

# UNIVERSITE ASSANE SECK DE ZIGUINCHOR



## UFR SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Département de Physique

**Mention** : Physique et Applications

**Mémoire de MASTER**

**Spécialité** : Énergies Renouvelables et Efficacité Énergétique

**Option** : Energie Solaire et Bioénergie

Sujet : Étude de faisabilité de la valorisation énergétique des coques d'anacarde en vue de la réalisation d'un projet pilote de valorisation

Présenté et soutenu publiquement par

**Moussa DIOP**

Le 27/07/2024 devant le jury composé de :

Nom Prénom	Grade	Qualité	Établissement
KOBOR Diouma	Professeur titulaire	Président de jury	UASZ
THIAO Serigne	Maître Assistant	Rapporteur	UASZ
BASSENE Moïse	Technicien/ Invité	Examineur	ETHICAJOU
DRAME Pape Elimane	Technicien/ Invité	Examineur	SCPL
BA Ndèye Khadidiatou Alioune NDIAYE	Ingénieur	Examineur	ANER
HIMBANE Philippe Bernard	Docteur	Examineur	UASZ
NDIAYE Lat Grand	Professeur titulaire	Directeur de recherches	UASZ

*Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail tout spécialement aux êtres les plus chers à mon cœur, aux personnes qui m'ont bien éduqué et m'ont toujours entouré d'amour et de soutien, ma mère adorable Fanta, sans oublier ma grand-mère adorable Mama Camara et mon oncle El hadj Mamadou Foulo DIEDHIOU*

*A mes très chères cousines : Aida, Néné Oussey DIEDHIOU, Souadou Nanki,*

*A mes très chers cousins : Baba Diallo et sa femme Khady, Mackiw, Sidiya, Yaya, Al Hassane, Serigne Mansour, Al Hayba et Tidiane DIEDHIOU*

*A ma très chère grande sœur Mariama BODIANG*

*A ma très chère petite sœur Sououkar DAFPE*

*A mes très chers grands frères Ismaila DIATTA pour ses conseils et Ablaye DIEDHIOU*

*A mes très chers frères : Cheikh et Ndiaga*

*A ma très chère tante Souadou DIEDHIOU*

*A mes très chers oncles : Ibrahima, khalifa DIEDHIOU et Sanoussy Camara*

*A mes très chères tantes : Aissatou DIEDHIOU, Alimatou BA, Fatou SAMBOU et Sophie CAMBAYE*

*A mes chers Pères : Mon père Matar et mon oncle DIALLO*

*A toutes mes mamans de Kénia et leurs familles*

*A une personne que j'estime et qui m'a beaucoup aidé Monsieur Alexandre Coréa*

*A mes enseignants et enseignantes qui sont des papas et mamans pour moi*

*A mes grands qui m'ont accueilli : Samba BOCOUM Kémo COLY et Sadou.*

*A mes très chers amis*

*A mes collègues de la licence au Master.*

## ***Remerciement***

Au nom d'Allah le plus Grand merci Lui revient de nous avoir guidé vers le droit chemin, de nous avoir aidées tout au long de nos années d'études. Je tiens sincèrement à exprimer ma reconnaissance envers mon directeur de mémoire Professeur Lat grand NDIAYE pour ses précieux conseils, ses encouragements, son soutien, son engagement inébranlable et sa disponibilité.

Surtout un grand merci à ma Co-encadrante Mme Ndèye Khadidiatou Alioune NDIAYE BA, Cheffe division des études à l'ANER et à tous son équipe eu égard à leur soutien.

Je remercie Dr Philippe Bernard HIMBANE pour sa disponibilité, ses directives, son soutien et ses encouragements.

Mes remerciements vont à l'encontre des membres du jury tels que le Professeur Diouma KOBOR, Dr Serigne THIAO, Mr Moïse BASSENE, Mr Pape Elimane DRAME qui ont accepté de juger ce travail mais aussi pour leur accompagnement.

Un grand merci l'ensemble des enseignants du département de Physique et de Chimie de l'UASZ pour avoir de loin ou de près participé à ma formation universitaire durant ces cinq années.

Je tiens à remercier Tessembou BIAYE, Madame AIDARA et Georges Ambouor DIEDHIOU pour leur disponibilité, et encouragements.

Mes remerciements vont également à l'encontre de tous les docteurs, doctorants, mes camarades de promotion et mes amis.

Mes sincères remerciements vont à l'encontre de tous mes enseignants de l'école primaire au lycée particulièrement à Monsieur Alexandre COREA pour son soutien incommensurable.

Je tiens à remercier tous mes frères et sœurs de l'AEEMS qui constituent une seconde famille pour moi et tous mes mamans, papa et frères de Kénia pour leurs soutiens indéfectibles et leurs bienveillances.

Je tiens à remercier également les entrepreneurs comme Mr DRAME, Mr SADIO et Mr BASSENE qui m'ont facilité la tâche lors de mes visites sur site de leur installations industrielles.

Un immense remerciement à toute ma famille qui m'a toujours soutenue et portée une grande considération envers ma personne.

## **Résumé**

L'énergie est un élément essentiel pour l'Homme et son environnement ; il est donc primordial de la mettre à la disposition des populations afin de leur permettre de vivre décemment et dans de meilleures conditions. Pour satisfaire les besoins énergétiques des populations, le recours aux sources d'énergies renouvelables est capital surtout dans le but de protéger l'environnement. Dès lors, il s'avère donc nécessaire de favoriser une production énergétique en se basant sur la transformation des coques d'anacardes. C'est pour cela qu'il est urgent d'analyser les besoins énergétiques des unités de transformation industrielle et villageois (artisanale) afin de proposer de meilleures méthodes de valorisation de ces déchets. Ce présent travail de master s'inscrit donc dans un cadre de valorisation énergétique des coques d'anacarde en Casamance. Au cours de notre étude, des enquêtes ont été effectuées dans deux unités de transformations à savoir la Société de Commercialisation de Produits Locaux (SCPL) de Ziguinchor et Ethicajou de Kolda. A l'issue de ces enquêtes, des échantillons de coques d'anacarde ont été collectées pour la réalisation des analyses au laboratoire Chimie et Physique des Matériaux (LCPM). Ces analyses nous ont permis d'aboutir à une caractérisation physico-chimique des coques d'anacarde. En effet, c'est à la fin de cette caractérisation qu'on a pu déterminer les pouvoirs calorifiques des deux échantillons qui sont respectivement 18,7 MJ/kg pour les coques produites par Ethicajou et 17,4 MJ/kg pour celle au niveau de la SCPL. Sur la base de ces résultats et des différentes données obtenues lors des enquêtes, nous avons pu estimer l'énergie libérée par les coques d'anacarde qui sera nécessaire pour le fonctionnement des technologies rencontrées. Pour le cas d'Ethicajou la pyrolyse des coques d'anacarde libèrent 566,61 MJ en termes de vapeur et de biochars tandis que dans le cas de la SCPL, elles libèrent 5220 MJ transformée en chaleur et en électricité. La dernière partie du travail porte sur une étude de faisabilité du projet. Elle est divisée en deux étapes dont l'une traite l'étude technique et l'autre l'étude financière dont le coût s'élève à 57 932 429 FCFA.

**Mots clés** : Valorisation, Coques anacarde, Pyrolyse, Biochar, Chaleur, Électricité.

**Abstract.**

Energy is an essential element for humans and their environment; It is therefore essential to make it available to the population in order to allow them to live decently and in better conditions. To meet the energy needs of the population, the use of renewable energy sources is essential, especially in order to protect the environment. Therefore, it is necessary to promote energy production based on the processing of cashew nut shells. This is why it is urgent to analyze the energy needs of industrial and village (artisanal) processing units in order to propose better methods of recovering this waste. This master's thesis is therefore part of a framework for the energy recovery of cashew nut shells in Casamance. During our study, surveys were carried out in two processing units, namely the SCPL (Local Products Marketing Company) of Ziguinchor and Ethicajou of Kolda. At the end of these investigations, samples of cashew nut shells were collected for testing at the Laboratory of Chemistry and Physics of Materials (LCPM). These analyzes allowed us to achieve a physico-chemical characterization of the cashew nut shells. Indeed, it was at the end of this characterization that it was possible to determine the calorific values of the two samples, which are respectively 18,7 MJ/kg for the shells produced by Ethicajou and 17,4 MJ/kg for the one at the SCPL level. Based on these results and the various data obtained during the surveys, we were able to estimate the energy released by the cashew nut shells that will be necessary for the operation of the technologies encountered. In the case of Ethicajou, the pyrolysis of cashew nut shells releases 566,61 MJ in terms of steam and biochar, while in the case of SCPL, they release 5220 MJ transformed into heat and electricity. The last part of the work concerns a feasibility study of the project. It is divided into two stages, one of which deals with the technical study and the other with the financial study, the cost of which amounts to 57 932 429 FCFA.

**Keywords:** Cashew nut Shells, Pyrolysis, biochar.

## Liste des abbreviations

ANER	Agence Nationale des Énergies Renouvelables
CO <sub>2</sub>	Dioxyde de carbone
ACA	Alliance Africain de Cajou
ODD	Objectif de Développement Durable
FIRCA	Fonds Interprofessionnel pour la recherche et le Conseil Agricole
ACI	Africaine de consultance et d'Ingénierie
RONGEAD	Réseau européen des Organisations Non Gouvernementales sur les questions Agro-alimentaires et le Développement
CEFREPAD	Centre Francophone de Recherche Partenariale sur l'Assainissement, les Déchets et l'Environnement
PADEC	Programme d'Appui au Développement Économique culturel
PRACAS	Programme d'Accélération de la Cadence de l'Agriculture Sénégalaise
PSE	Plan Sénégal Émergent
SCPL	Société de Commercialisation de Produits Locaux
AVSF	Agronomes et Vétérinaires sans Frontières
ICA	Initiative du Cajou Africain
PASA	Projet Anacardier Sénégalo Allemand
ISRA	Institut Sénégalaise de Recherche Agricole
H2CP	High Calorific Cashew Pyrolizer
CO	monoxide de Carbone
CH <sub>4</sub>	Méthane
HTC	Carbonisation Hydrothermale
PCI	Pouvoir Calorifique Inferieur
PCS	Pouvoir Calorifique Supérieur
CNSL	Cashew Nut Shell Liquid
ASER	Agence Sénégalaise d'Électrification Rurale
GPL	Gaz de Pétrole Liquéfié
SENELEC	Société Nationale d'Électricité du Sénégal
FAO	Organisation des Nations-unies pour l'alimentation
PACAS	Projet d'appui à la compétitivité de l'anacarde

## Table des matières

<i>Dédicace</i> .....	i
<i>Remerciement</i> .....	ii
<b>Résumé</b> .....	iii
<b>Abstract</b> .....	iv
<b>Listes des abréviations</b> .....	v
<b>Table des matières</b> .....	vi
<b>Listes des figures</b> .....	viii
<b>Listes des tableaux</b> .....	ix
<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	1
<b>Chapitre 1 : Etudes bibliographiques sur la valorisation des coques d’anacarde</b> .....	3
<b>Introduction</b> .....	4
<b>1.1 Présentation de la filière anacarde</b> .....	4
<b>1.2 Disponibilité des coques d’anacarde au Sénégal</b> .....	7
<b>1.3 Différentes modes de pré-conditionnement des coques d’anacarde</b> .....	8
<b>1.3.1 Pré-conditionnement des coques d’anacardes en sac</b> .....	8
<b>1.3.2 Pré-conditionnement des coques d’anacardes en briquettes de charbon</b> .....	9
<b>1.3.3 Pré-conditionnement par traitement à la vapeur des coques d’anacardes</b> .....	10
<b>1.4 Etude du potentiel de déchets (sous-produits de la filière anacarde) et les méthodes de valorisation</b> .....	10
<b>1.4.1 Etude du potentiel de déchets (sous-produits de la filière anacarde)</b> .....	10
<b>1.4.2 Technique de mise en valeur des coques d’anacarde</b> .....	14
<b>1.5. Les limites de la filière</b> .....	18
<b>Conclusion</b> .....	19
<b>Chapitre 2 : Matériels et méthodes</b> .....	20
<b>Introduction</b> .....	21
<b>2.1 Caractérisation physico-chimique des coques d’anacarde et bilan énergétique</b> .....	21
<b>2.1.1 Analyse immédiate</b> .....	21
• Détermination du taux d’humidité.....	21
• Détermination du taux de cendres.....	22
• Détermination du taux de matière volatile.....	23
• Détermination du taux de carbone fixe.....	24
<b>2.1.2 Analyse élémentaire</b> .....	24
<b>2.1.3 Détermination du pouvoir calorifique à l’aide de la formule de Vondracek</b> .....	24
<b>2.1.4 Mesure de température sur pilote industriel</b> .....	25

<b>2.2. Présentation et principe de fonctionnement des deux unités de pyrolyse</b> .....	26
<b>2.1.2. Présentation et principe de fonctionnement de l'unité de pyrolyse d'Ethicajou</b> .....	26
<b>2.2.2 Présentation et principe de fonctionnement du gazéificateur de la SCPL</b> .....	28
<b>2.3 Typologie des unités de pyrolyse rencontrées</b> .....	29
<b>2.3.1 La technologie installée à ETHICAJOU</b> .....	29
• Four H2CP ou High Calorifique Cashew pyrolyser en anglais.....	30
• Une chaudière.....	30
• Un autoclave.....	30
• Séchoir.....	31
• Choc thermal .....	31
<b>2.3.2 La technologie installée à la SCPL</b> .....	31
<b>2.4 Détermination du bilan énergétique de l'installation de Ethicajou</b> .....	32
<b>2.5 Détermination d'un bilan énergétique sur gazéificateur</b> .....	35
<b>Conclusion</b> .....	36
<b>Chapitre 3 : Bilan énergétique des unités d'Ethicajou et de la SCPL et étude faisabilité d'un projet de valorisation des coques de cajou</b> .....	37
<b>Introduction</b> .....	38
<b>3.1 Calcul du bilan énergétique pour la production de chaleur de l'usine Ethicajou</b> .....	38
<b>3.2 Calcul du bilan d'énergie pour la production d'électricité et de chaleur de la SCPL</b> .....	40
<b>3.3 Résultats et discussions</b> .....	42
<b>3.3.1 Caractérisation des échantillons étudiés</b> .....	42
<b>3.3.2 La performance énergétique des deux unités transformation</b> .....	42
<b>3.4. Etude faisabilité du projet</b> .....	43
<b>3.4.1. Analyse des besoins énergétiques de la population et des unités de transformations</b> .	44
<b>3.4.2. Zone d'implantation du projet</b> .....	45
<b>3.5. Impact environnemental et social</b> .....	46
<b>3.5.1 Rappel des composantes et phases du projet</b> .....	46
<b>3.5.2 Évaluations des impacts</b> .....	47
<b>3.6. Étude technico-financière</b> .....	50
<b>3.6.1. Étude technique</b> .....	50
<b>3.6.2 Étude financière</b> .....	54
<b>3.7 Pilote de valorisation des coques d'anacarde</b> .....	60
<b>Conclusion</b> .....	61
<b>Conclusion générale et Perspectives</b> .....	62
<b>Référence bibliographiques</b> .....	63



## Listes des figures

<b>Figure 1.1</b> : Répartition de la production mondiale de noix de cajou par bassin de production en 2023[3] .....	4
<b>Figure 1.2</b> : Coques de noix de cajou .....	6
<b>Figure 1.3</b> : Image de coques d’anacardes prise au GIE de Balantacounda.....	6
<b>Figure 1.4</b> : Le four H2CP de l’usine ETHICAJOU .....	7
<b>Figure 1.5</b> : Coques d’anacarde conditionnées dans des sacs à la SCPL .....	9
<b>Figure 1.6</b> : Pré-conditionnement en briquettes de charbon.....	9
<b>Figure 1.7</b> : Pré-conditionnement par traitement à vapeur à la SCPL.....	10
<b>Figure 1.8</b> : Réacteurs de pyrolyse fabriqué et installé au Benin (a) Vue avant, (b) Vue arrière [8] ...	12
<b>Figure 1.9</b> : Mécanisme de la combustion de la biomasse [14].....	14
<b>Figure 1.10</b> : Mécanisme de la gazéification de la biomasse [14].....	15
<b>Figure 1.11</b> : Mécanisme de la carbonisation hydrothermale de la biomasse [12] .....	16
<b>Figure 1.12</b> : Carbonisât ou char [19].....	17
<b>Figure 1.13</b> : Mécanisme de la pyrolyse de la biomasse [12] .....	17
<b>Figure 1.14</b> : CNSL ou baume de cajou [18] .....	18
<b>Figure 2.1</b> : Balance infrarouge type KERN (LCPM).....	22
<b>Figure 2.2</b> : Four à moufle.....	23
<b>Figure 2.3</b> : Centrale d’acquisition .....	26
<b>Figure 2.4</b> : Thermocouple de type K utilisé.....	26
<b>Figure 2.5</b> : Schéma d’installation de la technologie d’Ethicajou.....	27
<b>Figure 2.6</b> : Vue de face et de profil du système de gazéification de la SCPL .....	29
<b>Figure 2.7</b> : Gazéificateur de la SCPL.....	32
<b>Figure 2.8</b> : Bilan énergétique du système chaudière.....	33
<b>Figure 2.9</b> : Bilan énergétique du gazéificateur .....	35
<b>Figure 3.1</b> : Bilan énergétique du gazéificateur .....	41
<b>Figure 3.2</b> : Déforestation de la forêt Casamançaise [26] .....	48
<b>Figure 3.3</b> : Vue de dessus du réacteur à charbon .....	52
<b>Figure 3.4</b> : Vue en 3D du réacteur à charbon.....	52
<b>Figure 3.5</b> : Présentation forme de la claie de séchage.....	53
<b>Figure 3.6</b> : Diagramme de l’évolution du chiffre d’affaires prévisionnel.....	58

## Listes des tableaux

<b>Tableau 1.1</b> : Caractéristiques d'un réacteur de pyrolyse installé au Bénin [7] .....	11
<b>Tableau 1.2</b> : Caractéristiques d'un pyrolyseur installé au Burkina Faso [8] .....	12
<b>Tableau 2.1</b> : Explication des numéros énumérés dans le tableau .....	28
<b>Tableau 2.2</b> : Caractéristique du gazéificateur .....	32
<b>Tableau 2.3</b> : Capacité de conception du système production de puissance 100 kW .....	32
<b>Tableau 3.1</b> : Définitions des paramètres utilisés pour le calcul de l'énergie utile .....	38
<b>Tableau 3.2</b> : Tableau des valeurs collectées lors de l'enquête à la SCPL.....	40
<b>Tableau 3.3</b> : Résultats des analyses élémentaire.....	42
<b>Tableau 3.4</b> : Performance énergétique des deux unités transformation.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<b>Tableau 3.5</b> : Effets négatifs entraînés par le projet.....	48
<b>Tableau 3.6</b> : Matériels de la plateforme de briquetage .....	50
<b>Tableau 3.7</b> : Caractéristiques de la presse .....	52
<b>Tableau 3.8</b> : Charges d'exploitations de la plateforme de briquetage .....	55
<b>Tableau 3.9</b> : Coût d'investissement de la plateforme de briquetage.....	55
<b>Tableau 3.10</b> : Amortissement de l'investissement.....	57
<b>Tableau 3.11</b> : Compte de résultat prévisionnel.....	57
<b>Tableau 3.12</b> : Charges d'exploitation du système de cogénération .....	59
<b>Tableau 3.13</b> : Charges des personnels du système de cogénération .....	59
<b>Tableau 3.14</b> : Coût d'investissement du système de cogénération .....	59
<b>Tableau 3.15</b> : Pilote de valorisation des coques d'anacarde .....	60

## **INTRODUCTION GENERALE**

L'énergie est un élément essentiel pour l'Homme et son environnement. Mieux, l'accès à l'énergie pour tous doit être une réalité et même, un droit fondamental. Comme le stipule l'objectif 7 des ODD « l'énergie occupe une place prépondérante dans pratiquement tous les défis majeurs, ainsi que dans les perspectives qui se présentent dans le monde actuel. Que ce soit pour les emplois, la sécurité, les changements climatiques, la production de nourriture ou l'augmentation des revenus, il est primordial que tous aient accès à l'énergie. Cependant, l'accès à cette énergie est à l'origine de beaucoup de controverses. En effet, depuis l'avènement de la révolution industrielle le monde ne cesse de subir les effets néfastes de ces énergies encore appelées énergies fossiles. L'utilisation des énergies fossiles, considérée comme la clé de voûte de l'ère moderne, a permis à l'humanité de bouleverser son environnement de manière significative en seulement quelques siècles. La mise en valeur intensive de ces sources d'énergie, a provoqué des transformations profondes de la structure sociale, avec un confort de vie sans précédent et une liberté de déplacement quasi-illimité. Ces changements ont entraîné une explosion de la consommation énergétique rapportée à chaque habitant à l'échelle du globe. En effet, depuis des siècles cette consommation énergétique sans cesse a mécaniquement entraîné une augmentation considérable des émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) issues des énergies fossiles. Ces énergies fossiles sont non renouvelables à l'échelle humaine et provoquent un dégagement de gaz toxique. En ce qui concerne les énergies renouvelables, leur mauvaise valorisation peut également contribuer à la pollution atmosphérique comme le cas de la combustion de biomasse.

Il faut noter aussi que l'utilisation de cette biomasse de façon abusive est à l'origine de la déforestation entraînant ainsi le changement climatique. Ces changements climatiques suscitent d'énormes problèmes à nos sociétés qui cherchent toujours à y remédier. L'engagement des gouvernements à abandonner les énergies fossiles d'une part, de même que la nécessité de diminuer les émissions de gaz à effet de serre d'autre part encourageant la quête de sources d'énergie qualifiées « des énergies renouvelables et propres ».

Les combustibles de substitution semblent être les solutions adéquates dans la recherche d'alternatives, car leur provenance permet un renouvellement continu et peut réduire voire abolir l'utilisation du charbon de bois et des énergies fossiles.

Ce mémoire intitulé : « Étude de faisabilité de la valorisation énergétique des coques d'anacarde en vue de la réalisation d'un projet pilote de valorisation » s'inscrit dans le cadre de la

transformation des coques d'anacarde pour la production de combustibles de substitution afin de réduire la pression humaine sur l'environnement.

Ce mémoire a pour objectif de proposer une valorisation des coques d'anacarde pour subvenir aux besoins énergétiques de la population.

Plus spécifiquement, ce mémoire abordera :

- l'étude du potentiel des coques d'anacarde (sous-produits de la filière anacarde) ;
- l'analyse des besoins énergétiques des unités et entreprises de transformation ;
- l'étude des méthodes de pré-conditionnement des combustibles (combustion directe après pressage, aggro-briquetage, etc.) ;
- le dimensionnement et adaptation des fours et/ou chaudières mixtes de coques/bois, économes en énergie ;

Le présent travail est composé de trois (3) chapitres : le premier chapitre présente une brève revue de la valorisation des coques d'anacarde en montrant leurs disponibilités au Sénégal et leurs utilités. Le deuxième chapitre est consacré à la caractérisation physico-chimique des coques d'anacarde et à l'établissement des formules utilisées pour faire le bilan énergétique des unités de transformations étudiées. Le troisième chapitre fait l'objet de la détermination du bilan énergétique et d'une étude financière pour estimer la rentabilité du projet et inciter les investisseurs de s'y lancer. Une synthèse des trois chapitres du mémoire servira de conclusion générale avant d'exploiter d'éventuelles perspectives pour de futures études.

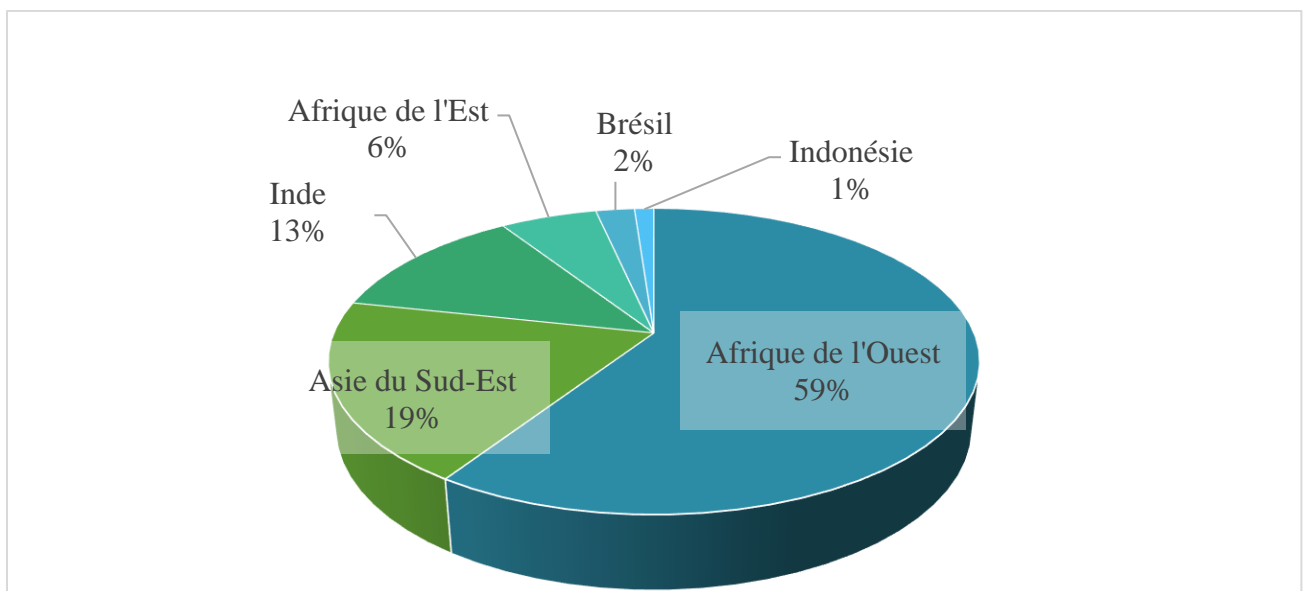
## **Chapitre 1 : Etude bibliographique sur la valorisation des coques d'anacarde**

## Introduction

Au niveau de ce chapitre, il est question de montrer l'importance de la filière anacarde. De ce fait, nous présenterons d'abord la filière anacarde en évoquant la disponibilité de ses coques au Sénégal. Ensuite, nous mettrons en évidence l'importance de ces coques en mettant l'accent sur les diverses approches de valorisation. Enfin, on terminera par présenter les potentiels des déchets de l'anacarde et leurs méthodes de valorisation.

### 1.1 Présentation de la filière anacarde

L'anacardier est une filière non négligeable en Afrique et précisément en Afrique de l'Ouest, qui est devenue depuis une dizaine d'années la première zone productrice d'anacarde au monde [1] (voir figure 1.1). En Afrique, entre 2011 et 2018, la production en noix brutes est passée de 1 million de tonnes à 1,8 million de tonnes avec une croissance annuelle de 5,8 % dont la moitié est produite par la Côte d'Ivoire. Selon Lewal et *al*, cette hausse est attribuable à la valeur économique de l'espèce [2]. En effet, le commerce de la noix d'anacarde est considérable en Afrique et à travers le monde. L'Afrique de l'Ouest est en 2023 la 1ère région de production d'anacarde du monde (environ 59% de l'offre mondiale) avec une croissance moyenne de la production de plus 8%/an. On peut dire que c'est dans la CEDEAO que se joue l'avenir de la filière, car l'anacarde est aujourd'hui la 2<sup>ème</sup> culture d'exportation de la CEDEAO avec des recettes d'exportation de 3,5 milliards de dollars US, derrière le cacao (9 Md\$) mais loin devant les autres cultures d'exportation traditionnelles [3].



**Figure 1.1 :** Répartition de la production mondiale de noix de cajou par bassin de production en 2023[3]

Le développement de la filière s'étant opéré de manière spontanée, sans orientation stratégique, il a connu un certain nombre de dysfonctionnements dont les plus importants concernaient la recherche agronomique et technologique, l'encadrement des producteurs, la commercialisation intérieure, l'organisation des acteurs et le faible niveau de transformation intérieure. Pour remédier à ces problèmes, nos dirigeants se sont engagés dans la réforme de la filière anacarde. Cette réforme incite nos autorités étatiques et les organisations non gouvernementales à mettre en œuvre des mesures visant à promouvoir cette filière. C'est le cas d'African Cashew Alliance (ACA), du Fonds Interprofessionnel pour la recherche et le Conseil Agricoles (FIRCA) et de l'Autorité de Régulation de la filière Coton et Anacarde (ARECA) en Côte d'Ivoire, de l'Africaine de Consultance et d'Ingénierie (ACI) au Sénégal, du Réseau Européen des Organisations Non Gouvernementales sur les questions Agro-alimentaires et le Développement (RONGEAD) et du Centre Francophone de Recherche Partenariale sur l'Assainissement, les Déchets et l'Environnement (CEFREPAD). Ces acteurs cherchent à améliorer la gouvernance dans cette filière et à augmenter la valeur ajoutée par la transformation. Grâce à la réforme, la filière anacarde apparaît aujourd'hui comme l'un des principaux moteurs du développement économique et social de la plupart des pays de l'Afrique de l'Ouest et de quelques pays de l'Afrique de l'Est. La filière est sans doute une source intéressante de croissance avec l'avantage d'être basée dans les régions au climat le plus favorable à l'espèce et d'avoir le potentiel de générer des emplois ruraux importants.

Étant donné son importance socio-économique croissante, il est primordial d'analyser les éléments qui influencent la dynamique de production dans la filière anacarde, afin d'en tirer des enseignements pour mieux guider les stratégies de développement durable de cette industrie. En outre, même si de nombreux Programmes et Projets ont participé au développement de la chaîne de valeur de la filière cajou au Sénégal (PASA, 1974-1991), (PROMER.), (EWW, 2002-2007), (Wula Nafaa, 2007-2012), (PADEC, 2010-2018), (IRD, 2009-2017), (SFL, 2018 à nos jours) le système de distribution de l'anacarde et les stratégies entrepreneuriales des producteurs demeurent encore très peu connus et mal structurés. Par conséquent, il est devenu important de prendre en compte la gestion durable de la filière de l'anacarde dans les programmes de développement au Sénégal, en particulier dans le programme d'accélération de la cadence de l'agriculture sénégalaise (PACAS), un plan du Sénégal émergent (PSE). Sa diversité de produits et notamment avec la noix qui est bien intégrée aux marchés internationaux, semble pouvoir constituer une source intéressante de revenus pour les zones tropicales sèches. Cependant, il serait préférable d'améliorer la valeur de la pomme, car elle demeure encore un sous-produit

de l'industrie. Compte tenu de l'importance actuelle de l'anacardier, nous avons décidé d'étudier la potentialité de ses sous-produits ainsi que leurs conséquences sur l'environnement afin d'en trouver des méthodes de valorisation adéquates de ces dernières. Toutefois, la grande majorité de cette production est exportée, principalement au Vietnam, en Chine ou en Inde pour y être transformée. Hormis cette exportation, l'un des grands enjeux actuels de la filière est de développer une capacité de transformation locale. La quasi-totalité de ces unités se focalisent sur les amandes sans se préoccuper des coques qui peuvent être à leur tour valorisées. Les coques de la noix de cajou (voir figure 1.2) constituent les principaux résidus provenant de la noix décortiquée. Elles représentent environ 70 à 75% de la noix de cajou. Ces coques d'anacarde sont des sources de nuisance d'odeurs, de pollution des eaux et de dégradation des sols à cause de leur acidité. Dès lors, il s'avère nécessaire de les utiliser comme combustibles pour des besoins énergétiques afin d'éviter les dégâts qu'elles peuvent causer sur la nature [4].



**Figure 1.2 :** Coques de noix de cajou

Certaines unités de transformation rencontrent des problèmes pour prendre en charge la quasi-totalité des coques produites. Elles n'utilisent qu'une partie dans leur four à des fins thermiques. C'est le cas de l'unité de transformation installé à Balantacounda. La figure 1.3 ci-dessous représente une image illustrative prise lors de notre enquête.



**Figure 1.3 :** Image de coques d'anacardes prise au GIE de Balantacounda

D'autre part, l'entreprise Ethicajou, dispose également d'une technologie de valorisation des coques de noix de cajou qu'elle produit. Grâce à un four de pyrolyse de type H2CP (High Calorific Cashew Pyrolyser), voir figure 1.4, les coques de noix de cajou (déchets de l'usine)



sont pyrolysées et ensuite utilisées pour produire de l'énergie thermique nécessaire à la transformation (fragilisation, séchage et humidification) des noix brutes de cajou en amandes comestibles.



**Figure 1.4 :** Le four H2CP de l'usine ETHICAJOU

Par contre, pour certaines unités de transformations comme les GIE des femmes de Ziguinchor, après extraction de l'amande, ils rencontrent un problème pour prendre en charge les coques d'anacarde produites car elles ne disposent pas de moyens financiers et techniques pour leur transformation en énergie ou en combustibles. Ils utilisent donc directement les coques d'anacarde pour la cuisson des amandes qui dégagent des fumées nocives dans l'environnement.

## **1.2 Disponibilité des coques d'anacarde au Sénégal**

De 2000 à 2016, la production de noix d'anacarde en Afrique a augmenté de 4,5 fois passant d'environ 400 000 à 1 800 000 tonnes en 2016 [5]. La production d'anacarde devient de plus en plus abondante dans toute l'Afrique notamment en Afrique de l'Ouest. Dans cet ensemble, le Sénégal fait partie depuis quelques années parmi les producteurs. Ses conditions climatiques sont favorables à la culture de l'anacarde surtout dans le sud du pays. Les régions de Ziguinchor, Sédhiou, Kolda et Fatick sont les principales zones de production, avec les trois premières régions représentant 90 % de la production nationale de noix brutes (PADEC). En 2019, la campagne de noix d'anacarde a généré un chiffre d'affaires de plus 25,1 milliards pour toutes les chaînes de valeur, avec une mobilisation de 3,59 milliards pour l'achat des noix brutes (Hien,2019). Une valorisation récente de cette filière au Sénégal à travers les projets PASA (Projet Anacardier Sénégalais Allemand de 1979 à 1991) dans la région de Fatick, le PADEC (2010-2018) et Shelter For Life (2017-2023) dans les régions de Ziguinchor, Sédhiou et Kolda, a permis de booster le pays au rang de 9<sup>e</sup> producteur du continent et 15<sup>e</sup> dans le monde (ICA,

2014). Toutefois, cette production est plus liée à l'augmentation des superficies de plantations qu'à l'amélioration des rendements. Selon Samb et al. [6], de 1986 à 2017, les superficies des plantations de l'espèce sont passées de 910,55 km<sup>2</sup> à 1908,5 km<sup>2</sup> en Casamance avec une superficie moyenne de 2,6 ha par producteur. En même temps, les rendements qui variaient de 250 kg/ha à 400 kg/ha Ndiaye et al., restent en dessous de la moyenne mondiale (1,3 T/ha) et celui de l'Afrique (400 kg à 1T/ha) [2], [7].

Selon l'étude réalisée par l'USAID/SAGIC (2006), la région de Fatick offre la meilleure qualité de noix suivie de celle de Ziguinchor, Sédhiou et de Kolda. Cela s'explique par l'introduction des premières variétés améliorées par le PASA au niveau de Fatick (1980 à 1990) ainsi que des techniques de production fruitière. Alors qu'à Ziguinchor, la forte pluviométrie et la nécessité de valorisation de la pomme assurent régulièrement une bonne production de noix. Dans les régions de Sédhiou et Kolda, la pomme est très peu valorisée, ce qui entraîne souvent des noix peu remplies (SAGIC, 2006). La région naturelle du Sénégal a connu un rythme de croissance très important durant ces dernières années. Selon le directeur de la chambre de commerce de Ziguinchor, la quantité de noix de cajou exportée est passée de 31 871 tonnes en 2018 à 85 118 tonnes en 2022 ; ce qui correspond à 59 582,6 tonnes de coques de cajou en 2022 si l'on considère que les 70 % de la noix de cajou sont occupées par les coques d'anacardes.

### **1.3 Différentes modes de pré-conditionnement des coques d'anacarde**

Le pré-conditionnement d'un combustible est une opération qui vise à améliorer son conditionnement.

Dans notre cas, les coques d'anacarde peuvent être préconditionnées de différentes manières. Elles peuvent être préconditionnées en sac, en briquettes de charbon et par traitement à la vapeur.

#### **1.3.1 Pré-conditionnement en sac**

L'emballage préalable des coques d'anacarde en sac joue un rôle crucial dans la mise en valeur de ce sous-produit. Lors du pré-conditionnement, les coques sont soigneusement sélectionnées et nettoyées pour éliminer les impuretés et les débris. Ensuite elles sont séchées pour réduire leur taux d'humidité. Cela peut se faire au soleil ou à l'aide de séchoirs industriels. Une fois séchées, les coques sont conditionnées en sacs. Il est important d'utiliser des sacs résistants et bien ventilés pour éviter la moisissure et la détérioration. Il est important de conserver les sacs dans un endroit sec et bien ventilé afin de préserver la qualité des coques. Pour le cas de la SCPL, avant cuisson, les coques sont préconditionnées dans des sacs. Cependant, ces coques

sont déposées sous le soleil des heures durant afin de baisser leur taux d'humidité. La figure 1.5 ci-dessous est une image de coques d'anacarde conditionnées dans des sacs.



**Figure 1.5 :** Coques d'anacarde conditionnées dans des sacs à la SCPL

### **1.3.2 Pré-conditionnement des coques d'anacarde en briquettes de charbon**

La fabrication de briquettes de charbon pour favoriser le préconditionner des coques d'anacarde brutes en combustible densifiés est une approche prometteuse pour exploiter les déchets de noix de cajou.

Ce pré-conditionnement se fait de la manière suivante :

**Étape 1 :** Prélèvement et séchage des coques d'anacarde pour baisser leur humidité.

**Étape 2 :** Carbonisation ou pyrolyse des coques dans un réacteur à une température fixée et à une durée donnée ;

**Étape 3 :** Mélange des différents composants ; ce processus consiste à mélanger une certaine quantité de charbon broyer avec un liant (organique ou inorganique).

**Étape 4 :** Processus de compactage ou d'agglomération ; consistant à compacter manuellement ou sous une machine motorisée, la matière première dans une moule métallique.

**Étape 5 :** Séchage manuelle, sous étuve ou dans des serres, chambres de séchage des briquettes suivi de stockage en sacs dans un lieu sec et sécurisé.

La figure 1.6 suivante est une image de briquetage de coques d'anacarde.



**Figure 1.6 :** Pré-conditionnement en briquettes de charbon

Avant d'être utilisées comme combustible, les briquettes sont séchées afin d'atteindre un taux d'humidité permettant leur conservation et conditionnement en sachet.

### **1.3.3 Pré-conditionnement des coques d'anacarde par traitement à la vapeur**

Ce type de pré-conditionnement est fréquemment utilisé dans les unités de transformation. Le pré-conditionnement des coques d'anacarde par traitement à la vapeur est une méthode de préparation de différents matériaux avant leur transformation ou leur utilisation ultérieure. Ce processus consiste à utiliser de la vapeur à une température élevée afin de modifier les caractéristiques physiques et chimiques du matériau. C'est le cas des unités de transformation rencontrées à la SCPL et à Ethicajou qui produisent de grandes quantités de coques traitées à la vapeur par cuisson. Par exemple, à Ethicajou, ce processus est effectué après des séries de cuisson et de décorticage des noix de cajou (voir figure 1.7).



**Figure 1.7 :** Pré-conditionnement par traitement à vapeur à la SCPL

## **1.4 Étude du potentiel de déchets (sous-produits de la filière anacarde) et les méthodes de valorisation**

### **1.4.1 Étude du potentiel de déchets (sous-produits de la filière anacarde)**

La production d'énergie à partir de la biomasse offre de plus en plus d'opportunités pour diminuer le manque d'énergie verte.

La substitution de l'énergie conventionnelle par l'énergie verte (électrique ou thermique) contribue à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. La plupart des pays ont inclus la valeur ajoutée de la biomasse et la production d'énergie verte dans leurs politiques nationales de développement. Actuellement, les pays africains sont peu incités à investir dans l'énergie verte à partir de la biomasse, en particulier dans les sous-produits de l'anacarde, y compris les utilisations de la biomasse à des fins thermiques.

### 1.4.1.1 Utilisation des coques d'anacardes comme combustible

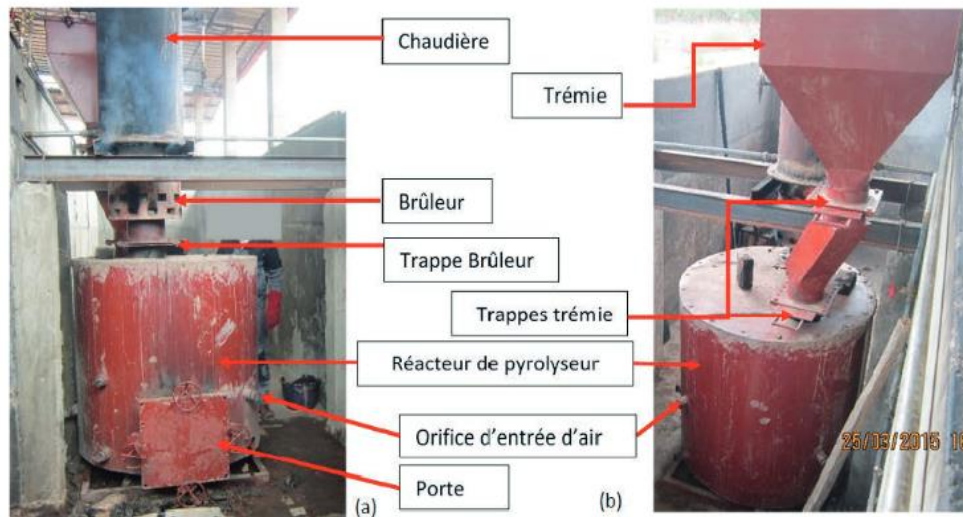
- **Cas des unités de transformation**

Face aux difficultés d'accès à l'énergie et de gestion des déchets issus de la transformation des noix d'anacarde, les coques stockées dans les usines de transformation sont directement utilisées comme combustibles. Elles sont parfois directement brûlées dans des fours pour fournir l'énergie. D'autre part, elles sont pyrolysées et les gaz ainsi produits sont brûlés pour fournir l'énergie nécessaire à la fragilisation des noix, l'étuvage et le séchage des amandes. Cette combustion non contrôlée génère des fumées âcres et irritantes pour les yeux. Pour pallier à ce problème, il a été construit au Bénin deux installations de pyrolyse sur la base d'un modèle de réacteur conçu par CEFREPADE et RONGEAD. Ces réacteurs de pyrolyse ont été utilisés au Bénin pour permettre la valorisation des coques de noix d'anacarde en gaz et en charbon. Les études réalisées ont montré que le réacteur de pyrolyse utilisé permet de valoriser sous forme de gaz environ 82 % de la masse de coques traitées et produit environ 18 % de charbon. D'autre part, sur le plan énergétique, les gaz obtenus représentent 74 % de l'énergie des coques traitées, tandis que les 18 % de charbon obtenu représentent 26 % de l'énergie totale de la matière première alimentée [5]. Le tableau 1.1 donne tous les détails de ce type de réacteur de pyrolyse.

**Tableau 1.1 :** Caractéristiques d'un réacteur de pyrolyse installé au Bénin [8]

Masse de coques pyrolysées par jour (kg)	130
Durée de la flamme de post combustion (h)	4,33
Quantité estimée d'énergie libérée par cette flamme (MJ)	1837
Puissance estimée de la flamme (kW)	118
Quantité de noix fragilisées avec l'énergie produite (kg)	1280
Durée de la fragilisation (h)	1,5
Quantité d'amandes précuites avec l'énergie produite (kg)	240
Masse de charbon produite (kg)	23

Après installation de l'un des réacteurs de pyrolyse (voir figure 1.8), la pyrolyse de 130 kg de coques a permis un fonctionnement durant 4h20 min (4.33h) produisant ainsi l'énergie nécessaire pour les opérations de fragilisation de 1280 kg de noix d'anacardes et de choc thermique de 240 kg d'amandes. Une production de 23 kg de charbon a été obtenue.



**Figure 1.8 :** Réacteurs de pyrolyse fabriqué et installé au Bénin (a) Vue avant, (b) Vue arrière [8]

Dans le cadre de la valorisation énergétique de coques d’anacarde ces deux organisations (CEFREPADE et RONGEAD) ont installé la même technologie au Burkina Fasso mais cette fois-ci avec des caractéristiques différentes. Ledit four dénommé H2CP permet de fournir l’énergie nécessaire à une unité de transformation de noix de cajou à Bobo Dioulasso (au Burkina Fasso). Grâce à ce système, les déchets provenant du décorticage de la noix de cajou peuvent être convertis en deux types de combustibles : des gaz de pyrolyse qui alimentent principalement une chaudière et du biochar pour les ménages. Le fonctionnement de ce four est identique à celui mise en place au Bénin. Une quantité de coques est brûlée au niveau du four fournissant ainsi l’énergie nécessaire à la pyrolyse. Le restant est transformé en charbon après une décomposition thermique. Les principales caractéristiques de la technologie sont présentées dans le tableau 1.2 ci-dessous, pour une capacité de 600 litres [9] de l’unité de Bobo Dioulasso.

**Tableau 1.2 :** Caractéristiques d’un réacteur de pyrolyse installé au Burkina Faso [9]

<b>Masse de coques traitées (kg)</b>	100	200	275	450
<b>Durée de la flamme de Post-combustion (h)</b>	3,5	7,5	12,5	23,5
<b>Potentiel d’énergie libérée par cette flamme (MJ)</b>	950	1 900	2 550	4 200
<b>Quantité de noix de cajou précuite par la flamme (kg)</b>	900	1 800	2 400	4 000
<b>Masse de charbon produite (kg)</b>	17	35	47	75

- **Cas des ménages**

Aujourd’hui, des régions entières du Sénégal sont productrices d’anacarde. Tirer une valeur ajoutée des résidus qui existent de manière indéniable au Sénégal vise une augmentation de la transformation locale. Cette action va non seulement favoriser la compétitivité pour la vente

de coques mais va directement faciliter l'accès énergétique aux ménages et promouvoir la diversification des revenus de la filière par la vente de combustibles domestiques. De ce fait, ces coques d'anacarde peuvent être transformées en briquettes de charbon ou biochar pour la cuisson ou le chauffage de façon générale. Toutes ces actions participent à la réduction de la déforestation.

#### **1.4.1.2 Utilisation des coques d'anacarde comme carburant**

On peut utiliser les coques d'anacarde comme biocarburant en utilisant l'huile cardanol qu'elles renferme. Cette substance, également connue sous le nom de cashew nut shell liquid (CNSL) en anglais, présente une qualité et contenu calorifique similaires à ceux du mazout léger, avec un pouvoir calorifique moyen de 39 à 42 MJ/kg [10]. Transformé en biodiesel, il offre une nouvelle façon de produire de l'énergie. Des tests ont été effectués et validés avec succès le rendement des mélanges de biodiesel à base de CNSL dans les moteurs à allumage par compression. Cela confirme la possibilité comme source de biodiesel le CNSL, et donc, des mélanges de CNSL pourraient être utilisés comme solution de substitution au pétro-diésel, sans nécessiter de modifications significatives [10]. Il est aussi employé dans l'industrie aéronautique, en tant qu'hydrocarbure dans l'aviation.

#### **1.4.1.3 Utilisation du compost à base des coques d'anacarde**

Selon Larousse (2021), le compostage consiste à fermenter des déchets agricoles ou urbains afin de récupérer des éléments riches en minéraux et en matières organiques. Ces éléments sont ensuite incorporés dans les terres agricoles pour les enrichir. Le compost est le produit issu du compostage. La matière organique employée dans le processus de compostage est cruciale pour maintenir et fournir aux plantes de l'eau et des nutriments. Le sol est friable, meuble et poreux grâce à la présence de matière organique ; ce qui favorise une bonne filtration de l'eau. Les coques d'anacarde sont parmi les matières organiques qui peuvent servir de fertilisant très efficace après leur incinération. Le compostage à partir de coques d'anacarde comme fertilisant est confirmée par l'étude de Traoré [11]. Ce dernier dans le but de montrer les potentialités des coques d'anacardes comme fertilisant a fait des essais en donnant ainsi la composition en pourcentage de la matière organique 71,30 %, d'azote 1,87%, du potassium 2,19%, du phosphore 0,98 % et C/N 22,23 % [11]. La quantité des coques d'anacarde pour le compostage est remise en question par ces valeurs, car elles contiennent davantage de matière organique que de matières minérales.



## 1.4.2 Technique de mise en valeur des coques d'anacarde

La grande diversité de la décomposition de la biomasse présente encourage la création de diverses technologies pour sa mise en valeur énergétique. Ces différentes méthodes de valorisations énergétiques des coques d'anacarde sont entre autres la conversion thermochimique basée principalement sur la composition chimique qui elle-même confère des caractéristiques énergétiques spécifiques et la conversion mécanique basée sur une méthode d'extraction de liquide purement physique.

### 1.4.2.1. Valorisation par voie de conversion thermochimique

Quatre grands types de procédés sont associés à la conversion thermochimique : la combustion, la gazéification, la pyrolyse et la carbonisation hydrothermale. Elles se distinguent par leurs modalités de soins. À ces quatre méthodes, on ajoutera la torréfaction.

#### ❖ La combustion

La combustion est un processus thermochimique où un combustible et un agent oxydant (air ou oxygène) réagissent de façon exothermique pour générer de la chaleur ainsi que des produits transformés appelés gaz de combustion [12]. Lors du processus, la chaleur contenue dans la biomasse est directement émise et produit du dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) et de l'eau. La combustion se fait que par la combinaison de trois éléments principaux à savoir : un combustible (coque d'anacarde par exemple), un comburant (en général le dioxygène ou l'air) et une énergie d'activation (quantité d'énergie nécessaire pour initier la réaction) [13]. La combustion peut être stœchiométrique ou non stœchiométrique. Mais dans la pratique, elle est souvent non stœchiométrique. Lorsque la combustion est non stœchiométrique, elle peut se faire par défaut d'air ou par excès d'air. La figure 1.9 ci-contre montre le mécanisme réactionnel de la combustion.

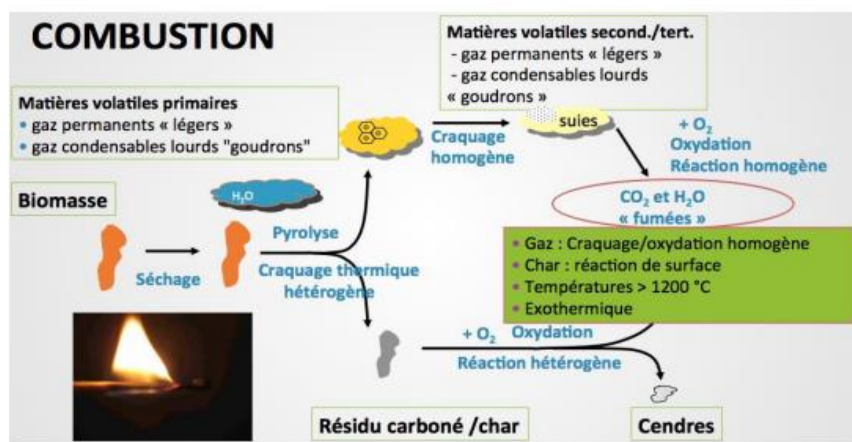


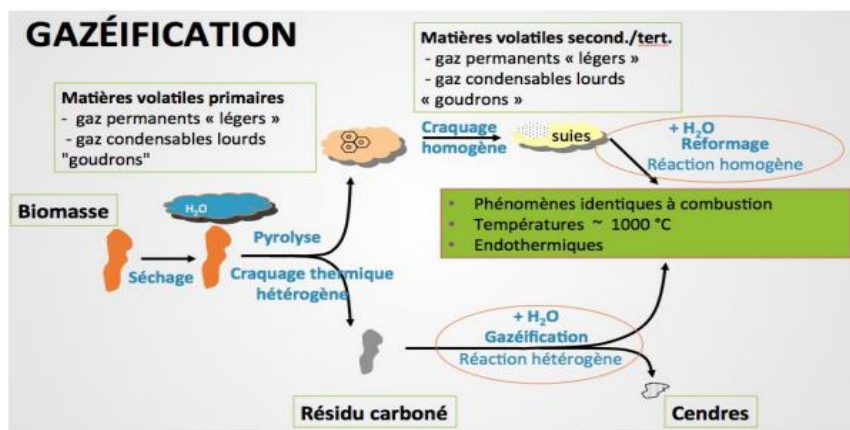
Figure 1.9 : Mécanisme de la combustion de la biomasse [14]



Des études ont été effectuées sur l'utilisation des coques d'anacarde pour la combustion, comme l'a fait le conseil burkinabé de l'anacarde, qui a utilisé les coques d'anacarde pour la combustion en chaudière. En effet, dans leur processus de fonctionnement, il brûle une partie des coques d'anacarde généralement entre 5 et 25 % afin de produire de l'énergie thermique et la chaleur nécessaire à la transformation des noix [17]. Cette énergie est utilisée au niveau des cuiseurs et des fours mais peut être aussi utilisée en cas de production mixte. Il utilise la combustion par pyrolyse au lieu de la combustion directe du fait qu'elle diminue les effets négatifs dégagés par les coques d'anacarde.

### ❖ La gazéification

La gazéification est un procédé de dégradation thermique de la biomasse en présence d'une atmosphère légèrement oxygénée et qui aboutit à la production d'un mélange gazeux comprenant principalement du CO, du CO<sub>2</sub>, du H<sub>2</sub>O, du H<sub>2</sub>, du CH<sub>4</sub>, etc. [13]. Les réactions de gazéification sont endothermiques et produisent des phénomènes identiques à celle de la combustion. Pour entretenir ces réactions endothermiques, des réactions exothermiques sont nécessaires. Ces réactions exothermiques consistent à l'oxydation d'une partie de gaz et du char produits. La figure 1.10 ci-contre montre le mécanisme réactionnel de la gazéification.



**Figure 1.10 :** Mécanisme de la gazéification de la biomasse [14]

La SCPL a mené des études sur l'utilisation des coques d'anacarde comme combustible dans un gazéificateur. Pendant la gazéification, les coques d'anacardes sont brûlées et génère de la chaleur. A l'aide d'une chaudière, cette chaleur produit de la vapeur pour le séchage des amandes de même que l'électricité produite via un groupe électrogène pour le fonctionnement des machines.

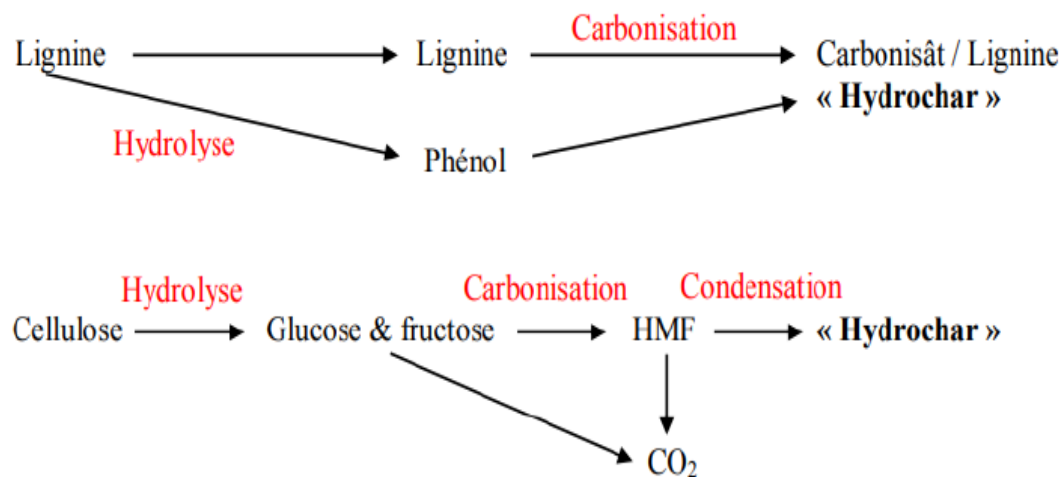
Les auteurs comme Taguthchou et al [20] ont réalisé des études de valorisation des coques par la gazéification. Grâce à cette étude, ils ont pu mettre en lumière la réactivité la plus élevée des

coques de cajou par rapport aux autres biomasses telles que la noix de coco et les granulés de bois.

#### ❖ La carbonisation hydrothermale

La carbonisation hydrothermale est définie comme un processus de conversion physico-chimique des matières organiques en charbon, en milieu anoxique (sans contact avec l'air, via l'eau utilisée comme milieu de réaction), sous l'effet de la température et de la pression. C'est un procédé permettant de transformer la biomasse en un produit dit bio charbon ou hydro-charbon ou encore hydro-char. Globalement, elle est davantage utilisée dans la valorisation humide de la biomasse car elle ne nécessite pas de séchage avant son usage[15]. C'est donc un procédé qui entraîne un intérêt vis à vis des chercheurs et des industrielles pour la valorisation des résidus de biomasse et des débris organiques. D'ailleurs, dans le cadre du projet Bio4Africa l'université Assane Seck de Ziguinchor est en train d'expérimenter son premier réacteur HTC. Dans la littérature, il n'existe pas encore des exemples d'études qui valorisent les coques d'anacardes par la carbonisation hydrothermale ; constituant ainsi pour nous une bonne perspective de recherche.

La figure 1.11 ci-dessous résume le mécanisme réactionnel de la carbonisation hydrothermale.



**Figure 1.11** : Mécanisme de la carbonisation hydrothermale de la biomasse [12]

La pyrolyse consiste en la décomposition thermique de la matière sous atmosphère inerte (ou milieu pauvre en oxygène), et parfois en présence d'un gaz inerte comme l'azote, l'hélium ou l'argon. Concernant l'usage de la biomasse, la pyrolyse conduit à trois types de produits, tous combustibles : le solide appelé «char» ou charbon, la fraction liquide appelée huile de pyrolyse ou goudron ou encore bio-huile obtenue après condensation des gaz pyrolygneux et la fraction gazeuse incondensable composée majoritairement de CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> et H<sub>2</sub> [13]. Elle est connue

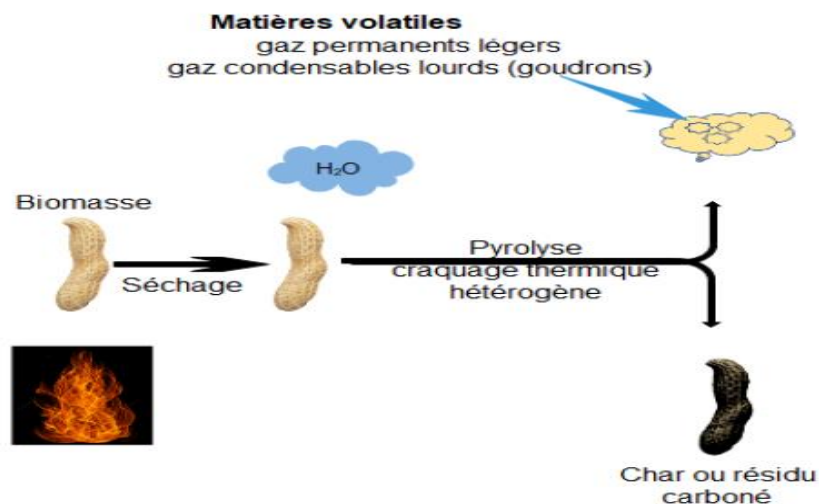
depuis des années et reste toujours le procédé thermochimique le plus efficace pour obtenir des charbons à haute teneur en carbone, adaptés comme biocarburants solides [16]. La pyrolyse peut s'opérer à des températures variantes entre 350 °C et 900 °C.

La réaction est divisée en deux étapes : une première étape où la réaction est endothermique (nécessite l'apport d'une source d'énergie) et une deuxième phase où la réaction est exothermique. Après pyrolyse, on récupère un produit appelé carbonisât (voir figure 1.12).



**Figure 1.12 :** Carbonisât ou char [19]

La figure 1.13 ci-contre montre le mécanisme réactionnel de la pyrolyse.



**Figure 1.13 :** Mécanisme de la pyrolyse de la biomasse [12]

Selon l'étude réalisée par Godjo et al [8], des coques d'anacarde ont été utilisées par pyrolyse. Au cours de cette étude, deux systèmes de pyrolyse basés sur le modèle de réacteur développé par CEFREPAD et RONGEAD sont mise en place, offrant ainsi la possibilité de valoriser les coques d'anacarde ou de gaz et le bio-charbon. A peu près 82% de la masse de coques traitées est valorisées sous forme de gaz dans le four de pyrolyse utilisé, ce qui génère 18 % de charbon [8]. En termes d'énergie, 18% de bio-charbon obtenus représentent 26 % de la somme totale de l'énergie, tandis que les gaz valorisés représentent 74% de l'énergie des coques.

Dans ce même sillage, l'étude menée par Tagutchou et al [20] a mis en évidence la pyrolyse des coques d'anacarde. Trois types de produits ont pu être obtenus grâce cette étude : liquide

(huile), gazeux et solide (char) avec des proportions différentes suivant la température. Ces auteurs obtiennent 17 % de charbons et 47,5 % d'huile à 450 °C.

#### **1.4.2.2. Valorisation par voie mécanique**

La coque d'anacarde est constituée d'environ 22 % de baume de cajou ou CNSL (voir figure 1.14). Le cardanol, également connu sous le nom de CNSL, est un liquide brun visqueux sombre présent dans la structure de la noix de cajou. Il peut se substituer au phénol dans les industries chimiques de production de résine phénolique. Ce phénol substitué d'origine naturelle peut participer à une variété de réactions.

On recense trois différentes méthodes pour l'extraction du CNSL des coques d'anacardes : la méthode mécanique, la méthode chimique et la méthode thermique. Concernant la méthode mécanique, elle est la plus couramment utilisée au niveau industriel. Selon l'étude réalisée par le conseil Burkinabé d'anacarde [17], cette méthode consiste à mettre les coques de noix de cajou brutes dans une presse à vis puis exercer une pression afin de libérer le CNSL contenu dans les coques du tourteau déshuilé. Les paramètres tels que la pression, la température, l'humidité et la taille des particules ont une influence sur le processus de pressage. Par ce procédé on obtient du CNSL naturel notamment riche en acide anacardique. Après extraction du CNSL, le résidu obtenu pourrait être revalorisé en brique de charbon.



**Figure 1.14 :** CNSL ou baume de cajou [18]

#### **1.5. Les limites de la filière**

Il est donc impossible pour le Sénégal de bénéficier totalement de la chaîne de valeur des noix d'anacarde à cause de la présence étrangère qui favorise son exportation vers d'autres pays qui la transforme chez eux. IL y'a des pays occidentaux qui soutiennent leur industrie de transformation des noix de cajou et instaurent des initiatives pour inciter à l'achat de l'intégralité des réserves présent dans les zones d'exploitation. Ceci ennuie donc les unités de transformations. Il faut noter aussi que ces étrangers bénéficient d'un avantage grâce à l'appui financier de leur Etats, ce qui leur permet de proposer des coûts excessifs lors de l'achat des

noix de cajou, évitant ainsi l'industrie de transformation locale. Ceci provoque donc une perte de valeur ajoutée et d'emplois au Sénégal. Ces actions des étrangers influencent le marché de l'anacarde. Par conséquent, les entreprises de transformation locales rencontrent d'innombrables difficultés pour s'approvisionner et poursuivre leurs activités.

### **Conclusion**

Ce chapitre représente une étude succincte de la valorisation des coques d'anacarde. Il est scindé en trois parties essentielles. Dans la première partie on s'est focalisé sur la genèse des noix de cajou dans le monde et leurs potentialités croissantes d'année en année confirmée par les études de Lewal et al [1]. Dans la seconde partie il ressort de cette revue que les coques d'anacarde sont bien disponibles en Afrique plus particulièrement au Sénégal. Cette disponibilité des coques est confirmée par la multiplication des unités de transformations au Sénégal. Dans la troisième partie on voit bien qu'il existe des méthodes de valorisations des coques illustrant leurs valeurs ajoutées, aboutissant principalement à des produits tels le biochar, le CNLS et la chaleur issue de leur combustion.

## **Chapitre 2 : Matériels et méthodes**

## Introduction

Ce chapitre vise à examiner les échantillons recueillis, de présenter nos expérimentations et de dresser, à partir des enquêtes effectuées au niveau des unités de transformation, un bilan d'énergie. En effet, les analyses nous permettront de remonter à la quantité d'énergie contenue dans les coques d'anacarde à partir d'une quantité bien déterminée de coques de cajou. En ce qui concerne le bilan énergétique, il nous permettra de trouver les besoins en énergie des unités de transformation afin de proposer une alternative plus efficace aux méthodes de production qu'elles utilisent actuellement. Par ailleurs, vu que ces différentes unités utilisent toutes des coques de cajou, les procédures de détermination des paramètres des analyses élémentaire et immédiate seront donc les mêmes pour toutes les unités de transformation considérées dans ce travail.

### 2.1 Caractérisation physico-chimique des coques d'anacarde et bilan énergétique

Les analyses physico-chimiques se basent essentiellement sur deux éléments à savoir l'analyse immédiate et élémentaire. Ces analyses sont réalisées sur les coques d'anacarde prises dans les deux unités de transformation visitées lors de ce travail. De ce fait, il convient de souligner que l'analyse immédiate est faite de manière expérimentale au niveau du laboratoire (LCPM) ; l'analyse élémentaire ainsi que les pouvoirs calorifiques quant à eux, ils ont été déduits à partir de formules empiriques. Pour chaque paramètre, il sera question de faire au moins deux essais pour ensuite déterminer leur moyenne.

#### 2.1.1 Analyse immédiate

L'analyse immédiate de la biomasse est obtenue après une analyse expérimentale au laboratoire (LCPM). Elle nous renseigne sur les taux de matières volatiles, d'humidité, de carbone fixe et de cendre de la biomasse. Ce fractionnement de la biomasse en ces quatre composants est pertinent en ce qui concerne l'estimation du potentiel énergétique d'une biomasse donnée.

##### Détermination du taux d'humidité

L'humidité d'un combustible est le pourcentage d'eau contenue dans ce combustible. Deux sortes d'humidité sont habituellement définies :

- en termes de biomasses brutes, l'humidité correspond à la proportion entre la masse d'eau du combustible et sa masse totale.

$$E_b(\%) = \frac{m_h - m_o}{m_h} \times 100 \quad (2.1)$$

-en termes de biomasses sèches, l'humidité représente la proportion entre la masse d'eau contenu dans le combustible et sa masse sèche.

$$E_s (\%) = \frac{m_h - m_o}{m_o} \times 100 \quad (2.2)$$

Avec  $m_h$  la masse de l'échantillon humide et  $m_o$  la masse à l'état anhydre

Pour évaluer la quantité d'humidité des échantillons, on a utilisé une balance infrarouge de type KERN. Elle a une puissance maximale de 400 W et peut fonctionner jusqu'à une température de 200 °C , et possède une portée maximale de 60 g. On peut lire facilement la valeur de l'humidité avec cette balance, qui enregistre des erreurs 0,001 g à 0,01 % près.

Le calcul du taux d'humidité reste identique à celui effectué avec l'étuve, mais cette fois-ci la biomasse est chauffée par une source de rayonnement infrarouge. Ainsi, les échantillons ont été broyés pour passer à travers un tamis de 1 mm (pour les biomasses brutes) et un tamis de 200  $\mu$ m (pour les charbons) [19]. A peu près 1 g d'échantillon est placé sur la balance et trois essais sont réalisés. La figure 2.1 représente une image de cette balance.



**Figure 2.1 :** Balance infrarouge type KERN (LCPM)

#### ✚ Détermination du taux de cendres

Le taux de cendre est la quantité de résidu d'incinération de la substance dans les conditions spécifiées. Au cours des tests, l'échantillon est chauffé à l'air pendant un temps déterminé jusqu'à atteindre une température optimale que l'on maintient jusqu'à ce qu'il atteigne une masse constante. On détermine le taux de cendres en se basant sur la masse du résidu après incinération. Pour les biomasses brutes, les charbons, les granulométries sont identiques à celles utilisées pour évaluer la teneur en humidité. Les tests sont effectués dans un four à moufle de marque Nabertherm [19] (voir figure 2.2).



L'échantillon est ensuite chauffé progressivement jusqu'à ce qu'il se transforme en cendres sans aucun point noir (imbrulé). En effet, pour y arriver, on chauffe un creuset contenant l'échantillon à une température de 550 °C à une vitesse de chauffe de 5°C /min, puis on le maintient à cette température pendant au moins 2 heures. L'échantillon de charbon ou de brique de charbon est chauffé dans un creuset sous la même rampe de température jusqu'à atteindre une température de 710°C. Par la suite, on maintient cette température constante pendant au moins 2 heures afin pour garantir une combustion complète de l'échantillon. Le taux de cendre à base sèche déterminée par :

$$Ce (\%) = \frac{M_3 - M_1}{M_2 - M_1} \times 100 \frac{100}{100 - E_b} \quad (2.3)$$

- $M_1$  : est la masse du creuset, en grammes (g) ;
- $M_2$  : est la masse du creuset et de l'échantillon, en gramme (g) ;
- $M_3$  : est la masse du creuset et des cendres, en gramme (g)
- $E_b$  : est la teneur en humidité dans l'échantillon en pourcentage en %.



**Figure 2.2 :** Four à moufle

#### ✚ Détermination du taux de matière volatile

Le taux de matière volatile est calculé en déduisant la perte de masse de celle causée par l'humidité si toute fois l'échantillon est chauffé sans contact avec l'air dans des conditions standardisées. Ce procédé de chauffage du combustible est en quelque sorte considéré comme une pyrolyse à l'échelle du gramme. La teneur en matière volatile est calculée en fonction de la perte de masse de l'échantillon après avoir retiré la masse due à l'humidité. Il est nécessaire d'utiliser une partie du même échantillon afin de déterminer la quantité d'humidité qui sera ajoutée à la formule de calcul du taux de matière volatile.

$$MV(\%) = \left[ \left( \frac{M_2 - M_3}{M_2 - M_1} \times 100 \right) - E_b(\%) \right] \times \frac{100}{100 - E_b(\%)} \quad (2.4)$$

- $M_1$  : est la masse du creuset à vide avec son couvercle, en gramme (g) ;
- $M_2$  : est la masse du creuset à vide avec son couvercle et celle de l'échantillon en gramme (g) ;
- $M_3$  : est la masse du creuset à vide avec son couvercle et celle de l'échantillon et son contenu à la sortie du four en gramme (g) ;
- $E_b$  : est la teneur en humidité dans l'échantillon en pourcentage en %.

#### ✚ Détermination du taux de carbone fixe

Le carbone fixe correspond à la quantité de carbone qui reste après disparition des matières volatiles et des cendres. Le taux en carbone fixe n'est pas établi par des expériences. Il est calculé en base sèche selon la formule suivante :

$$CF = 100\% - (MV + C_e) \quad (2.5)$$

#### 2.1.2 Analyse élémentaire

L'analyse élémentaire nous donne des informations sur la composition en pourcentage de carbone (C), d'oxygène (O), d'hydrogène (H) ainsi que des teneurs plus faibles d'azote (N), de soufre (S) et d'éléments minéraux. En 2016, le docteur Daya Ram Hhuchhen avait suggéré une corrélation entre le pourcentage d'hydrogène (H) et le pourcentage d'oxygène (O) après une analyse immédiate d'une biomasse brute, un charbon végétal ou briquette de charbon [22].

Ces corrélations sont présentées de la manière suivante :

$$C (\%) = - 35,9972 + 1,3269 \times CF + 0,7698 \times MV + 0,3250 \times C_e \quad (2.6)$$

$$H (\%) = 55,3678 - 0,5319 \times CF - 0,4830 \times MV - 0,5600 \times C_e \quad (2.7)$$

$$O (\%) = 223,6805 - 2,2296 \times CF - 1,7226 \times MV - 2,2463 \times C_e \quad (2.8)$$

Où CF = carbone fixe, % sur sec ; MV = matières volatiles, en % sur sec ;  $C_e$  = Cendres, % sur sec.

Les équations (2.10) à (2.12) sont applicables dans le cas où :

$$11,25 \% \leq CF \leq 82,74\%$$

$$11,25 \% \leq CF \leq 82,74 \% \quad (2.9)$$

$$13,3 \% \leq MV \leq 88,57 \% \quad (2.10)$$

$$0,08 \% \leq C_e \leq 47,62 \% \quad (2.11)$$

Après avoir déterminé les constituants élémentaires de la biomasse et sa teneur en cendres, dans une base sèche on en déduit ainsi la valeur de la teneur en azote en utilisant l'équation suivante :

$$N = 100 - (C + H + O + C_e) \quad (2.12)$$

#### 2.1.3 Détermination du pouvoir calorifique à l'aide de la formule de Vondracek

Le pouvoir calorifique d'un combustible est l'enthalpie de réaction de combustion par unité de matière dans les conditions normales de température et de pression (25°C, 1 atm).

En termes d'énergie, il est exprimé soit en MJ/kg pour les solides, soit en MJ/Nm<sup>3</sup> pour les gaz.

Il y'a deux catégories de capacité calorifique :

- Le pouvoir calorifique supérieur (PCS), qui correspond à l'énergie libérée par la combustion d'une masse de combustible en prenant en compte la chaleur latente de la vaporisation de l'eau ;
- Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) correspondant à l'énergie produite par la combustion d'une quantité de combustible sans tenir en compte la chaleur latente de vaporisation.

On obtient expérimentalement le pouvoir calorifique supérieur (PCS) à volume constant (utilisation de la bombe calorimétrique sur échantillon) ou théoriquement (utilisation des formules empiriques) tandis que le pouvoir calorifique inférieur (PCI) se déduit, en connaissant le PCS et les résultats de l'analyse élémentaire du combustible solide.

On a employé la formule de Vondracek suivante afin de prédire les valeurs de PCS de nos divers échantillons.

$$PCS = 85 \times \%C + 270 \times \%H + 25 \times \%S - 27 \times \%O \quad (2.13)$$

On a déduit le PCI à l'aide de la formule suivante :

$$PCI = PCS - 6 \times (9 \times H + E_b) \quad (2.14)$$

H représente le pourcentage d'hydrogène et  $E_b$  le pourcentage d'humidité de l'échantillon.

#### **2.1.4 Mesure de température sur pilote industriel**

Les mesures de températures ont été obtenues à l'aide d'une centrale d'acquisition de données et de thermocouples fournis par le laboratoire de physique.

L'outil de diagnostic des différents thermocouples est la centrale d'acquisition de données. En réalité, comme leur nom l'indique, il s'agit d'appareils ou de technologies récentes qui servent à collecter des données à temps réel et précis. La centrale d'acquisition, dans sa forme la plus basique, permet de visualiser les données des divers capteurs sur un écran d'affichage. Dans ce système d'acquisition, les éléments de conversion analogique-numérique sont mis en avant. Il offre à l'opérateur la possibilité de réaliser des tests de vérifications sur divers appareils en affichant les données à travers l'écran voir (figure 2.3 ci-dessous).



**Figure 2.3 :** Centrale d'acquisition

Les thermocouples sont connectés à des sondes et des câbles pour mesurer la température (voir figure 2.4). En raison de leur faible coût, de leurs capacités très élevées et de leur grande diversité en types et en tailles, ils sont couramment employés dans de nombreuses applications industrielles et scientifiques. Il y'a des centaines de types de thermocouples confectionnés à partir de métaux purs et d'alliages, chacun ayant ses propres caractéristiques et ses applications spécifiques. Les différents types de thermocouples peuvent être identifiés grâce à des lettres. Dans notre cas, ils sont de types K et peuvent prendre des températures allant de 0 à 1300 °C.



**Figure 2.4 :** Thermocouple de type K utilisé

Lors de la pratique on a d'abord commencé par la mesure de la température de l'eau d'alimentation de la chaudière. Ensuite, à l'aide de la centrale d'acquisition on a relevé via les vannes la température d'entrée de la chaudière et enfin on a terminé par mesurer la température de sortie de la chaudière. Ce sont ces mesures qui nous ont permis de faire le bilan énergétique ci-qui sera décrit au paragraphe 2.4.

## **2.2. Présentation et principe de fonctionnement des deux unités de pyrolyse**

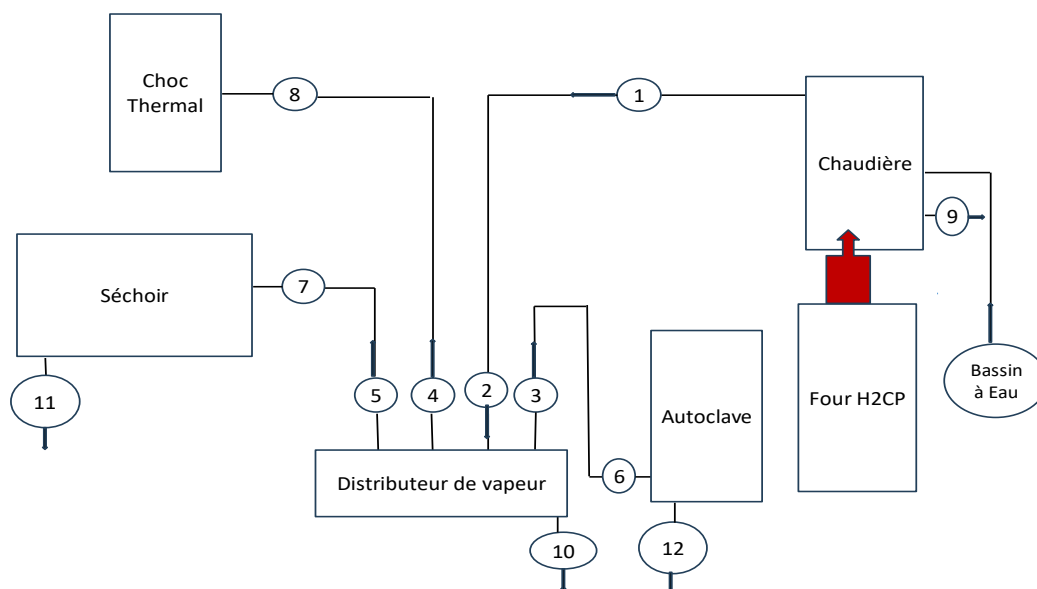
### **2.1.2. Présentation et principe de fonctionnement de l'unité de pyrolyse d'Ethicajou**

Le schéma présenté sur la figure 2.5 est constitué de deux parties reliées par des tuyaux. La première partie est composée d'un four de pyrolyse surmontée d'une chaudière et un bassin

contenant l'eau d'alimentation de la chaudière. La deuxième partie, liée à la chaudière par des tuyaux constitue l'ensemble des équipements servant au séchage des amandes.

Le four H2CP (installé à Kolda) est un four de pyrolyse. En effet, il est constitué de deux parties : une partie post-combustion où sont brûlées les coques et une partie où les coques subissent une pyrolyse dégageant un gaz de combustion, le gaz de pyrolyse. À proximité du four se trouve un réservoir de 1000 litres rempli d'eau d'alimentation de la chaudière, qui se convertit en vapeur surchauffé, à une température de 159 °C et une pression à 6bars. Ce qui aboutit à la production de vapeur pour la cuisson et le séchage des amandes.

Quotidiennement, 455 kg de coques de cajou sont traités à Ethicajou. Le chargement du four se fait via une trémie d'une capacité de 65 kg. Dès lors, les coques sont simplement injectées dans l'environnement très chaud du réacteur jusqu'à 1000 °C. En absence d'oxygène, elles se transforment en bio-charbon et libèrent une partie de leurs composés chimiques sous forme de gaz de pyrolyse. Ces gaz sont conduits par effet de cheminée vers une chambre de combustion située au-dessus du four : le plus souvent, le foyer de la chaudière. En retrouvant de l'oxygène, les gaz entrent en combustion et produisent l'énergie thermique nécessaire à l'unité de production. À la fin de la journée, on obtient des coques pyrolysées qui peuvent être revalorisées sous forme de briquettes de charbon.



**Figure 2.5 :** Schéma d'installation de la technologie d'Ethicajou

**Tableau 2.1:** Explication des numéros énumérés dans le tableau

<b>1</b>	Sortie de vapeur de la chaudière
<b>2</b>	Entrée de vapeur dans le distributeur
<b>3,4, 5 et 10</b>	Sorties de vapeur du distributeur
<b>6</b>	Entrée de vapeur dans l'autoclave
<b>7</b>	Entrée de vapeur dans le séchoir
<b>8</b>	Entrée de vapeur dans choc thermique
<b>9</b>	Sortie de vapeur de la chaudière
<b>11</b>	Sortie de vapeur du séchoir
<b>12</b>	Sorties de vapeur de l'autoclave

### 2.2.2 Présentation et principe de fonctionnement du gazéificateur de la SCPL

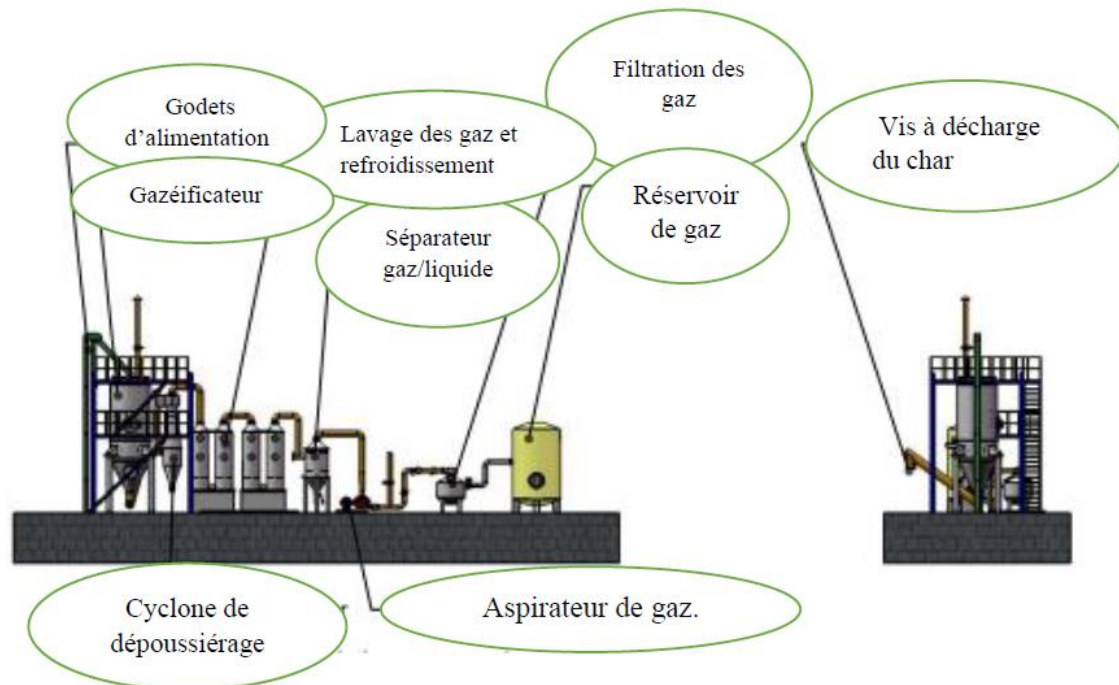
Pour faire le bilan d'énergie on s'est basé sur le système de gazéification installé au niveau de la SCPL. De ce fait, en se basant sur la littérature on a essayé de décrire le processus de fonctionnement de ce gazéificateur. L'objectif de ce processus de gazéification est de rompre les liens carbonés des coques d'anacarde afin de générer des gaz contenant des éléments combustibles tels que le monoxyde d'oxygène (CO), le dihydrogène (H<sub>2</sub>), ainsi que des hydrocarbures comme le méthane (CH<sub>4</sub>) [24].

Au sein de la SCPL, la gazéification se déroule en trois (3) ou quatre (4) étapes principales, en prenant compte l'étape d'oxydation des gaz de pyrolyse qui se produit juste après l'étape de pyrolyse.

Ces principales étapes sont entre autres [25] :

- **Séchage** : cette phase a lieu à des températures comprise entre 100 et 160 °C voir 200 °C. La chaleur provoque l'évaporation de l'eau présente dans la matière organique. Les performances énergétiques du gazéificateur sont grandement influencées par le processus de séchage des coques de cajou.
- **Pyrolyse** : la hausse de la température entraîne la décomposition de la biomasse en composés organiques, gaz, carbone (char) et goudrons. La seconde étape de ce processus de gazéification est la pyrolyse, qui se produit à des températures comprises entre 450 à 800 °C. En présence d'un composé oxydant, les coques d'anacarde se métamorphosent en gaz incondensables, en vapeur condensables et en chars.
- **Gazéification** : la combustion d'une partie du carbone et du goudron avec l'oxygène de l'air génère de la chaleur et du dioxyde de carbone. Grâce à cette chaleur, les autres phases du processus de gazéification peuvent se dérouler. En générale, la gazéification de la biomasse est une réaction chimique qui transforme un combustible organique solide en un gaz dénommé « syngas » ou gaz de synthèse, principalement constitué de monoxyde de carbone (CO), de dihydrogène (H<sub>2</sub>) et de méthane (CH<sub>4</sub>). Le processus

de gazéification se déroule à des températures extrêmement élevées, pouvant atteindre 900°C). La figure 2.6 présente une image des composants du système de gazéification de la SCPL.



**Figure 2.6 :** Vue de face et de profil du système de gazéification de la SCPL

### 2.3 Typologie des unités de pyrolyse rencontrées

Lors de nos enquêtes, on a rencontré deux types d'unités de transformations. Ce sont des usines semi-industrielles qui fonctionnent presque de la même façon. Autrement dit, elles ont des activités similaires.

Elles sont toutes des unités gérées par des femmes et des hommes divisés en groupes. Les femmes s'occupent de toutes les activités relatives aux amandes notamment le décorticage des noix par brisure de la coque pour récupérer l'amande, le dé-pelliculage de l'amande et triage des amandes, le nettoyage des amandes et le conditionnement des amandes dans des sachets destinées aux marchés. Tandis que les hommes s'occupent des aspects techniques des différentes installations. Cependant, les technologies installées dans ces deux unités sont différentes.

#### 2.3.1 La technologie installée à ETHICAJOU

Cette technologie permet de réaliser toutes les étapes de la transformation. Elle est composée de cinq parties essentielles (voir figure 2.5 qui sont :

### **Four H2CP ou High Calorique Cashew pyrolyser en anglais**

C'est un équipement thermique dédié au traitement des coques d'anacarde, à la production de chaleur et à la production de charbon. Donc, c'est le moteur de la chaufferie ou l'élément fondamental de la chaufferie.

Il est constitué de :

#### ✓ Gabarit

C'est le lieu de pyrolyse des coques. Il est composé d'un cylindre de 1 m 50 de hauteur et 1 m 50 de diamètre. Une couche à base de briques d'argile à l'intérieur du cylindre protège l'acier de la chaleur. En bas du gabarit, il y'a une porte facilitant l'accès à l'intérieur. Dans le four, on trouve quatre ensembles de tuyaux équipés de bouchon pour contrôler la quantité d'air entrant.

#### ✓ Trémie

Elle est située sur le haut du four et représente ainsi la chambre de chargement des coques. On peut le chargé jusqu'à 60 kg. Elle est fermée en haut par un couvercle et en bas par une trappe.

#### ✓ Brûleur

Il est situé sur le four et dans le foyer de la chaudière. C'est le lieu où les gaz de pyrolyse quittent le gabarit pour être brûlés.

### Une chaudière

Elle assure la production de vapeur nécessaire pour la cuisson, le séchage et l'humidification. Cette chaudière est de type vertical à tubes de fumées. Elle a une capacité de 1000 litres avec une production de 500 kg/h de vapeur en moyenne. Son rôle est de produire de la vapeur d'eau sous pression en utilisant la chaleur produite par la combustion des gaz de pyrolyse. Elle est composée de 3 parties principales qui sont :

- ✓ un foyer de combustion dans lequel le combustible est brûlé pour produire de la chaleur ;
- ✓ un échangeur constitué de tubes permettant le chauffage de l'eau ;
- ✓ un collecteur de fumées pour accumulation des fumées ayant traversées les tubes et les évacuer par la cheminée.

Il y'a aussi les équipements de sécurité et de réglage :

- ✓ deux manomètres indiquant la pression dans la chaudière ;
- ✓ une glace à niveau indiquant le niveau d'eau dans la chaudière ;
- ✓ deux soupapes de sécurité ;

### Un autoclave

Il permet de réaliser la cuisson des noix pour rendre ensuite possible le décorticage. Il assure le traitement de 500 kg de noix brutes. Il est composé :

- ✓ d'une virole qui est le lieu de cuisson de noix équipée d'un distributeur de vapeur ;



- ✓ d'une porte en haut qui permet de charger l'autoclave en noix brutes ;
- ✓ d'une porte en bas qui permet de décharger les noix cuites ;
- ✓ et d'une vidange d'eau (condensat).

#### ✚ Séchoir

Suite au décorticage, Il permet de faire passer l'humidité des amandes de 8% à 4%. Combiné au choc vapeur, il permet également de décoller la pellicule des amandes.

#### ✚ Choc thermal

Il permet d'humidifier la surface des amandes entre les deux séchages afin de décoller la pellicule pour faciliter le dé-pelliculage des amandes sans les gâter.

Il est constitué :

- ✓ d'une chambre en béton qui peut accueillir deux chariots d'amandes ;
- ✓ d'un répartiteur de vapeur ;
- ✓ d'une fenêtre et d'une porte.

### **2.3.2 La technologie installée à la SCPL**

Cette technologie de gazéification permet la production d'un combustible gazeux, qui à son tour peut être converti en énergie thermique ou en électricité par l'intermédiaire d'un moteur à combustion interne. Plusieurs paramètres, tels que la vitesse du moteur, la pression dans le four et la température, ont une influence sur cette réaction, jouant un rôle essentiel lors de la production du gaz de synthèse. C'est un gazéificateur à lit fixe dédiée aux coques d'anacardes. Lors du fonctionnement, les coques d'anacardes forment un lit dense au sein du réacteur et se déplace verticalement. Il faudra noter que ce système contient une pompe dont le rôle est de pomper l'eau pour ensuite la faire passer entre les deux parois du gazogène pour son refroidissement. Ce gazogène peut produire du charbon de biomasse après 30 à 40 min du démarrage. On peut utiliser les charbons obtenus comme combustibles (briquettes de charbon) dans des usages domestiques et industriels. Une image du gazéificateur installé à la SCPL est présentée dans la figure 2.7 ci-dessous.



**Figure 2.7 :** Gazéificateur de la SCPL

Les données techniques de ce gazéificateur sont consignées dans les tableaux 2.1 et 2.2 ci-dessous. Ils nous donnent les caractéristiques du gazéificateur et la capacité de conception du système de production qui possède une puissance de 100 kW.

**Tableau 2.2 :** Caractéristique du gazéificateur

<b>Modèle du gazogène</b>	<b>QM1.5</b>
Taux de production de gaz (Nm <sup>3</sup> /h)	660-700
Température du gaz de sortie (°C)	420
Consommation de coques d'anacarde	300 kg/h
Un silo	Inclus dans la fournaise à biomasse
2 ou 3 convoyeurs	Selon la conception
Deux dispositifs des gaz	Séparateur cyclone à deux étages et conversion de fréquence
Support du panneau de commande	1

**Tableau 2.3 :** Capacité de conception du système production de puissance 100 kW

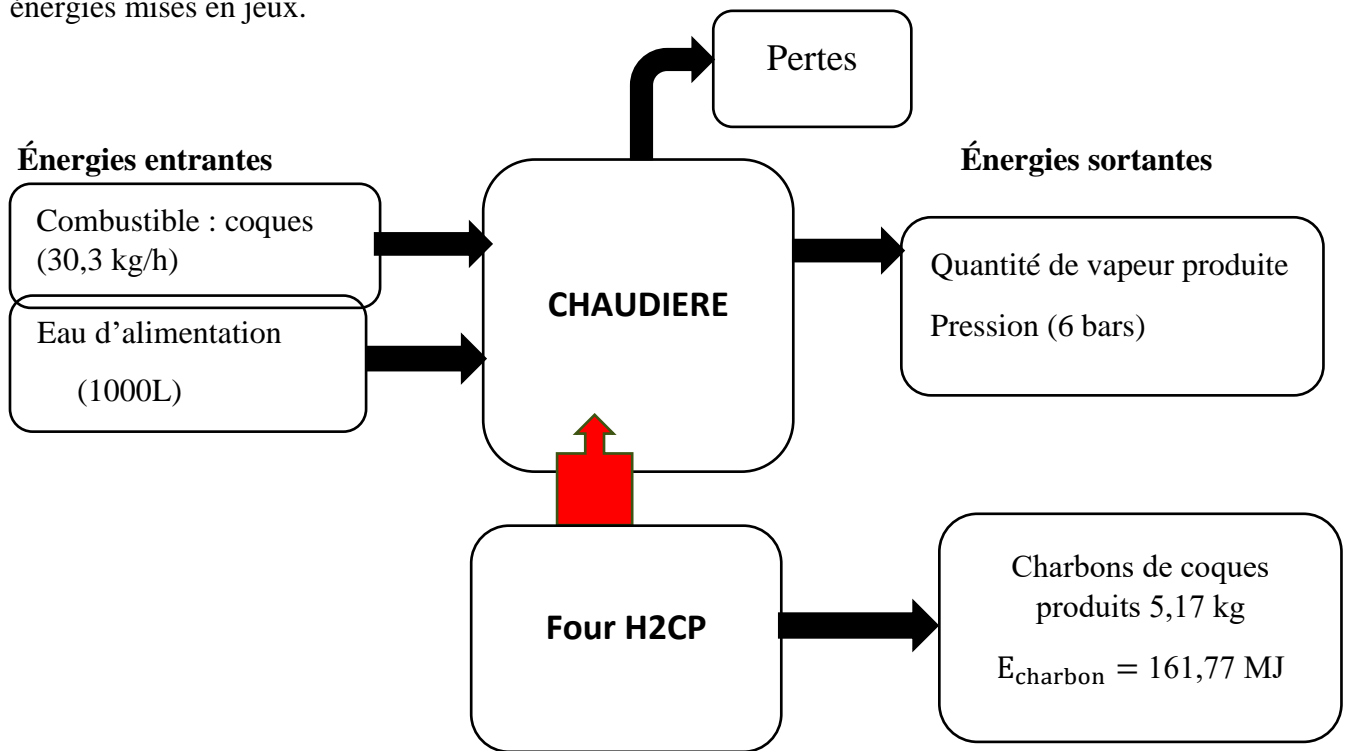
<b>Article</b>	<b>Description</b>
Modèle de groupe électrogène	DY100GFJ
Puissance nominale	100 kW
Tension nominale	400 kV
Courant nominale	920 A
Fréquence nominale	50 Hz
Facteur de puissance nominale $\cos\phi$	0,8
Régulation stationnaire de tension	$\pm 2,3$

Les données de ce tableau n'interviennent pas dans le bilan énergétique hormis la masse des coques de cajou introduites. Elles servent de renseignement sur le gazéificateur et les valeurs nominales du système de production de l'électricité.

#### **2.4 Détermination du bilan énergétique de l'installation de Ethicajou**

Le bilan énergétique nous fournit la quantité de chaleur perdue dans les différentes installations, ainsi que toutes les solutions d'isolations pour y remédier.

La figure 2.8 matérialise le bilan énergétique de l'installation. Elle montre de façon claire les énergies mises en jeux.



**Figure 2.8 :** Bilan énergétique du système chaudière

Le bilan énergétique résumant le schéma ci-dessus est donné par la formule suivante :

$$\text{Énergie entrante} = \text{Énergie sortante} + \text{Énergie perdue} \quad (2.15)$$

- **Énergie entrante**

Elle correspond à l'énergie générée par le combustible. Lors du déroulement, l'eau entre d'abord dans la chaudière avec une température ( $T_e$ ) de 40°C et passe à 100°C. En suite Elle se vaporise jusqu'à la température ( $T_v$ ) de 159°C à 6 bars, et en fin la surchauffeur élève la température jusqu'à 210°C noté ( $T_s$ ). On qualifie cette vapeur de gaz parfait.

L'énergie entrante des coques est donnée par :

$$E_a = PCI \times m_c \quad (2.16)$$

PCI : pouvoir calorifique inférieur des coques (MJ/kg)

$m_c$  : masse combustible (kg)

- **Énergie sortante**

Elle correspond à l'énergie utile composée de celle de la production des vapeurs et de celle contenue dans les charbons de coques issues de la pyrolyse.

L'énergie utile des vapeurs produites par la chaudière est donnée par :

$$E_{\text{chaudière}} = D_e C_{pl}(T_{(100^\circ\text{C})} - T_e) + D_e L_V + D_e C_{pv}(T_v - T_{(100^\circ\text{C})}) + D_e C_{pv}(T_s - T_v) \quad (2.17)$$

$D_e$  : Débit de l'eau d'alimentation (L/h)

$C_{pl}$  : Capacité massique de l'eau (kJ/kg.K)

$T_e$  : Température d'entrée de l'eau °C

$T_v$  : Température de vaporisation de l'eau à 159 °C

$T_{(100^\circ\text{C})}$  : Température de vaporisation de l'eau à 100 °C

$T_s$  : Température de sortie des vapeurs °C

$L_V$  : Chaleur latente de l'eau (kJ/kg)

$C_{pv}$  : Capacité massique de la vapeur (kJ/kg.K)

L'énergie utile contenue dans les charbons de coques issues de la pyrolyse en MJ est donnée par :

$$E_{\text{charbon}} = \text{PCI} \times m_{\text{charbon}} \quad (2.18)$$

Ce PCI correspond à celui des charbons obtenus après pyrolyse des coques.

L'énergie utile totale en MJ est ainsi donnée comme suit :

$$E_{\text{utile chaudière}} = E_{\text{chaudière}} + E_{\text{charbon}} \quad (2.19)$$

$$E_{\text{utile chaudière}} = D_e C_{pl}(T_{(100^\circ\text{C})} - T_e) + D_e L_V + D_e C_{pv}(T_v - T_{(100^\circ\text{C})}) + D_e C_{pv}(T_s - T_v) + \text{PCI} \times m_{\text{charbon}} \quad (2.20)$$

### ▪ Énergie perdue

Dans la chaudière, il existe plusieurs types de pertes qui sont : les pertes par les fumées, pertes dues aux purges et aux parois, pertes par les imbrulées et même celles perdues sous forme de goudron que nous allons déterminer par la relation suivante :

$$\text{Pertes} = E_a - E_u \quad (2.21)$$

- Rendements
- ✓ Rendement de la chaudière

Il est donné par le rapport entre l'énergie utile et l'énergie fournie par les coques. La chaleur utilisée pour chauffer le fluide est appelée énergie utile. La capacité d'une chaudière à récupérer

l'énergie de son combustible et à la restituer dans le circuit de chauffage est mesurée par son rendement.

$$\eta_{\text{vapeur}} = \frac{D_e C_{pl}(T_{(100^\circ\text{C})} - T_e) + D_e L_v + D_e C_{pv}(T_v - T_{(100^\circ\text{C})}) + D_e C_{pv}(T_s - T_v)}{PCI \times m_C} \times 100 \quad (2.22)$$

✓ Le rendement énergétique des coques pyrolysées

Ce rendement est donné par le rapport entre l'énergie contenue dans les coques issues de la pyrolyse et l'énergie entrante. Il est nécessaire de prendre en compte l'énergie dégagée par les chars de coques de cajou.

$$\eta_{\text{charbon}} = \frac{E_{\text{charbon}}}{PCI \times m_C} \times 100 \quad (2.23)$$

✓ Le rendement total du process est donné par la somme de l'énergie consommée par la chaudière et l'énergie emmagasinée par les charbons par rapport à l'énergie totale fournie par les coques d'anacardes.

$$\eta_{\text{total}} = \frac{E_u}{PCI \times m_C} \times 100 \quad (2.24)$$

## 2.5 Détermination d'un bilan énergétique sur gazéificateur de la SCPL

Depuis presque deux ans ce gazéificateur est tombé en panne. Pour atteindre notre objectif d'étude, on a mené une enquête qui nous a permis de collecter les données nécessaires et parmi ces données il y a la quantité de coques traitée, le temps mis pour le traitement ainsi que les quantités de vapeur et d'électricité produites. C'est un système de production de chaleur et d'électricité connu sous le nom de cogénération produisant 100 kWh d'électricité et 500 kg de vapeur pour 300 kg de coques d'anacarde. Ainsi, ledit bilan énergétique est résumé sur la figure 2.19 suivant.

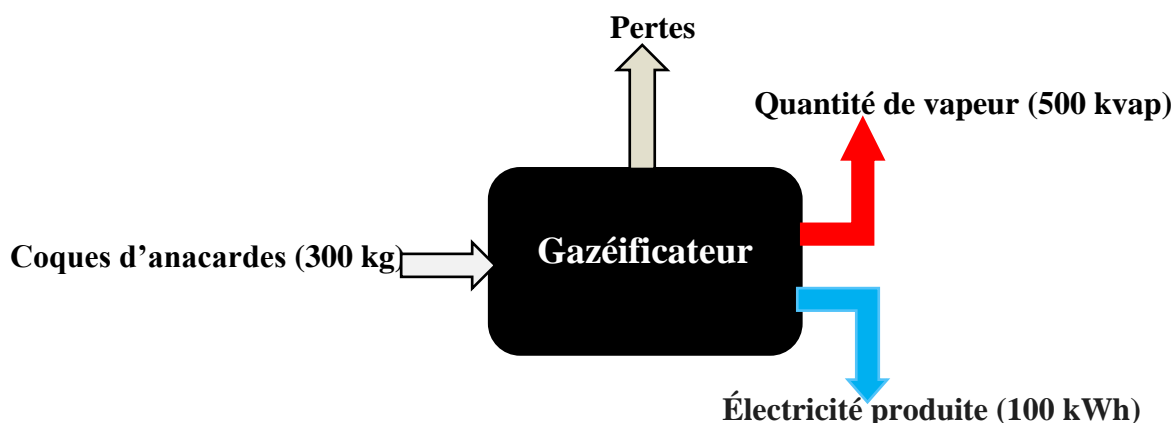


Figure 2.9 : Bilan énergétique du gazéificateur

Le bilan énergétique résumé sur la figure ci-dessous se détermine presque de la façon suivante :

$$\text{Énergie entrante} = \text{Énergie sortante} + \text{Énergie perdue} \quad (2.25)$$

- L'énergie entrante ou absorbée est l'énergie fournie par les 300 kg des coques introduites dans le gazéificateur, notée  $E_a$ .
- L'énergie sortante correspondante à l'énergie utile transformée sous forme d'électricité et de vapeur.

$$E_{\text{utile gazéificateur}} = E_{\text{Totale vapeur}} + E_{\text{électrique}} \quad (2.26)$$

✓  $E_{\text{vapeur}}$

La vaporisation s'opère par des changements de phase de l'entrée de l'eau d'alimentation jusqu'à la sortie des vapeurs. Pour un kilogramme de vapeur, l'énergie correspondante est donnée comme suit :

$$E_{\text{vapeur}} = m_{\text{eau}} C_p \Delta T + h \quad (2.27)$$

$m_{\text{eau}}$  : masse d'eau en kg

$h$  : Chaleur latente de vaporisation en (kJ/kg) à la pression de 4 bars ;

$C_p$  : Capacité calorifique de l'eau en (kJ/kg) ;

$\Delta T$  : Différence de température en (°C).

- **$E_{\text{électrique}}$**  : Dans le cas de la SCPL, l'énergie électrique produite par la gazéification est équivalent à 100 kWh.
- **Énergie perdue**  
Pour le cas de la SCPL on n'a pas estimé l'énergie perdue car nous n'avons pas pu estimer l'énergie contenue dans les chars de coques de cajou à cause de manque de données sur ce dernier.

## Conclusion

Ce chapitre était basé essentiellement sur la méthodologie de caractérisation des coques d'anacarde, la présentation et le principe de fonctionnement des technologies étudiées et la présentation des matières premières et appareils utilisés. D'abord, on a donné de façon explicite les paramètres permettant d'estimer la valeur énergétique des coques d'anacarde. Ensuite on a fait une caractérisation des technologies rencontrées en donnant leurs caractéristiques. Enfin, nous avons présenté les différentes formules utilisées pour faire le bilan énergétique.

**Chapitre 3 : Applications numériques du bilan énergétique des unités d’Ethicajou et de la SCPL et étude de faisabilité d’un projet de valorisation des coques de cajou**

## Introduction

Ce chapitre est composé de deux parties fondamentales. Dans la première, il sera question de faire le calcul du bilan énergétique des deux unités de transformations étudiées pour terminer par analyser les résultats trouvés. Dans la seconde partie, nous allons faire une étude de faisabilité qui représente la clé de réussite du projet.

### 3.1 Calcul du bilan énergétique pour la production de chaleur de l'usine Ethicajou

#### ▪ Énergie entrante

$$E_a = PCI \times m_c \quad \text{avec } m_c = 30,33 \text{ kg}$$

$$E_a = 18,7 \times 30,33$$

Ce qui donne finalement

$$E_a = 566,61 \text{ MJ}$$

#### ▪ Énergie sortante

Le tableau 3.1 ci-dessous contient les valeurs récoltées lors de l'enquête effectuée à Ethicajou.

**Tableau 3.1 :** Définitions des paramètres utilisés pour le calcul de l'énergie utile

Paramètres	Significations	Valeurs
$D_e$ (L/h)	Débit de l'eau d'alimentation	65,96
$L_V$ (kJ/kg)	Chaleur latente de l'eau	2074,73
$C_{pl}$ (kJ/kg. K)	Capacité massique de l'eau	4,18
$C_{pv}$ (kJ/kg. K)	Capacité massique de la vapeur	2,41
$T_e$ (°C)	Température d'entrée d'eau	40
$T_v$ (°C)	Température de la vaporisation de l'eau	159
$T_s$ (°C)	Température de sortie de la vapeur	210
$T_f$ (°C)	Température de fumée	140
$P_v$ (bar)	Pression de la vapeur à la sortie de la chaudière	6,5

A part les différentes températures et les débits, toutes les autres valeurs sont obtenues à l'aide d'abaques référencées dans la bibliographie.

✓ L'énergie utile de la chaudière est donnée par :

$$E_{\text{utile chaudière}} = D_e C_{pl} (T_{(100^\circ\text{C})} - T_e) + D_e L_V + D_e C_{pv} (T_v - T_{(100^\circ\text{C})}) + D_e C_{pv} (T_s - T_v)$$

$$E_{\text{utile chaudière}} = (65,96 \times 4,18) (100 - 40) + (65,96 \times 2074,73) + (65,96 \times 2,41) (159 - 100) \\ + (65,96 \times 2,41) (210 - 159)$$

$$E_{\text{utile chaudière}} = 170,88 \text{ MJ}$$

Calcul du rendement



$$\eta_{\text{vapeur}} = \frac{E_{\text{utile chaudière}}}{E_a} \times 100$$

$$\eta_{\text{vapeur}} = \frac{170,88}{566,61} \times 100$$

$$\eta_{\text{vapeur}} = 30,16\%$$

Nous allons par la suite évaluer l'énergie emmagasinée par les coques afin de connaître le rendement total.

✓ Energie contenue dans les charbons de coques

Pour 30,33 kg de coques utilisées par heure ils récupèrent 5,17 kg de charbon

$$E_{\text{charbon}} = \text{PCI} \times m_{\text{charbon}}$$

$$E_{\text{charbon}} = 31,29 \times 5,17$$

$$E_{\text{charbon}} = 161,77 \text{ MJ}$$

Calcul du rendement de l'énergie contenue dans les charbons de coques d'anacarde

$$\eta_{E_{\text{charbon}}} = \frac{E_{\text{charbon}}}{E_a} \times 100$$

$$\eta_{E_{\text{charbon}}} = \frac{161,77}{566,61} \times 100$$

$$\eta_{E_{\text{charbon}}} = 28,55\%$$

Donc le rendement total est donné par :

$$\eta_{\text{total}} = \frac{170,88 + 161,77}{566,61} \times 100 = 58,71\%$$

Ce rendement s'explique par le fait qu'il y a des pertes d'origine diverses comme : les pertes par les fumées, pertes dues aux purges et aux parois, pertes par les imbrulées et même celles perdues sous forme de goudron que nous allons calculer ci-dessous.

$$\text{Pertés} = E_a - E_{\text{utile}}$$

$$\text{Pertés} = 566,61 - 332,65$$

$$\text{Pertés} = 233,96 \text{ MJ}$$

### 3.2 Calcul du bilan d'énergie pour la production d'électricité et de chaleur de la SCPL

Le tableau 3.2 présente les informations collectées pendant l'enquête notamment les valeurs de la pression des vapeurs, de la plage de température du gazéificateur, de la vapeur et d'électricité produites.

**Tableau 3.2 :** Tableau des valeurs collectées lors de l'enquête à la SCPL

Paramètres	Gazéificateur	Chaudière
Pression des vapeurs (bars)	-	7
Vapeur produite (kg)	-	500
Température (°C)	900	-
Quantité de coques (kg/h)	300	-
Électricité produite (kWh)	100	-
Temps de fonctionnement	Continu (340jours/an)	11h/jour
Température à la sortie des vapeurs/gaz (°C)	420	170

#### ▪ Energie d'alimentation

$$E_a = PCI \times m_C$$

$$E_a = 17,4 \times 300$$

$$E_a = 5220 \text{ MJ}$$

#### ▪ Energie utile

$$E_{u \text{ gazéificateur}} = E_{\text{Totale vapeur}} + E_{\text{électrique}}$$

$$\checkmark E_{\text{vapeur}} = m_{\text{eau}} C_p \Delta T + h$$

$h=2107 \text{ kJ/kg}$  la chaleur latente à 4 bars trouvée dans l'abaque [26].

$$E_{\text{vapeur}} = 1 \times 4,18 \times (100 - 25) + 2107$$

$$E_{\text{vapeur}} = 2,42 \text{ MJ}$$

Donc l'énergie de vaporisation sera donnée par le produit de l'énergie correspondante à un kilogramme de vapeur (1kg de vapeur  $\longrightarrow$  2676kJ) et la quantité de vapeur produite.

$$E_{\text{Total vapeur}} = 2,42 \times 500 \times 2,68$$

$$E_{\text{Total vapeur}} = 3242,8 \text{ MJ}$$

$$E_{\text{utile gazificateur}} = E_{\text{Total vapeur}} + E_{\text{électrique}}$$

$$E_u = 3242,8 + 100 \times 3,6$$

$$E_u = 3602,8 \text{ MJ}$$

Calcul du rendement

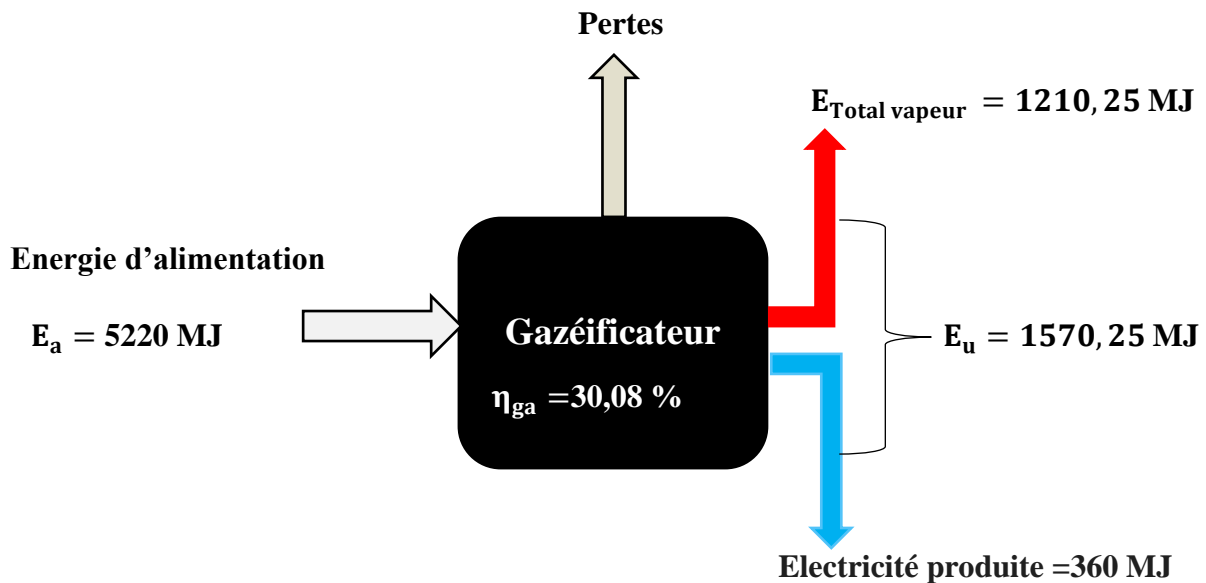
$$\eta_{\text{utile gazéificateur}} = \frac{E_{\text{utile gazéificateur}}}{E_a}$$

$$\eta_{\text{utile gazéificateur}} = \frac{3602,8}{5220}$$

$$\eta_{\text{utile gazéificateur}} = 69 \%$$

Ce faible rendement serait dû à la durée du gazéificateur, aux pertes de chaleur. Ces pertes sont issues des jointes des tuyaux, des imbrulés, des parois des tuyaux.

La figure 3.1 ci-dessous résume le bilan énergétique avec les données calculées précédemment du gazéificateur.



**Figure 3.1 :** Bilan énergétique du gazéificateur

Cette figure résume le bilan énergétique du gazéificateur avec les résultats des énergies entrantes et sortantes calculés. On voit que l'énergie d'alimentation du gazéificateur est égale à 5220 MJ correspondant à l'énergie issue des coques d'anacardes pyrolysées. De cette énergie on a pu calculer l'énergie produite sous forme de vapeur à 3242,8 MJ et celle produite sous forme d'électricité à 360 MJ. La somme de ses deux énergies donne l'énergie utile estimée à 3602,8 MJ. En définitive le rendement du gazéificateur est égal à 69 %.

### 3.3 Résultats et discussions

Nous allons examiner les résultats obtenus lors des phases de test des coques d'anacardes de même que ceux obtenus à partir des bilans énergétiques pour chaque unité de transformation.

#### 3.3.1 Caractérisation des échantillons étudiés

Le tableau 3.3 enregistre les résultats des analyses élémentaires, immédiates, la valeur calorifique et la masse volumique des divers échantillons.

**Tableau 3.3 : Résultats des analyses élémentaire**

Échantillon	Analyses immédiates (%)*				Analyse élémentaire (%)*				Valeur calorifique MJ/kg		Masse Volumique (kg/ m <sup>3</sup> )
	E <sup>b</sup>	MV	Ce	CF	C	H	N	O	PCS	PCI	$\rho$
<b>Biomasse brute ETHICAJOU</b>	3,66	80,78	3,96	15,26	47,72	6,02	0,69	41,61	19	18,7	990
<b>Biomasse brute SCPL</b>	4,63	83,03	3,18	13,79	47,25	6,15	0,66	42,76	18,9	17,4	1392
<b>Biomasse brute BIAYE **</b>	4,26	83,33	2,53	14,11	47,73	6,18	0,63	42,93	19,0 9	17,59	-
<b>Charbon issu ETHICAJOU</b>	9,23	5,39	9,23	85,38	84,44	2,1	0,93	3,3	32	31,29	-
<b>Charbon de coque Cajou **</b>	2,5	5,40	10,6	83,96	83,02	2,14	0,91	3,28	31,5	31,00	-

\*Base sèche, \*\* T. BIAYE, 2022.

Ces résultats mettent en exergue de façon claire la différence des propriétés physico-chimiques entre les deux échantillons étudiés. De ce fait, le tableau 3.3 montre que du point de vue des analyses immédiate et élémentaire et des valeurs des pouvoirs calorifiques, que les caractéristiques des coques d'anacarde d'Ethicajou semblent proches de celles de la SCPL. Cette légère différence des caractéristiques pourrait s'expliquer par l'origine des deux biomasses. Ces résultats sont comparables à celui de BIAYE [21]. Pour le cas de la masse volumique cette différence s'expliquerait du fait que les paramètres de traitements des noix de cajou sont différents mais aussi des calibres de ces noix. Nous constatons également que le charbon issu d'Ethicajou est constitué majoritairement d'élément carbone. De plus, les pouvoirs calorifiques des chabons issus d'Ethicajou varient de 31 à 32 MJ/kg. Ce constat a également été remarqué lors des études de BIAYE [21] et HIMBANE *et al* [23].

#### 3.3.2 La performance énergétique des deux unités transformation

Le tableau 3.4 représente les résultats expérimentaux obtenus montrant ainsi la performance énergétique des deux unités de transformations.

**Tableau 3.4 : Performance énergétique des deux unités transformation**

<b>Unités de transformation</b>	<b>Ethicajou</b>	<b>SCPL</b>
Masse de coques traitée (kg)	30,33	300
Energie entrant (MJ)	566,61	5 220
Energie utile (MJ)	170,88	1570,250
Energie consommée par les charbons de coques (MJ)	161,77	-
Rendement de l'énergie du charbon produite (%)	28,55	-
Rendement des technologies (%)	30,16	69
Rendement total (%)	63,45	-

Pour le cas de SCPL, on n'a pas pu déterminer l'énergie emmagasinée par les coques pyrolysées du fait qu'il y'en avait pas lors de notre enquête puisque le gazéificateur était tombé en panne depuis un moment. Les énergies produites par ces deux technologies diffèrent du fait qu'elles n'ont pas les mêmes puissances et fonctionne différemment. Par ce que, lors du fonctionnement les masses introduites sont différentes et les coques sont pyrolysées de façon différente. Pour le cas de la SCPL, ils peuvent utiliser cinq à six sacs de chargement tandis que pour Ethicajou seulement trois sacs suffisent pour le fonctionnement comme l'illustre le tableau 3.4 ci-dessous. La différence de ces deux technologies en termes de puissance et de masse introduite est à l'origine de la différence d'énergie entrante et l'énergie sortante. Ainsi pour la SCPL nous avons 3602,8 sortants pour 5220 MJ entrant et pour Ethicajou on a 332,65 MJ sortant pour 566,61 MJ entrant. Il est presque impossible d'avoir un système possédant un rendement énergétique de 100 %. Cela signifierait que les technologies utilisent toute l'énergie qu'elles consomment pour la transformer à la forme d'énergie souhaitée. Pour déterminer l'efficacité des technologies, on a calculé le rendement énergétique des deux technologies dont 30,16% pour Ethicajou et 69 % pour la SCPL. Ces 69 % de la SCPL correspond uniquement à l'énergie produite en vapeur et en électricité. Les résultats trouvés pour Ethicajou sont similaires à ceux obtenus dans la littérature pour la même technologie. C'est le cas de Godjo *et al* [8] qui produit 423,923 MJ en 1,03 h pour 30 kg de coques d'anacardes introduites. Tandis que pour l'étude réalisée sur le réacteur de pyrolyse installé au Burkina Faso [8], pour 30 kg de coques introduites 285 MJ sont produits en 1h.

### **3.4. Etude faisabilité du projet**

L'étude faisabilité est essentielle pour assurer le succès du projet. De ce fait, il sera question d'abord d'examiner les besoins énergétiques des parties prenantes, de déceler la zone d'implantation du projet et les conséquences qu'il engendrera. Ensuite on explicitera de fond en comble la procédure d'implantation du projet et sa rentabilité. En fin on terminera par proposer un moyen de valorisation des coques anacarde.

### **3.4.1. Analyse des besoins énergétiques de la population et des unités de transformations**

Dans la lutte contre la pauvreté, l'accès à l'énergie est devenu une préoccupation majeure depuis quelques années, car il est essentiel pour le développement économique et sociale d'une société. C'est la raison pour laquelle, selon le point de vue de Rosenberg (1998), l'énergie demeure un élément essentiel pour améliorer la qualité de vie des individus. Cette question fait l'objet de nombreuse controverse à travers le monde, en raison des disparités croissantes entre l'offre qui diminue et une demande qui augmente. Cette inégalité entraîne une crise mondiale qui affecte l'économies africaines.

Le rapport entre la quantité d'énergie importée sur un territoire et l'offre énergétique totale du territoire est le taux de dépendance énergétique. Plus que ce taux augmente, la région dépend davantage de l'extérieure pour répondre à ses besoins énergétiques. Pour les populations des pays en développement, notamment ceux d'Afrique subsaharienne, l'accès à l'énergie représente une grande difficulté. Nonobstant les investissements considérables dans ce domaine, le Sénégal connaît une production d'électricité insuffisante. La demande d'énergie est composée de trois éléments principaux au Sénégal : Société Nationale d'Electricité du Sénégal (SENELEC), représentant la grande majorité de la demande, les clients industriels auto-producteurs et la demande en milieu rural non couverte par la SENELEC (prise en charge par les programmes d'électrification rurale de l'ASER et de la coopération internationale). Bien que ces acteurs soient impliqués, il est important de souligner qu'une partie de la population sénégalaise n'a pas accès à l'électricité. De plus, le pays possède d'importantes ressources en énergie. L'utilisation judicieuse de ces ressources pourrait le conduire vers une croissance durable. Toutefois, l'actuel système ne suit pas le rythme de la demande, ce qui entraîne une disparité entre l'offre et la demande. Selon les données disponibles au Sénégal, environ 42% à 43 % des foyers sénégalais bénéficient de l'électricité. Cela signifie qu'il y a encore des foyers qui ne disposent pas encore d'électricité, comme le mentionna Ibrahima NIANE, responsable de l'électrification rurale au ministère de l'Energie le 22 mars 2022. Cependant, actuellement ce taux tourne autour de 65 % donc il reste encore un vide à combler pour satisfaire la demande en énergie. En Casamance, les populations rencontrent toujours des problèmes pour subvenir à leurs besoins en énergie. Pour le moment dans les unités de transformations d<sup>2</sup>e la noix de cajou, l'énergie la plus utilisée est celle électrique qui est excessivement chère et provoque des dégâts sur l'environnement. Les ménages continuent d'utiliser la biomasse (bois et charbon de bois) afin de répondre à leurs besoins en matière de cuisines. Avec une efficacité de 0,1 %, le foyer à trois pierres demeure le système de cuisson le plus fréquemment employé dans les zones urbaines et rurales défavorisées.

Ces zones sont peu accessibles aux foyers améliorés, dont l'efficacité énergétique peut atteindre 40 %, en raison des prix initiaux élevés et du manque d'organisation et de mécanisme de financement pour les rendre accessibles. En outre, malgré la subvention, l'accès au GPL par les populations pauvres est resté faible en raison de divers obstacles tels que les capacités financières pour acheter des dispositifs GPL et le manque de points de distribution décentralisés pour répondre à la demande de l'habitat dispersé des zones rurales. Le développement du biogaz domestique a connu un progrès passant de presque 40 biodigesteurs installés en 2007 à 579 en 2013 selon le site du programme national brut (PNB.SN). L'utilisation de la biomasse végétale pour subvenir aux besoins des ménagers restent encore un défi à relever pour satisfaire 98 % des besoins de ces derniers. Pour subvenir à cette analyse, nous allons estimer à partir de leurs consommations les besoins énergétiques.

Pour les unités de transformations, elles rencontrent d'énormes difficultés pour satisfaire leurs demandes ; car pour faire fonctionner leurs matériels elles utilisent de l'électricité de la SENELEC et le gaz butane qui leur coûte chers. Parfois, les délestages imprévisibles entraînent une destruction des machines et causent des problèmes lors de la fabrication des produits. Certaines unités utilisent du bois pour faire fonctionner leurs systèmes (chambre de combustion, chaudière, etc.) ce qui cause des émissions de gaz à effet de serre.

### **3.4.2. Zone d'implantation du projet**

Le choix de l'emplacement est primordial dans le cadre de la création d'un projet pour deux raisons principales.

Tout d'abord, l'emplacement joue un rôle essentiel dans la réussite du projet. Un emplacement bien choisi aidera notre projet à attirer des clients, à améliorer sa visibilité et à faciliter la distribution de ses produits ou services.

D'un autre côté, un mauvais choix d'emplacement risque de compromettre le succès de notre projet.

De plus, la location des locaux sélectionnés est un engagement crucial pour tout projet. L'emplacement choisi a des répercussions financières importantes pour une entreprise sur une longue période. Il est donc essentiel de porter une attention particulière à la sélection de l'endroit. Une mauvaise décision entraînerait l'échec du projet. IL faut tenir en considération tous les éléments pertinents avant de prendre une décision finale.

Finalement, il est intéressant de prendre une décision stratégique éclairée en prenant en compte les objectifs du projet, les besoins des clients, les coûts de location et les aspects géographiques. Le choix du lieu d'implantation du projet est crucial pour son succès futur. On choisira la région de Ziguinchor pour le lieu d'implantation. Nous devons donc impérativement considérer

plusieurs critères clés pour expliquer ce choix. Voici quelques-uns des critères les plus importants à considérer sont listés ci-contre.

#### **3.4.2.1. L'accessibilité**

L'entreprise doit être facilement accessible pour nos clients, nos employés et nos fournisseurs de coques d'anacarde. L'accessibilité est influencée par plusieurs facteurs, tels que la proximité des transports et des routes principales. L'emplacement de notre entreprise sera situé à proximité des transports en commun, cela facilitera le déplacement des clients et des employés qui utilisent ce mode de transport de même les voitures de transports du produit principal. Donc facilité l'accessibilité impactera positivement notre chiffre d'affaires.

#### **3.4.2.2. La concurrence**

Dans la recherche d'un lieu d'implantation pour le projet, analyser la concurrence existante dans la région nous permettra de faire des innovations lors de l'exécution du projet. En effet, cette analyse-nous aidera à déterminer si l'emplacement que nous envisageons est adapté au projet d'entreprise ou non. Pour ce qui concerne les briquettes de charbon, il y a peu près une dizaine d'unité de transformation qui y travaillent dans la région bien vrai que la production n'est pas grandiose.

#### **3.4.2.3 La réputation du quartier**

L'emplacement de notre projet dans un quartier bien connu et proche de la route nationale aura un impact important sur notre projet et sur la façon dont les gens perçoivent l'entreprise. Le quartier d'implantation influence l'inconscient des gens et leurs donne une première impression sur l'entreprise. Par exemple, si nous choisissons un quartier moins réputé, cela donnera une impression de moindre qualité ou de moins d'expériences.

### **3.5. Impact environnemental et social**

Il sera nécessaire d'effectuer une évaluation environnementale pour tout projet de développement ou activité qui pourrait avoir un impact sur l'environnement. L'étude d'impact sur l'environnement consiste à étudier les effets négatifs et positifs qu'un projet ou programme de développement envisagé aura sur l'environnement, afin de garantir que ces effets sont correctement pris en considérations lors de la conception du projet.

#### **3.5.1 Rappel des composantes et phases du projet**

Le projet comprend plusieurs volets qui sont tous rattachés au secteur d'activités de l'énergie.

- Mise en place du carbonisateur ;
- Fabrication de briquette de charbon ;



- Développement et vulgarisation de la technologie de valorisation pour la production de chaleur et d'électricité.

### **3.5.2 Évaluations des impacts**

#### **3.5.2.1 Démarche à suivre**

Pour étudier les impacts du projet sur l'environnement, on compte procéder par deux grandes étapes. La première concerne la détection et l'étude des conséquences sur l'environnement. La seconde aborde l'évaluation de l'importance de ces conséquences environnementales repérées. L'identification et l'étude de ces conséquences se concentreront sur les critères suivants :

- ✓ Les phases du projet considérées ;
- ✓ Les sources d'impact ;
- ✓ La nature de l'impact.
- ✓ Les composants du milieu d'implantation.

#### **4.3.2.2 Présentation des impacts**

La détection des sources d'impact consistera ici, à déterminer les activités du projet susceptibles d'entraîner des modifications du milieu physique ou des impacts sur les composantes du milieu naturel et humain.

- Impacts positifs du projet

Ces impacts concernent en leur majorité la composante humaine ; il s'agit en autres :

- des opportunités pour les différents prestataires

Ce projet de conception suscite des investissements et donc une opportunité pour les structures œuvrant dans le domaine. Les dépenses dont il est question ici incluent les achats de matériaux de conception et d'équipements à mettre en place, ainsi que les travaux d'aménagement du site, de construction et d'installation des équipements. De cette manière, le lancement du projet reste une occasion d'affaires pour les artisans locaux. Au moins 3 artisans locaux au moins acquerront des marchés pour chaque activité de production de charbon de coques.

- les opportunités d'emploi, directes comme indirectes

Les travaux d'aménagement du site nécessiteront un besoin en personnel. C'est donc une opportunité d'emploi pour les jeunes de ladite zone. Ce projet permettra donc la création d'emplois directs et indirects. Il s'agit entre autres des emplois de technicité, construction, nettoyage, gardiennage, etc... Ainsi pour le démarrage d'une activité et sa bonne continuité au moins 10 jeunes se verront impliqués. Ce chiffre sera multiplié par le nombre d'activité qui sera mise en place.

- Les impacts lors de l'exploitation

Pour cette partie, les impacts sont d'ordre humain et environnemental. Il s'agit :

- des opportunités d'apprentissage et de formation

Ce projet permettra, suite à des formations pratiques et théoriques, aux jeunes d'apprendre des nouvelles techniques de production de charbon vert et même les amener à en trouver une source de revenu.

- de lutter contre la coupe abusive des arbres et valorisation de déchets organiques

Au cours de son exploitation ce projet permettra une diminution de la coupe abusive du bois utilisé dans la production du charbon voire Figure 3.2. Il contribuera à la lutte dans beaucoup de zones contre la désertification. En effet, selon la FAO, 45 000 hectares de forêts disparaissent chaque année causant environ 735 984 tonnes et 177 580 tonnes en 2017 de bois ont été coupés en milieu rural. Ce projet permettra alors une réduction de cette quantité. Toutefois, puisque nous ne pouvons pas empêcher la déforestation mais la valorisation des déchets organiques participera à la diminution de volume de déchets.



**Figure 3.2 :** Déforestation de la forêt casamançaise [27]

➤ Impacts négatifs du projet

Pour les impacts négatifs nous allons les identifier grâce à la matrice descriptive. Le tableau 3.5 suivant (Matrice descriptive) permet de les identifier de façon globale.

**Tableau 3.5 :** Effets négatifs entraînés par le projet

Sources des impacts	Environnements							
	Environnement Atmosphérique				Environnement Terrestre			
	Poussière	Bruit	Vibration	Fumée	Géologie, Sols	Végétation	Faune	Hommes
Conception des équipements	–	⊗	⊗	–	–	⊗	–	⊗
Aménagement du site	⊗	⊗	⊗		⊗	–	–	⊗
Exploitation de la plateforme biocombustible	⊗	⊗	–	⊗	⊗	⊗	–	⊗
Production de charbon par une personne X	⊗	⊗	–	⊗	⊗	⊗	–	⊗

Ce tableau 3.5 nous donne une vision globale sur les impacts nous expliquerons ci-dessous de façon claire ces impacts :

➤ Poussières

Lors des travaux d'aménagement, de l'exploitation des coques ainsi que la production du charbon, des émissions de poussières de natures diverses dans l'atmosphère pourraient survenir. L'émission de poussières sera la principale source de la pollution atmosphérique.

➤ Vibrations

Les principales vibrations émises lors de la conception et de l'aménagement sont dues aux matériels de soudures etc. Elles entraînent une gêne au niveau de l'homme, et cette gêne peut être plus importante quand la source de vibration est permanente.

➤ Le Bruit

La conception des équipements, l'aménagement du site et l'exploitation de la plateforme biocombustible sont des activités très bruyantes, du fait du choc entre les matériels de travail d'une part et le choc entre le sol et les équipements d'autre part. Les machines de conception sont elles-mêmes aussi très bruyantes.

➤ Émissions de gaz et pollutions de l'air (fumée)

Pour ce type d'activité, les émissions que l'on pourrait rencontrer sont essentiellement les produits de combustion et de carbonisation comme le CO, le CO<sub>2</sub> et les oxydes d'azote et de soufre provenant de la cheminée. Ces émissions sont sources de pollution atmosphérique.

➤ Impacts sur le sol

Le CNSL issu de la réaction de carbonisation se retrouve au sol polluant ainsi la surface du sol et peut s'infiltrer dans les couches superficielles du sol. En outre, les travaux, effectués à sol pendant la phase de construction, seraient à l'origine de la modification de la structure et de la texture du sol.

➤ Impacts sur les hommes

Les hommes sont parmi les êtres les plus exposés par ces différentes phases. Comme dans tout chantier, des risques de blessures pourraient survenir et, dans certaines conditions, des maladies respiratoires, des écrasements, des chocs, des gestes répétitifs, des mauvaises postures, etc.

En ce qui concerne les unités de transformation, les principaux aspects sur lesquels l'étude impacte environnementale devra s'attarder sont :

- Les eaux sales ;

- Les risques d'incendie (du fait de l'accumulation de coques et la présence d'une chaudière) ;

- Le versement incontrôlé des boues ou du CNSL dans la nappe peut entraîner des risques de pollution de la nappe. L'étude pourra néanmoins mettre en avant que ces risques soient, non

seulement maîtrisables, mais en principe largement compensés par les bénéfices environnementaux que la gestion des coques va entraîner.

- Les fumées pourront être traitées grâce à des systèmes de traitement des gaz, eux-mêmes fonctionnant avec de l'eau. De plus, si la combustion est efficace et à haute température dans le foyer, ces fumées sont normalement déjà propres et conformes aux normes en vigueur ;
- Les incendies pourront être contenus grâce à un système de lutte efficace que ce soit avec des extincteurs ou un réseau d'incendie armé ;
- Les cuves de CNSL pourront être entourées d'un bac de rétention en cas de fuite de celles-ci.

### **3.6. Étude technico-financière**

#### **3.6.1. Étude technique**

L'objectif de ce projet est de promouvoir le développement et l'application des technologies de valorisation énergétique des sous-produits des noix d'anacarde. On a décidé de mettre en place d'une part une technologie de production du charbon de coques d'anacarde par la méthode de carbonisation et d'autre part un système de production de chaleur et d'électricité pour l'unité de transformation.

Pour l'étude de faisabilité technique, nous allons mettre en place des hypothèses sur lesquelles on se basera pour la réussite du projet. Pour cela nous allons construire des carbonisateurs comme celui utilisé à l'université. Il s'agira aussi de la mise en place du système permettant la génération de chaleur et d'électricité spécifique.

##### **3.6.1.1. Dimensionnement de la plateforme pour le briquetage**

Les matériels dont nous aurons besoin dans un premier temps sont consignés dans le tableau 3.6 ci-dessous.

**Tableau 3.6 : Matériels de la plateforme de briquetage**

Désignation des matériels	Nombres
Réacteur de carbonisation	3
Balance pour la pesée	2
Deux sondes de température	2
Une brouette	1
Pelle	6
Seaux	2
Des équipements de protection	-
Presse électrique	1
Claies de séchages	5
Bassin	2
Tamis	2
Machine à broyer	1

Vue la fumée dérangeante de la réaction de carbonisation, l'espace destiné à ce carbonisateur doit être un lieu reculé et loin de toute habitation (ménage). Installé la plateforme à la périphérie de la ville de Ziguinchor serait donc une bonne alternative

La construction est constituée de 3 parties essentielles :

- l'espace réacteurs destiné à la carbonisation ;
- le Hangar pour le stockage et le briquetage ;
- le local servant de bureau.

Ainsi, le dimensionnement sera fait en fonction de la surface totale occupée par les équipements. Des schémas présentés, nous donnerons une représentation de la construction.

Pour l'espace de carbonisation nous avons prévu la place d'un réacteur de charbon. Le réacteur ou carbonisateur est un ensemble constitué d'un fût concentrique de diamètre avoisinant les 0,68 m servant à la production du charbon.

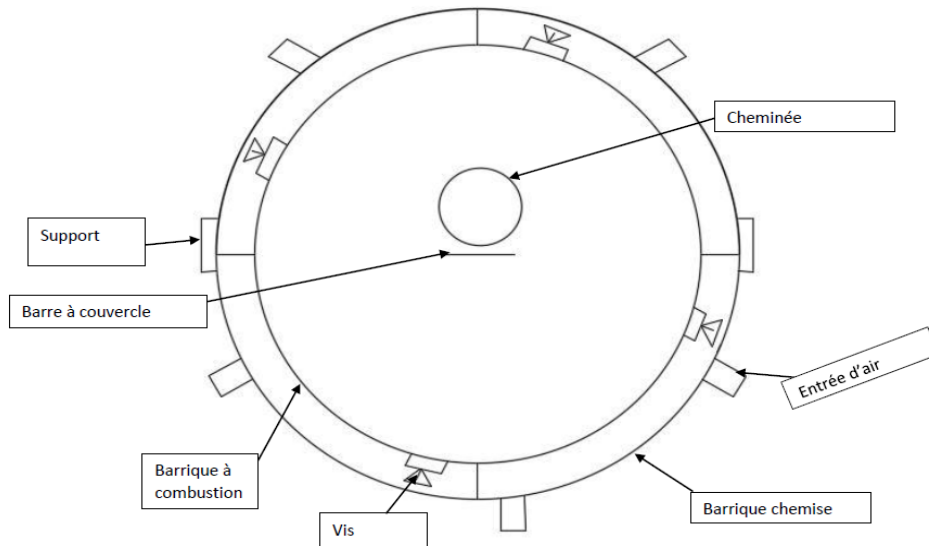
Pour faciliter le travail il faudra donc installer le réacteur dans un espace aéré. En effet, puisque le diamètre de la barrique du réacteur est 0,68 m nous allons considérer un espacement de 5 m de longueur et 4 m de largeur. De ce fait le lieu de la carbonisation aura comme superficie 20 m<sup>2</sup>. Ce choix ne suit pas une norme, il s'explique par des constats lors de la manutention de notre réacteur de carbonisation.

Un hangar de stockage de matière première, de dépôt de matériel de travail et servant pour le séchage et le briquetage du charbon sera construit à l'angle des murs de la cour. L'ensemble du hangar sera construit à une distance de 2 m de l'espace réacteur et dimensionné de telle sorte à contenir 50 sacs de 100 kg, deux claies de séchage de 1×1,2 m, une balance, deux seaux, une brouette et les équipements de protection. Les réacteurs de pyrolyse (carbonisateurs) de diamètre 1,2 m seront installés dans le hangar. Ils seront construits sur une superficie de 10,7\*3,8 soit sur une surface de 40,66 m<sup>2</sup> avec une hauteur de 4,5 m.

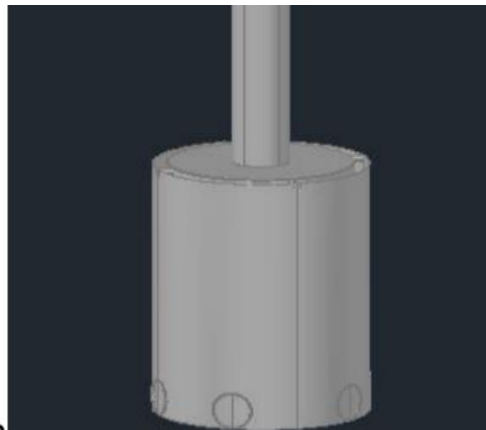
Donc l'espace englobant le réacteur et le hangar aura comme superficie de  $S=20 \text{ m}^2+40,66 \text{ m}^2$  d'où une superficie de 60,66 m<sup>2</sup>.

Les réacteurs seront conçus par des artisans locaux. Les caractéristiques du réacteur se présentent comme suit : une cheminée de hauteur 1,5 m, et de diamètre 0,59 m permet d'évacuer vers l'extérieur les gaz de combustion et de pyrolyse.

Les figures 3.4 & 3.5 présentent respectivement une vue de dessus et une vue en 3D de notre réacteur.



**Figure 3.3 :** Vue de dessus du réacteur à charbon



**Figure 3.3 :** Vue en 3D du réacteur à charbon

○ **Choix et dimensionnement de la presse**

Il existe deux types de presse (une électrique et une manuelle). Après quelques expériences de briquetage au labo (LCPM) nous avons opté pour une presse électrique. Ce choix a été fait en tenant compte du rendement des deux presses, de leurs manipulations et du coût de fabrication. On n'a jamais essayé la presse électrique mais d'après la littérature, celle manuelle est la plus accessible c'est donc ces critères qui ont guidés le choix de la presse manuelle. Cette presse sera fabriquée localement et aura les caractéristiques données dans le tableau 3.7 ci-dessous.

**Tableau 3.7 :** Caractéristiques de la presse

Type de manipulation	Quantité
Taille des briquettes en sortie (cm)	9
Diamètre de la briquette (cm)	4,5
Nombre de briquettes par opération	20
Nombre de briquettes à l'heure	240

○ **Choix et dimensionnement de la claie de séchage**

La claie sera également fabriquée localement à l'aide de grille métallique. Elle aura une dimension de (1×1,2 m). Elle se présentera sous la forme donnée par la figure 3.5.



**Figure 3.4 :** Présentation forme de la claie de séchage

Cette claie aura une capacité de séchage de 490 briquettes. A ces éléments ci-dessus s'ajoutera des matériels comme la balance, les sondes de températures, les seaux, la brouette, la pelle, le tamis, le mortier, le pilon ainsi que tous les équipements de protection. Il s'agit là des matériels à acheter directement sur le marché.

Des séances de formation sur la rentabilité financière ainsi que le respect des critères d'achat du charbon permettront une meilleure vulgarisation du produit.

### **3.6.1.2. Dimensionnement de la chaudière : système de cogénération**

Pour l'unité de transformation on a pris comme référence celle de Kolda. Ils ne produisent que de la chaleur et de vapeur pour la cuisson et le séchage des amandes. Donc pour parfaire ce système on va ajouter un système permettant de produire simultanée de l'électricité. Puisque Ethicajou utilise 5,6 MW d'électricité donc on va surestimer la quantité de production pour alimenter tout le bâtiment.

La centrale de cogénération est composée de trois parties différentes :

- une première partie comprenant toute l'activité liée à la réception, à la manipulation et au stockage des coques d'anacarde.
- une seconde partie comprenant l'activité liée à la valorisation des coques d'anacarde. Cette partie abritera la chaudière, le groupe turbo-alternateur et tous les équipements qui composent ce système.
- une troisième partie servant de bureaux

Pour pouvoir travailler dans de meilleures conditions il faut que le lieu soit aéré. Pour cela, il faudra louer un bâtiment gigantesque comportant trois parties qui pourra accueillir tout le matériel. L'ensemble chaudière plus four sera installé à une distance de 7m du bâtiment sur un espace de 20 m<sup>2</sup>.

En effet, l'installation comprendra :

- des installations de manutention des coques d'anacardes : le déchargement, le criblage, déferrailage ;
- un Chaudière pouvant utilisée 655 kg/J pour donner 35 % d'électricité et 55% de chaleur ;
- un groupe turbo-alternateur permettant un groupe turbo-alternateur permettant de produire 2.78 kWh d'électricité ;
- Ballon de stockage de vapeur.

### **3.6.2 Étude financière**

L'étude financière permet de vérifier la viabilité du projet à partir de tous les éléments que nous avons énumérés précédemment. Cette étude comme les autres étapes de la création d'entreprise, est un processus itératif qui permet progressivement de faire apparaître tous les besoins financiers du projet.

#### **3.6.2.1 Étude financière de la plateforme de briquetage**

##### **❖ Hypothèses de base**

Nous allons évaluer les coûts de fonctionnement du carbonisateur, unité de production de charbons. Nous déduirons ensuite le prix de revient d'un kilogramme de charbon, le seuil de rentabilité, la valeur actuelle nette (VAN) au bout de 5 ans de fonctionnement et le taux de rendement externe (TRE) qui est le critère utilisé par la filiale SFI de la banque mondiale pour l'évaluation des projets.

La durée de vie des matériels, le personnel et les charges mensuelles seront pris en compte. Pour atténuer les charges financières, le système de production des briquettes de charbons et l'unité de transformation seront installés dans un même endroit.

- Charges d'exploitations de la plateforme de briquetage

Le tableau 3.8 ci-dessous contient les charges durant l'exploitation. On a estimé le coût de chaque élément représenter à l'unité et durant toute l'année.



**Tableau 3.8 : Charges d'exploitation de la plateforme de briquetage**

Désignations	Nombre	Prix unitaire (FCFA)	Prix total (FCFA)/an
Logement	-	90 000	1 080 000
Coques d'anacarde	172 000 kg	10 FCFA/kg	1 720 000
Conducteur	1	40 000	480 000
Gardien	1	50 000	600 000
Ouvriers	5	60 000	3 600 000
Emballage	3000	75	450 000
Sac amidon	7	27 000	189 000
Coût de la maintenance	-	-	240 000
Électricité		20 000/mois	240 000
Coût carburant	-	100 000	1 611 000
Eau	-	-	500 000
<b>Total</b>			<b>10 485 000</b>

- Coût Investissement de la plateforme de briquetage

Le tableau 3.9 ci-dessous contient l'ensemble des matériels nécessaires pour le briquetage. C'est la somme requise pour réussir le bon déroulement des activités du briquetage.

**Tableau 3.9 : Coût d'investissement de la plateforme de briquetage**

Désignation	Quantité	Prix unitaire	Prix Total en Fcfa
Presse électrique	1	3 000 000	3 000 000
Machine à broyer	1	1 210 000	1 210 000
Carbonisateurs	3	35 000	105 000
Balance (50kg)	2	32 500	65 000
Moto Tricycle	1	1 335 700	1 335 700
Sonde	5	19800	99 000
Seau	10	1250	6 250
Tamis	4	1000	4 000
Table	2	10000	20 000
Chaise	6	6000	36 000
Pelle	6	2000	12 000
Brouette	2	30 303	80 000
Bassin	2	32 500	65 000
Claies	5	25 000	125 000
<b>Total</b>			<b>6 085 056</b>

- Coût global d'investissement

Pour pouvoir estimer ces paramètres énumérés ci-dessus sur 5 ans on se basera toujours sur des hypothèses. Donc vu les imprévus, et sur la base des cout estimatifs des éléments énumérés dans les tableaux 3.7 et 3.8 on estimera le coût du projet à 16 570 056 FCFA.

La production de charbon sera estimée à 65 tonnes par an.

- ✓ On en déduit donc le prix de vente d'un kilogramme charbon à partir de la charge d'exploitation et la quantité produite :

Cherchons d'abord le prix de vente :

$$PR = \frac{10\,485\,000 \text{ FCFA}}{65\,000 \text{ kg}} = 161,30 \text{ FCFA/kg} \quad (3.1)$$

En admettant une marge bénéficiaire au niveau de l'industrie de 139 Fcfa par kilogramme, le prix de vente du charbon sera de FCFA/kg ce qui est compétitif car le prix du charbon dans le marché varie entre 300 à 350 FCFA/kg.

- ✓ Calcul du seuil de rentabilité (SR) [28]

Il représente la quantité à produire pour que les recettes engendrées par le projet couvrent exactement les coûts encourus :

$$SR = \frac{CF}{P - CV} \quad \left\{ \begin{array}{l} CF: \text{Coûts fixes} \\ CV: \text{Coûts variables} \\ P: \text{Prix de vente} \end{array} \right. \quad (3.2)$$

Les coûts fixes sont obtenus en faisant la somme des frais de logement les salaires.

CF = 5 760 000 FCFA

P : 250 FCFA (prix de vente)

$$CV: \left\{ \begin{array}{l} \text{Matières premières : } 10 \text{ Fcfa / kg} \\ \text{Eau} = \frac{500\,000}{65\,000} = \frac{9 \text{ FCFA}}{\text{kg}} \\ \text{Emballage: } 75 \text{ Fcfa / kg} \\ \text{Maintenance} = \frac{240\,000}{65\,000} = 5,33 \text{ FCFA/ kg} \\ \text{Coût carburant} = \frac{1200000}{65\,000} = 18,46 \text{ FCFA} \\ \text{Amidon} = \frac{189\,000}{65\,000} = \frac{2,91 \text{ FCFA}}{\text{kg}} \\ \text{Electricité} = \frac{240\,000}{65\,000} = \frac{3,69 \text{ FCFA}}{\text{kg}} \end{array} \right. \quad (3.3)$$

$$SR = \frac{5\,760\,000}{300 - 124,39} = 32,80 \text{ tonnes} \quad (3.5)$$

On trouve ainsi un seuil de rentabilité qui est égale à 32,80 tonnes ce qui représente la quantité à partir de laquelle la production est rentable.

- Amortissement de l'investissement

Ce tableau 3.10 contient la dotation aux amortissements obtenue à l'aide du rapport entre le coût de chaque matériel et sa durée de vie. C'est donc une charge comptable qui permet de répartir le coût actif sur sa durée.

**Tableau 3.10 : Amortissement de l'investissement**

Matériels	Durée de vie	Dotation = (Coût du matériel/Durée de vie)
Presse électrique	5	100 000
Carbonisateurs	5	7 000
Balance	6	19583
Moto Tricycle	10	133 750
Sonde	2	9900
Seau	3	450
Tamis	1	1000
Table	5	2 000
Chaise	3	2 000
Pelle	2	1 000
Brouette	3	5 400
Bassin	2	1 625
Mortier	2	3000
Pilon	2	2000
Claies	4	2 500
<b>Coût total</b>		<b>291 208</b>

- Compte de résultat prévisionnel

**Tableau 3.11 : Compte de résultat prévisionnel**

Rubriques	AN 1	AN 2	AN 3	AN 4	AN 5
Chiffre d'affaires	19 500 000	19 800 000	20 400 000	20 700 000	21 000 000
Charge d'exploitation	8 965 000	8 976 340	9 000 000	9 036 000	9 140 000
Marge brute d'exploitation	10 535 000	10 823 660	11 400 000	11 664 000	11 860 000
Achats de fourniture et de consommables	99 000	105 000	111 500	127 500	135 500
Impôts et taxes	-	-	-	-	-
Valeur ajournée	10 254 00	10 718 660	11 288 500	11 537 000	11 725 000
Charges personnelles	4 648 800	4 900 500	5 152 200	5 300 500	5 409 000
Excédent brut d'exploitation (EBE)	5 605 000	5 818 160	6 136 300	6 236 500	6 316 000
Dotation aux amortissements	291 208	291 208	291 208	291 208	291 208
Résultat d'exploitation	5 314 792	5 526 952	5 845 092	5 945 292	6 024 792
Charges financières	-	-	-	-	-
Résultat avant impôt	5 314 792	5 526 952	5 845 092	5 945 292	6 024 792
Impôts sur le résultat (15%)	-	-	876 763	891 793	903 718
Résultat net	5 314 792	5 526 952	4 968 328	5 053 499	5 121 074
Dotation aux amortissements	291 208	291 208	291 208	291 208	291 208
Capacité de financement	5 023 584	5 235 744	4 677 120	4 762 291	482 986

Ce tableau 3.11 est un élément essentiel montrant ainsi la possibilité de réalisation du projet financièrement.

On voit que la marge brute sur matière est un indicateur clé dans l'analyse du compte de résultat. En effet, elle représente la marge obtenue après avoir comptabilisé les achats consommés des fournisseurs de marchandises et de matières premières.

L'excédent brut d'exploitation EBE, quant à elle, est la différence entre la valeur ajoutée et les charges du personnel. C'est aussi le paramètre le plus objectif de la rentabilité d'une entreprise. Il nous montre que le résultat d'exploitation est la différence entre le EBE et la dotation aux amortissements.

Nous voyons que le tableau de résultat prévisionnel sur cinq ans nous montre qu'il y'a toujours des gains malgré l'augmentation du prix de la matière première.

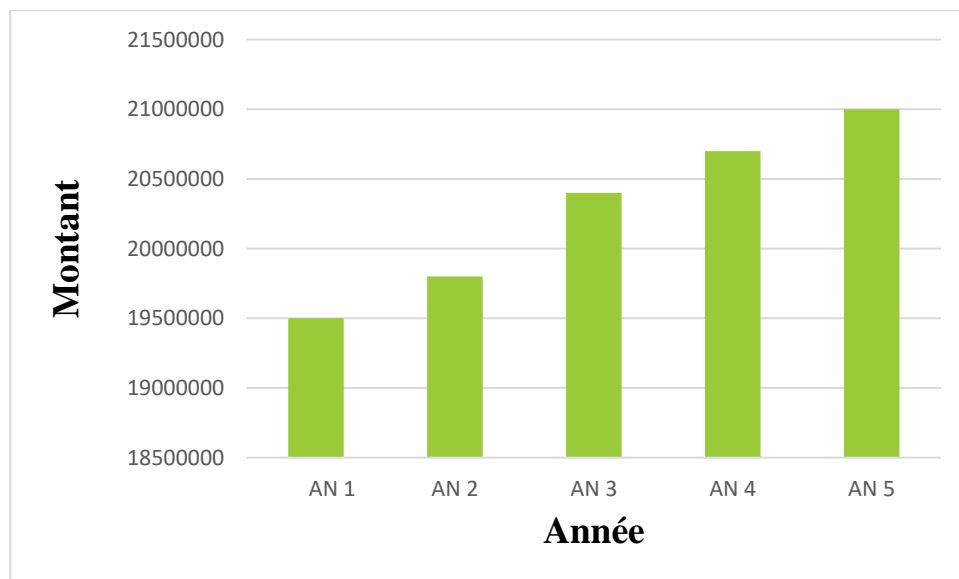
- Calcul de la valeur actuelle nette (VAN)

$$VAN = -I + \sum \text{Entrées nettes}(P_o/A, i\%, n) - \sum \text{Sorties nettes}(P_o/A, i\%, n) \quad (3.6)$$

$$VAN = 21\,365\,671 \text{ FCFA}$$

Ce critère d'évaluation nous montre également que le projet est rentable

Le diagramme de la figure 3.6 suivant présente en effet le seuil de rentabilité.



**Figure 3.5 :** Diagramme de l'évolution du chiffre d'affaires prévisionnel

On constate que l'évolution du chiffre d'affaires prévisionnel diffère d'une année à l'autre.

Vu cette croissance le projet restera toujours rentable même si le prix des coques augmente.

### 3.6.2.2 Étude financière du système de cogénération

Comme précédemment dans cette partie on se basera toujours sur des hypothèses pour faire l'étude financière.

- Charges d'exploitation du système de cogénération

Ce tableau 12 ci-dessous représente les charges annuelles du système de cogénération. Il prend en compte l'achat des gants et cache nez ainsi que tous les accessoires nécessaires pour les ouvriers. La somme totale représente donc les charges annuelles autrement l'argent destinée à l'achat des matériels et les éléments essentielles pour le fonctionnement comme l'eau.

**Tableau 3.12 : Charges d'exploitation du système de cogénération**

Désignations	Nombres	Prix unitaire (FCFA)	Prix total (FCFA)/an
Transports et Installations	-	-	5 400 000
Eau	-	-	3 100 000
Logement	1	150 000 /mois	1 800 000
Équipement pour le personnel	-	-	4 296 525
Coût de la maintenance	-	-	1 600 000FCFA
<b>Total</b>			<b>17 196 525</b>

- Charges des personnels du système de cogénération

Le tableau 3.13 ci-dessous contient l'ensembles des personnels. On aura besoin de deux techniciens qui ont trois années d'expérience et deux informaticiens pour la programmation des machines.

**Tableau 3.13 : Charges du personnel pour un système de cogénération**

Eléments	Nombre	Prix unitaire (FCFA)/mois	Montant (FCFA)/an
Techniciens	2	200 000	4 800 000
Ouvriers	10	50 000	3 000 000
<b>Total</b>			<b>7 800 000</b>

- Coût d'investissement du système de cogénération

Le tableau 3.14 ci-dessous contient l'ensemble des matériels pour la mise en place du système de cogénération. C'est le montant financier nécessaire pour mettre en œuvre ce système.

**Tableau 3.14 : Coût d'investissement du système de cogénération**

Désignation	Quantité	Prix Unitaire	Prix Total en Fcfa
Système four et chaudière installé à Kolda	-	5 850 000	5 850 000
Construction du silo	-	1 456 250	1 456 250
Ordinateurs	3	200 000	600 000
Distributeur de vapeur	1	257 556	257 556
Groupe turbo-alternateur (EMEAN POWER)	1	4 229 799	4 229 799
<b>Total</b>			<b>16 365 848</b>

L'investissement pour la réalisation de l'installation est de 41 362 373 FCFA. Autrement dit, ce nombre représente la somme requise pour la mise en place du système de cogénération.

### 3.7 Pilote de valorisation des coques d'anacarde

Le tableau 3.15 ci-dessous présente le projet de valorisation des coques.

**Tableau 3.15 : Pilote de valorisation des coques d'anacarde**

<b>MAITRE D'OUVRAGE</b>	Moussa Diop sous la supervision de Pr Ndiaye et Madame Ba
<b>STRUCTURE DE CONDUITE DU PROJET</b>	ANER et Université Assane SECK de Ziguinchor
<b>POINT FOCAL</b>	Ziguinchor
<b>CONTREXTE ET JUSTIFICATION DU PROJET</b>	
<p>Le Sénégal fait partie de l'un des pays africains producteurs et exportateur producteur des noix de cajou avec plus de 82 000 tonnes en 2021 générant ainsi un chiffre d'affaires de 54 milliards de francs CFA selon le président de l'ICAS, Boubacar KONTA et 100 000 tonnes selon le rapport publié le 13 octobre 2022 par le site 'SENEGAL EXPORT'. En conséquent, il fait partie des quinze pays producteurs au niveau mondial. Avec cette croissance de la production, le taux de transformation de ces sous-produits augmente d'année en année. Par exemple quand on prend le cas de la SCPL, la transformation est passée de 6 % en 2021 à 22 % en 2023 montrant le dynamisme du secteur insufflé par la politique sectorielle menée par l'unité de transformation dans cette filière.</p> <p>Ainsi, le Sénégal devient un pôle important dans l'industrie de l'anacarde avec une augmentation d'année en année d'unités industrielles, dont une bonne partie se sont installées à partir de 2019 à la faveur des mesures prises par le Gouvernement.</p> <p>La gestion des coques d'anacarde constitue une contrainte importante pour les transformateurs car elles peinent à trouver des lieux de stockage, ainsi que le gouvernement du Sénégal par ce qu'elles posent un problème réel d'environnement. Afin d'anticiper sur les risques environnementaux et profiter des énormes possibilités de valorisation de ces déchets, on a envisagé de mettre en place des méthodes de valorisation de coques dans la région de Ziguinchor.</p>	
<b>OBJET DU PROJET</b>	
Ce projet vise à valoriser les coques générées par la transformation des noix de cajou en briquettes de charbon et en combustibles pour la production de chaleur et /ou d'électricité.	
<b>COMPOSANTE DU PROJET</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Composante 1 : Valorisation des coques d'anacarde en combustibles en cogénération pour la production d'énergie et de chaleur.</li> <li>- Composante 2 : Valorisation des coques en briquettes de charbon pour la cuisson.</li> </ul>	
<b>COÛT ET DUREE DU PROJET</b>	
<b>Coût estimatif du projet : 57 932 429 FCFA</b>	
Ce montant prend en compte les travaux de construction et les équipements. Le coût de l'acquisition et de l'installation des équipements représente environ 40 % du coût global.	
<b>Durée du projet : La mise en œuvre du projet est prévue pour 1 an 2 mois.</b>	
Étapes de réalisation du projet	Conception, Réalisation et Exploitation à titre pilote d'un lieu de valorisation des coques de noix de cajou
Localisation du projet	Casamance (Ziguinchor)
Nombre d'emplois directs prévisionnels	Au moins 50 emplois directs créés

## **Conclusion**

Bien vrai que le rendement est un peu plus élevé pour le cas d'Ethicajou mais on note des pertes dues à des raisons énumérées ci-dessus. Ces pertes ont une influence non négligeable sur le fonctionnement de la chaudière. Pour le cas de la SCPL, bien vrai que le rendement est élevé mais il existe des pertes qui s'opère lors du fonctionnement du gazéificateur. Ces pertes proviendraient des purges, les parois, les fumées mais peut être à un mauvais fonctionnement du gazéificateur. Pour augmenter les performances énergétiques des deux engins utilisés, il faut corriger ces anomalies.

La réalisation d'un projet ne sera parfaite que lorsque l'on étudie sa faisabilité. Dans ce chapitre, on a montré clairement la quintessence de l'implantation du projet.

A l'issue de ce chapitre, on dispose de toutes les étapes d'exécution pour la mise en œuvre du projet. Toutefois, cette mise en œuvre ne peut être effective sans établir une étude économique. En ce sens nous avons réalisé un devis quantitatif et estimatif nous permettant d'évaluer le coût d'exécution. Après avoir menée cette étude économique, nous constatons qu'il s'agit là d'un projet rentable et viable, cela peut donc être une piste à explorer.

## Conclusion générale et Perspectives

L'utilisation des coques de cajou comme combustibles se présente comme une excellente option si toutefois les conditions d'usages sont respectées. Car force est de constater que le nombre d'unités de transformation ne cesse d'augmenter engendrant ainsi chaque jour une production incommensurable de résidus de coques d'anacarde. Elles sont des fois jetées à l'air libre impactant négativement sur l'environnement. Hormis cet aspect environnemental, elles sont très performantes en termes d'énergie, peu coûteuses et très prometteuses ce qui n'est le cas des autres biomasses comme le bois. Ce travail s'inscrit dans un double contexte. Le premier étant celui de valoriser les coques d'anacarde en briquettes de charbon pour les ménages, et le second est de déterminer les performances énergétiques des coques d'anacarde afin de proposer des méthodes beaucoup plus adéquates que celles utilisées par les unités de transformation rencontrées.

Les résultats obtenus nous ont permis de tirer les conclusions suivantes

- En termes de caractérisation

Les échantillons collectés à la SCPL et à Ethicajou présentent une humidité légèrement différente mais très élevée par rapport aux autres biomasses trouvées dans la littérature comme la balle de riz, les tiges de mil et de maïs ce qui leur confère une valeur importante de leur PCI. Ces derniers comportent un bon potentiel de valorisation vu leurs disponibilités en Basse Casamance. Ils ont une masse volumique apparente très différente mais élevée, ce qui leur confère donc une densité énergétique élevée. On note une légère différence en taux de cendres, de matières volatiles les et en carbone fixe des deux échantillons collectés et sont élevés en comparaison avec les autres biomasses.

- En termes de bilan énergétique

Le rendement de la chaudière installée à Ethicajou est faible car hormis les pertes occasionnelles, il y a une partie importante de coques transformées en charbons. Quant au gazéificateur, le rendement s'explique du fait que ce dernier est défectueux ; en effet, l'énergie perdue est supérieure à celle consommée par le gazéificateur.

Il serait intéressant donc de faire la combustion directe est non un système post-combustion pour que toute l'énergie parvienne à la chaudière pour rendre beaucoup plus efficace la chaudière. Pour le gazéificateur, il faudra revoir son état ou le remplacer pour obtenir un meilleur rendement.

Donc on peut noter que la production de vapeur est d'autant plus importante que lorsque la consommation des coques est élevée.



Vue la performance de la technologie installée à Ethicajou, on a décidé de la prendre comme référence afin de proposer une méthode de valorisation plus efficace. En effet, on a proposé un système de cogénération qui jouera un double rôle à savoir cuisson, séchage et production d'électricité pour l'unité de transformation et une plateforme pour la production de biochar pour les ménages.

L'analyse de faisabilité d'un projet vise à évaluer sa viabilité et les répercussions organisationnelles et économiques qu'elle peut entraîner. Notre projet est faisable du fait qu'il est rentable. Cela peut s'expliquer aussi du fait que la matière première est disponible en grande quantité dans les unités de transformation.

En perspective, eu vue d'apporter des rénovations, il serait important d'effectuer d'autres études sur ces coques d'anacarde :

- Pour une récupération du CNSL à des fins économiques (carburant, industrie aéronautique) ;
- Effectuer une étude des paramètres clés permettant la réalisation d'une unité de carbonisation autonome et performante ;
- Monter un pilote de valorisation des coques pour la production de chaleur et d'électricité (cogénération).

## **Référence bibliographique**

- [1] M. Athanase DIATTA « effet de l'apiculture sur les plantations d'anacardiens (*Anacardium occidentale* L.) dans les régions de Kolda et Sédhiou au sud du Sénégal » Université Assane Seck de Ziguinchor 2020. Consulté le : 22 juillet 2023. Disponible sur : [https://rivières.du.sud.uz.sn/bitstream/handle/123456789/1659/diatta\\_m%C3%A9moire\\_2022.pdf?séquence=1&isAllowed=y](https://rivières.du.sud.uz.sn/bitstream/handle/123456789/1659/diatta_m%C3%A9moire_2022.pdf?séquence=1&isAllowed=y)
- [2] S. Ndiaye, M. M. Charahabil, et M. Diatta, « Caractéristiques des plantations d'anacardiens (*Anacardium occidentale* L.) et déterminants économiques des exploitations en Casamance », *vertigo*, Université Assane Seck de Ziguinchor février 2021, doi : 10.4000/vertigo.28723.
- [3] Bulletin sur le marché de l'anacarde « rapport annuel sur la répartition de la production d'anacarde » 2023. Consulté le : 24 septembre 2024. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.N'kalo.com>
- [4] G. A. Diédhiou, « Instrumentation et mesures de température, des émissions de CO et de particules de matière (PM) dans un générateur d'air chaud à biomasse ». Mémoire de master, Université Assane Seck de Ziguinchor, 2021
- [5] Florentino NANQUE, Kate KAMBA « rapport annuel sur l'anacarde du 11e Conférence Annuelle du Cajou de l'ACA » Cotonou, Bénin 18-21 septembre, 2017. Consulté le : 22 juillet 2023. Disponiblesur <https://www.AfricanCashewAlliance.com/sites/default/files/documents/aca-annual-report-2016-fr.pdf>
- [6] S. Cheikh Omar, F. Elhadji, D. Mamadou, S. Diaminatou, S. Samba Arona Ndiaye, et K. Bothié, « Dynamique spatio-temporelle des plantations d'anacardier (*Anacardium occidentale* L.) dans deux zones agroécologiques du Sénégal ». Janvier 2018.
- [7] S. Ndiaye, M. M. Charahabil, et M. Diatta, « Evaluation De La Qualité Des Noix Brutes D'anacarde En Casamance (Sénégal) » Université Assane Seck de Ziguinchor, *ESJ*, vol. 16, n° 6, févr. 2020, doi : 10.19044/2020.v16n6p374.
- [8] T. Godjo, J.-P. Tagutchou, P. Naquin, et R. Gourdon, « Valorisation des coques d'anacarde par pyrolyse au Bénin », *Environnement, Ingénierie & Développement*, vol. N°70-novembre 2015, p. 7801, janv. 2015, doi : 10.4267/dechets-sciences-techniques.3282.
- [9] Rapport du CEFREPAD, RONGEAD et le centre d'études économiques et sociales de l'Afrique de l'Ouest sur un four de pyrolyse à coques de cajou « fiche\_produit\_proto\_vf\_25.09.12.pdf » Aout 2012, Burkina Faso. Consulté le : 26 juillet 2023. [En ligne]. Disponible sur : [https://www.nitidae.org/files/f2d2d91a/fiche\\_produit\\_proto\\_vf\\_25.09.12.pdf](https://www.nitidae.org/files/f2d2d91a/fiche_produit_proto_vf_25.09.12.pdf)
- [10] Rapport de l'union Européenne sur l'aviation « Étude de faisabilité sur le développement de carburants d'aviation durables ». [En ligne]. Disponible sur : [https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/FeasibilityStudy\\_BurkinaFasoReportFR-Final-Web-v2.pdf](https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/FeasibilityStudy_BurkinaFasoReportFR-Final-Web-v2.pdf). Mémoire Joanna. Marie. Delphine LOMPO, 2007-2008
- [11] TRAORE Issouf « EFFETS DU COMPOST À BASE DES COQUES D'ANACARDE SUR LES PARAMÈTRES VÉGÉTATIFS ET Le rendement DU COTONNIER DANS LES CONDITIONS DE CULTURE BIOLOGIQUE » Consulté le : 28 juillet 2023 Disponible sur : <https://beep.ird.fr/collect/upb/index/assoc/IDR-2017-TRA-EFF/IDR-2017-TRA-EFF.pdf>
- [12] Professeur NDIAGA Lat Grand « COURS\_Technologies\_biomasse\_ChapitreIII.pdf ». Université Assane Seck de Ziguinchor, 2022
- [13] ABBO K. Hervé « Fabrication de briquettes de poussière de charbon et étude des performances énergétiques des briquettes en fonction du pourcentage d'argile d'argile » UNIVERSITÉ D'ABOMEY-CALAVI(UAC), 2010. Consulté le : 4 avril 2023. Disponible sur : [http://biblionumeric.org:8080/jspui/bitstream/123456789/2493/1/MC3%A9moire%20ABBO%20Herv%C3%A9\\_compressed.pdf](http://biblionumeric.org:8080/jspui/bitstream/123456789/2493/1/MC3%A9moire%20ABBO%20Herv%C3%A9_compressed.pdf)
- [14] G. Vaitilingom, « Mécanismes fondamentaux en thermochimie de la biomasse ». Université Perpignan, [www.canal-u.tv/chaines/canal-ued/la-biomasse/2-mecanismes-fondamentaux-en-thermochimie-de-la-biomasse](http://www.canal-u.tv/chaines/canal-ued/la-biomasse/2-mecanismes-fondamentaux-en-thermochimie-de-la-biomasse) 03.02.2015
- [15] Ndeye Gnagna NDIAYE « Essais de conception d'un réacteur de carbonisation hydrothermale (HTC) à l'Université Assane Seck de Ziguinchor dans le cadre du projet BIO4AFRICA ». Consulté le : 5 août 2023.

- [En ligne]. Disponible sur : [https://rivièresdusudUasz.sn/bitstream/handle/123456789/1773/Ndiaye\\_mémoire\\_2023.pdf?séquence=1&isAllowed=y](https://rivièresdusudUasz.sn/bitstream/handle/123456789/1773/Ndiaye_mémoire_2023.pdf?séquence=1&isAllowed=y)
- [16] Nina Garstea « Optimisation des conditions opératoires ». *Journal of Engineering Science & Technologie Review*, 2024. Université technique de Moldova, vol. 17, no 2.
- [17] Assane BAMOGO, Simon VILLARD, Julia ARTIGAS SANCHO « Rapport intermédiaire étude de faisabilité de valorisation de la coque de noix de cajou au Burkina faso.pdf ». Consulté le : 15 mai 2023. Disponible sur : <https://www.Nitidae.Org/files/820c2ed1>
- [18] I. Aguirre, T. Griessacher, G. Rösler, et J. Antrekowitsch, « Production of charcoal as an alternative reducing agent from agricultural residues using a semi-continuous semi-pilot scale pyrolysis screw reactor », *Fuel Processing Technology*, vol. 106, p. 114-121, févr. 2013, doi: 10.1016/j.fuproc.2012.07.010.
- [19] N. Pascal, T. Jean-Philippe, P. Romain, J. Margaux, et P. Etienne, « Valoriser les coques d’anacarde en charbon » publié dans le magazine de Bioénergie Internationale numéro 25, mai 2013.
- [20] J. P. Tagutchou et P. Naquin, « Caractérisation et traitement thermochimique des coques d’anacarde en vue de leur valorisation énergétique dans les procédés de transformation artisanale de noix de cajou », *Environnement, Ingénierie & Développement*, vol. N°62-Novembre 2012, p. 7851, nov. 2012, doi : 10.4267/dechets-sciences-techniques.2722.
- [21] T. BIAYE, « Mesures en laboratoire des émissions et des performances des foyers de cuisson utilisant des briquettes de charbon de biomasse. » Université Assane Seck de Ziguinchor, Juillet 2023. Consulté le : 03 juin 2023
- [22] D. R. Nhuchhen, « Prediction of carbon, hydrogen, and oxygen compositions of raw and torrefied biomass using proximate analysis », *Fuel*, vol. 180, p. 348-356, sept. 2016, doi: 10.1016/j.fuel.2016.04.058.
- [23] P. B. Himbane *et al.*, « Influence of binder rate, pyrolysis temperature and volume of biochar briquettes on CO and PM2.5 emission factors and thermal efficiency », *Energy for Sustainable Development*, vol. 68, p. 525-531, juin 2022, doi: 10.1016/j.esd.2022.04.012.
- [24] Ousmane KAO « Diagnostic du système de contrôle de la température du gazéificateur de la SCPL, SA ». Université Assane Seck de Ziguinchor. Consulté le : 28 août 202. Disponible sur : <https://rivièresdusud.uasz.sn/bitstream/handle/123456789/1773/>. Université Assane Seck de Ziguinchor
- [25] M. A. Mami, « Etude expérimentale et modélisation de la combustion de biocombustibles solides issus de la biomasse lignocellulosique sur lit fixe. », 2021, doi : 10.13140/RG.2.2.19087.71841.
- [26] Abaque de la pression des vapeurs « bs\_p\_090\_steam\_pressure\_table\_water\_fr.pdf ». Consulté le : 27 novembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.gemu-group.com/gemucdn2/document/29/bs\\_p\\_090\\_steam\\_pressure\\_table\\_water\\_fr.pdf](https://www.gemu-group.com/gemucdn2/document/29/bs_p_090_steam_pressure_table_water_fr.pdf)
- [27] N. Cheikh Bamba, documentation sur la disparition de certaines espèces au Sénégal « Les forêts au Sénégal : une espèce en voie de disparition avancée », août 2021.
- [28] Patrick D.E MFOUAPON « ETUDE DE FAISABILITE D'UNE UNITE DE PRODUCTION DE CHARBON VERT », mémoire de master, université Cheik Anta DIOP de Dakar, 2007