1	28,1	27,8
Température finale en °C	98	98	98,08	98,2	98	98,15	98,15
Masse de la brique consommée	0,988	0,99	0,9965	1,0005	0,993	0,49	1,0755
Capacité calorifique de l'eau kJ/(kg.K)	4,18	4,18	4,18	4,18	4,18	4,18	4,18
PCI de la brique	20150	19801	19810	19452	19441	28460	17981
Chaleur latente d'évaporation de l'eau (kJ/kg)	2260	2260	2260	2260	2260	2260	2260
Rendement thermique (%)	13,42	14,25	14,20	15,35	14,23	20,84	14,56

Tableau XXII: Tableaux des Consommation spécifiques des briquettes, du charbon de bois et du bois de chauffe.

Évaluation de la consommation spécifique des briquettes							
	C5	D.5.35	D.5.50	D.10.35	D.10.50	Charbon de bois	Bois de chauffe
Masse marmite vide (g)	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66
Masse marmite+eau (g)	8,99	8,99	8,99	8,99	8,99	8,996	8,996
Masse initiale biocombustible (g)	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Masse finale biocombustible (g)	0	0	0	0	0	0,71	0
Humidité du biocombustible (g)	7,25	7,03	7,14	7,31	7,28	2,42	7,25
Consommation spécifique (g/l)	151,8	152,202	152	151,744	151,79	65,23	151,8

Tableau XXIII: Consommation horaire des briquettes, du charbon de bois et du bois de chauffe.

Évaluation de la consommation horaire des briquettes							
	C5	D.5.35	D.5.50	D.10.35	D.10.50	Charbon de bois	Bois de chauffe
Masse de biocombustible consommé	0,988	0,9895	0,997	1,0005	0,993	0,49	1,076
Durée du test	23,5	28,9	28	34	33	28	30
Consommation horaire	42,04	34,24	35,59	29,43	30,09	17,5	35,85

Annexe 12 : Test de résistance à la compression



Figure 25: Test de résistance à la compression.

Annexe 13 : Briquettes après 21 jours de séchage.



Figure 26: Aspect des briquettes D.5.50 et D.10.50.



Figure 27: Aspect des briquettes D.5.35



Figure 28: Aspect des briquettes D.5.60 après séchage.



Figure 29: Aspect des briquettes D.10.60 après séchage.

Annexe 14 : Presse locale utilisée pour la production des briquettes.

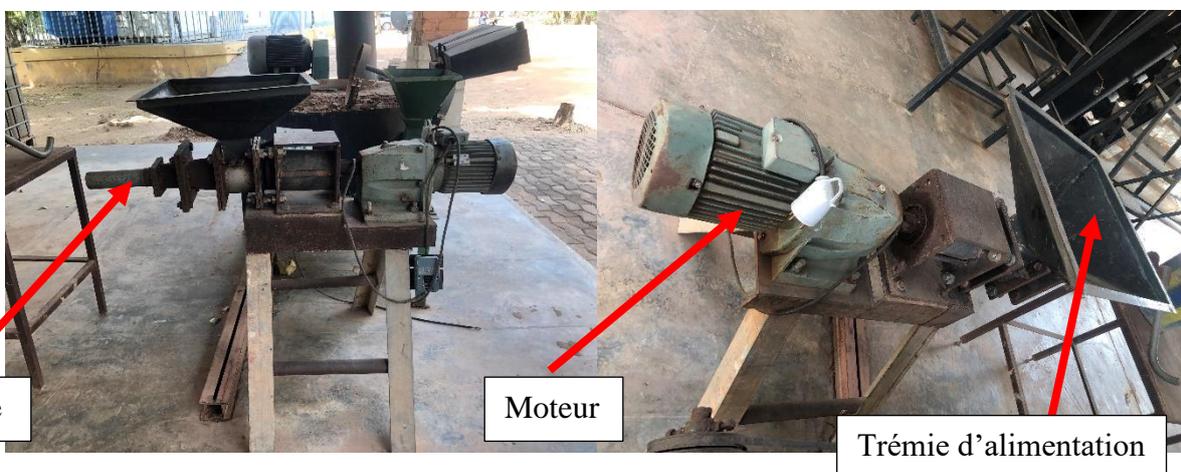


Figure 30: Presse locale à vis conique.

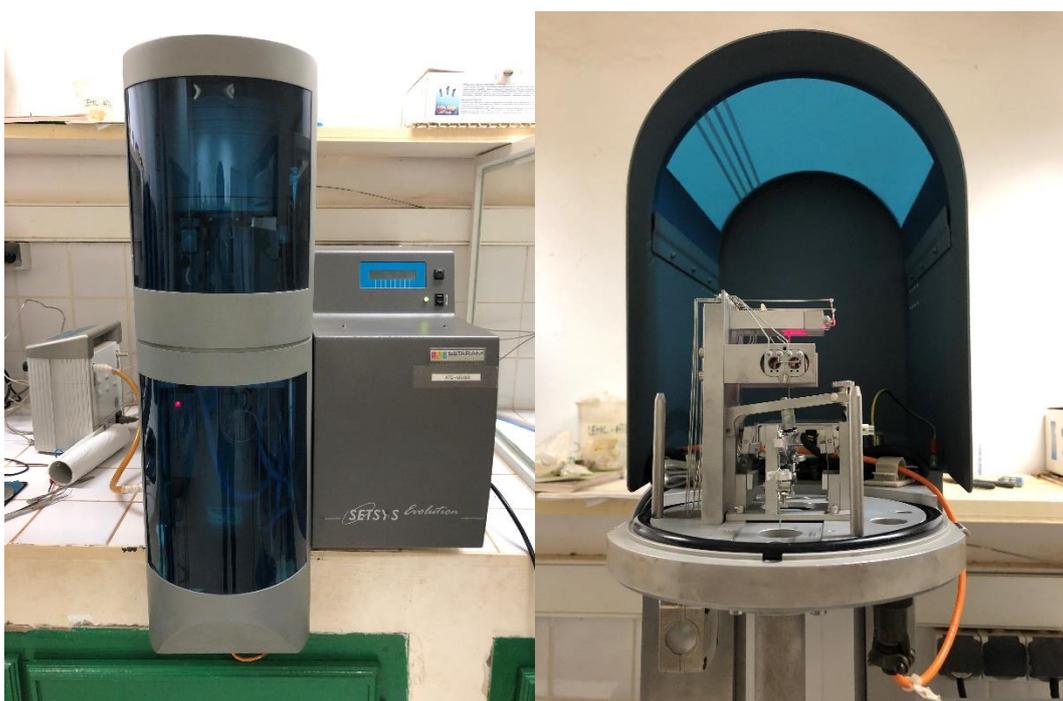
Annexe 15 : Analyseur thermogravimétrique

Figure 31 : Analyseur thermogravimétrique.

Annexe 16 : Test d'ébullition de l'eau avec les briquettes D.10.35



Figure 32: Foyer contenant les briquettes avant la combustion.



Figure 33 Etat de la flamme 9 minutes après allumage



Figure 34: Foyer + marmite.



Figure 35: Marmite + Braises + flamme après retrait de la marmite

Annexe 17 : Test d'ébullition de l'eau avec le charbon de bois



Figure 36: Foyer contenant le charbon du bois.



Figure 37: Etat de la flamme 19 minutes après allumage du feu



Figure 38: Marmite + Foyer + Braises

Annexe 18 : Test d'ébullition de l'eau avec le bois de feu



Figure 39: Foyer contenant des morceaux de bois de chauffe.



Figure 40: Marmite + foyer + fumées.