



UFR SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Département de Physique

Mémoire de Master

Mention : Physique et Applications

Spécialité : Physique des Matériaux

Sujet : Étude de la production d'énergies à partir des coques d'arachide : le cas de la SONACOS de Ziguinchor

Présenté par

Mme Diarra DIABY

Sous la direction de

Dr Lat. Grand NDIAYE

Directeur de stage

Mr Mamadou NIANG

Soutenu publiquement le 30 avril 2018 devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Qualité	Établissement
SOW Bamol Ali	Maître de conférences	Président de jury	UASZ
KOBOR Diouma	Maître de conférences	Rapporteur	UASZ
DRAME Pape Elimane	Technicien supérieur	Examineur	SCPL
LO Mamadou	Assistant	Examineur	UASZ
NIANG Mamadou	Ingénieur	Maître de stage	SONACOS
NDIAYE Lat Grand	Maître de conférences	Directeur mémoire	UASZ

DÉDICACES

Je rends grâce à DIEU le TOUT PUISSANT de m’avoir permis d’achever ce travail

Je dédie ce travail :

À mon époux Mamadou Keita AIDARA, Le monde entier ne saurait contenir les remerciements venant du fond de mon cœur. Reçois en ce travail mon, cher époux, l’expression de ma reconnaissance pour ton amour, ton soutien, ta compréhension et ta patience.

À mes professeurs,

À mes chers parents, Fatoumata Mama SYLLA et Lamine DIABY, à mes tantes Fatoumata KEITA, Moussou SYLLA, Mame SYLLA,

À mes chères filles Maimouna et Safiétou Mya AIDARA,

À ma belle-mère Aissatou Barro, à toute la famille AIDARA, DIABY et SYLLA, BARRO particulièrement Tonton Ibou et Bouba.

À mes amies, frères et sœurs : Mme NDIAYE Ndèye Fatou Niang, Halimatou Diallo, Ibrahima, Youssouph, Mohamed, Cheikh, El hadj, Brouhane DIABY, Diénaba, Khady, Khadidiatou, Fatima DIABY.

À mes belles-sœurs, beaux-frères, Cousines, Cousins, Neveux et Nièces : Moustapha, Aramata, Aicha, Fatoumata et les jumeaux Mohamed et Ndèye Sanou,

À tous mes camarades de promotion et tous ceux qui m’ont soutenu tout au long de ce travail.

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mon encadreur Dr Lat Grand NDIAYE de m'avoir fait confiance pour ce travail de mémoire. Je vous remercie fort pour votre disponibilité, votre professionnalisme, vos encouragements et conseils très utiles, votre soutien tout au long de ce travail.

Je souhaite remercier Mr Sény BODIAN le Directeur de la Sonacos de Ziguinchor de m'avoir accordé ce stage. Je remercie Mr Mamadou NIANG mon maître de stage pour ses encouragements. Un grand merci à Mouhamadou Y. DIALLO pour votre soutien.

Je remercie Dr Bamol Ali SOW qui a accepté d'évaluer mon mémoire et de présider mon jury.

J'adresse mes sincères remerciements à Dr Diouma KOBOR pour avoir accepté de rapporter mon travail.

Je remercie sincèrement Mr Elimane DRAME et Mr LO qui ont accepté d'examiner mon travail.

J'exprime également mes sincères gratitude envers les différents enseignants chercheurs de la filière MPC1, particulièrement ceux du département de Physique pour la qualité de leurs enseignements.

J'adresse mes sincères remerciements à tous les étudiants de master et les doctorants, particulièrement à Mr Philippe HIMBANE pour son soutien précieux.

Je remercie Mr YOCK, le technicien du laboratoire de Physique pour les aides apportés lors de mes études expérimentales.

Je tiens également à remercier tout le personnel de la Sonacos pour leur disponibilité de répondre à mes questions.

Mention spéciale mon époux, qui a toujours été là pour moi, qui m'a soutenu tout au long de mes études.

Je ne saurais terminer sans remercier ma famille qui n'a jamais cessé de m'encourager.

Résumé

Dans un contexte économique assez dur et concurrentiel, la SONACOS est aujourd'hui contrainte d'adopter une stratégie en matière de développement durable pour rester compétitive et rentable. La maîtrise de la consommation énergétique fait partie des défis majeurs auxquels la société doit faire face pour réduire sensiblement ses coûts de production et assurer son fonctionnement et sa pérennité. Au regard de l'augmentation de la demande énergétique de l'entreprise et une forte demande en ressource fossile et pour des raisons environnementales, la filière biomasse paraît être une alternative pour la production d'énergie propre et durable. La production d'énergie (chaleur et électricité) à partir des résidus de la biomasse est en plein essor et atteint une maturité préindustrielle remarquable en termes de recherche, de développement et d'innovation. L'objectif de ce travail est d'une part, de connaître le processus de la production de la chaleur à partir des coques d'arachides par le biais de la chaudière Duquenne de la SONACOS et d'autre part de comparer quelques paramètres physiques et thermo-physiques des coques d'arachide, de palmistes et d'anacarde. Les voies et les procédés utilisés pour produire de l'énergie à partir de la biomasse (coques d'arachide, de palmistes et d'anacarde) dépendent de la nature, des propriétés de la matière première et de l'usage recherché. En général les voies thermo-chimiques (combustion, gazéification et carbonisation) sont les méthodes les plus utilisées pour la valorisation de déchets. À la SONACOS, la chaudière est l'élément clé pour la production de vapeur et d'électricité. Cette chaudière a une puissance nominale de 5 MW_{el}, et un débit 4,25 T/h de combustibles soit une production de 21,25 T/h de vapeur à une pression 25 bars et une température de 370 °C. Dans une première partie, nous avons déterminé les rendements sur PCI des coques d'arachide, de palmistes et d'anacarde afin de mieux connaître la rentabilité de la chaudière. La détermination du PCI montre que toutes les trois types de coques ont un bon PCI, mais cette valeur reste plus importante chez la coque d'anacarde. L'étude de caractérisation indique que la coque d'anacarde présente un taux élevé d'humidité. Cette caractérisation des coques nous a permis également d'obtenir des résultats qui pourraient être appliqués dans la conception, l'innovation des équipements mixtes adaptés à la valorisation de tous ces déchets, mais aussi d'augmenter la performance des équipements.

Mots clés : Coques, arachide, palmiste, anacarde, chaudière, énergie.

Abstract

In an economic context enough tough and competitive, SONACOS is now forced to adopt a sustainable development strategy to remain competitive and profitable. The mastery of energy consumption is one of the major challenges that society must face to significantly reduce its production costs and ensure its operation and sustainability. Given the increase in the company's energy demand and a high demand for fossil fuels and for environmental reasons, the biomass sector seems to be an alternative for the production of clean and sustainable energy. The production of energy (heat and electricity) from biomass residues is booming and attains remarkable pre-industrial maturity in terms of research, development and innovation. The objective of this work is, firstly, to know the process of heat production from peanut shells through the Duquenne boiler and secondly to compare some physical and thermo-physical parameters of peanut shells, palm kernels and cashew nuts. The pathways and processes used to produce energy from biomass (peanut hulls, palm kernels and cashew nuts) depend on the nature, properties of the raw material and the desired use. In general, thermochemical pathways (combustion, gasification and carbonization) are the most widely used methods for waste recovery. At SONACOS, the boiler is the key element for the production of steam and electricity. This boiler has a nominal power of 5 MW_{El}, delivers 4.25 T/h of fuels or a production of 21.25 T/h of steam at a pressure of 25 bars and a temperature of 370 °C. In a first part, we determined the yields in terms of PCI peanut shells, palm kernels and cashew nuts in order to better know the profitability of the boiler. This PCI determination shows that all three types of hulls have good PCI, but this value is much higher in the cashew hull. The characterization study indicates that the cashew shell has a high moisture content. This characterization of hulls has also allowed us to obtain results that could be applied in the design, innovation of mixed equipment adapted to the recovery of all these wastes, but also to increase the performance of equipment.

Key words: hulls, peanut, palm kernel, cashew, boiler, energy.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1 : PRESENTATION DE LA SOCIETE SONACOS	3
INTRODUCTION.....	4
1.1 HISTORIQUE ET ORGANIGRAMME DE LA SONACOS.....	4
<i>1.1.1 Historique</i>	<i>4</i>
<i>1.1.2 Organigramme</i>	<i>5</i>
<i>1.1.3 Process et schéma de production de la SONACOS.....</i>	<i>6</i>
1.2 CHAUDIERES A COMBUSTIBLES.....	8
<i>1.2.1 Généralités</i>	<i>8</i>
<i>1.2.2 Types de chaudières à combustibles.....</i>	<i>9</i>
<i>1.2.2.1 Chaudière à tubes de fumées.....</i>	<i>9</i>
<i>1.2.2.2 Chaudière à tubes d'eau</i>	<i>10</i>
<i>1.2.2.3 Comparaison des performances.....</i>	<i>11</i>
CONCLUSION.....	12
CHAPITRE 2 : PRESENTATION ET CARACTERISATION DES DIFFERENTS RESIDUS	14
INTRODUCTION	15
2.1 PRESENTATION DES DIFFERENTS RESIDUS DE LA CASAMANCE	15
<i>2.1.1 Les coques d'arachide.....</i>	<i>15</i>
<i>2.2.2 Les coques de palmistes</i>	<i>17</i>
<i>2.2.3 Les coques d'anacarde.....</i>	<i>18</i>
2.2 CARACTERISATIONS DES PROPRIETES PHYSIQUES ET THERMO-PHYSIQUES DES DIFFERENTS RESIDUS	20
<i>2.2.1 Masse volumique apparente des différents résidus</i>	<i>20</i>
<i>2.2.2 Analyse élémentaire des résidus.....</i>	<i>21</i>
<i>2.2.3 Analyse immédiate des résidus</i>	<i>22</i>
<i>2.2.3.1 Indice de matières volatiles.....</i>	<i>22</i>
<i>2.2.3.2 La teneur en cendres</i>	<i>22</i>
<i>2.2.3.3 le taux de carbone fixe</i>	<i>23</i>
<i>2.2.4 L'humidité</i>	<i>24</i>
<i>2.2.5 Le pouvoir calorifique</i>	<i>26</i>
<i>2.2.6 Capacité thermique massique.....</i>	<i>27</i>
<i>2.2.7 Conductivité thermique</i>	<i>28</i>
CONCLUSION.....	29
CHAPITRE 3 : BILANS MASSIQUE ET ENERGETIQUE DE LA CHAUDIERE DUQUENNE	31
INTRODUCTION	32
3.1 PRESENTATION GENERALE	32
<i>3.1.1 Description de la chaudière duquenne.....</i>	<i>32</i>
<i>3.1.2 Caractéristiques de la chaudière duquenne</i>	<i>36</i>
<i>3.1.3 Le turboalternateur</i>	<i>37</i>
3.2. BILAN DE L'INSTALLATION.....	39
<i>3.2.1 Le bilan massique.....</i>	<i>39</i>
<i>3.2.2 Le bilan thermique et énergétique.....</i>	<i>43</i>
<i>3.2.2.1 La combustion.....</i>	<i>43</i>
<i>3.3.2.2 Le bilan énergétique et thermique.....</i>	<i>48</i>
CONCLUSION.....	54
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	55

Abréviations

AIE	Agence international de l'énergie	-
GES	Gaz à effet de serre	-
HBA	Huile brute d'arachide	-
Mtep	Mégatonne équivalent pétrole	-
H	Humidité	-
H _b	Humidité sur brute	-
H _s	Humidité sur sèche	-
PC	Pouvoir calorifique	kJ/kg
PCS	Pouvoir calorifique supérieur	kJ/kg
PCI	Pouvoir calorifique inférieur	kJ/kg
D _c	Débit combustible	T/h
Q _v	Débit vapeur	T/h
V _a	Pouvoir comburivore	Nm ³ /kg
V _{FH}	Pouvoir fumigène humide	Nm ³ /kg
V _{FS}	Pouvoir fumigène sèche	Nm ³ /kg
M _c	Masse molaire moléculaire du combustible	g/mol
F _e	Fraction d'eau	-
F _i	Fraction d'incombustible	-
F _{Ce}	Fraction de cendre	-
X	Coefficient du combustible	-
E	Fraction de l'excès d'air	-
C _p	Capacité massique de l'eau	J kg /K
C _{pv}	Capacité massique de la vapeur	J.kg /K
L _v	Chaleur latente	kJ/kg
P _a	Puissance absorbée	kW
P _v	Quantité de vapeur	T
P _E	Quantité d'électricité	KWh
P _u	Puissance utile	kW
γ _{CO2}	La teneur en CO ₂	-
η	Rendement chaudière	-

P_m	Puissance moyenne	kW
P_E	Puissance électrique	kWh

Liste des tables et figures

Liste des tables

Tableau 1.1 : Comparaison des performances des deux types de chaudières [5]	122
Tableau 2.1 : La masse volumique apparente des résidus.....	21
Tableau 2.2 : Analyse élémentaire des différents résidus	21
Tableau 2.3 : Analyse immédiate des différents résidus	23
Tableau 2.4 : Taux d'humidité sur base brute des résidus	25
Tableau 2.5 : Humidité sur base sèche des résidus	25
Tableau 2.6 : Les propriétés thermo-physiques des résidus.....	29
Tableau 3.1 : Caractéristiques de la chaudière Duquenne (cas des coques d'arachide)	36
Tableau 3.2 : Les caractéristiques techniques du turbo-alternateur	38
Tableau 3.3 : Définitions et unités de quelques paramètres utilisés.....	40
Tableau 3.4 : Récapitulatif des résultats du bilan massique de la chaudière Duquenne	42
Tableau 3.5 : Les Proportions massique et volumique de l'air comburant	45
Tableau 3.6 : Les pouvoirs comburivore et fumigène des résidus	46
Tableau 3.7 : Comparaison de quelques paramètres des résidus	48
Tableau 3.8 : Définitions des paramètres utilisés pour le calcul de la puissance utile.....	50
Tableau 3.9 : Définitions et résultats des différentes pertes [17]	51
Tableau 3.10 : Comparaison des résultats en terme énergétique des résidus.....	53

Liste des figures

Figure 1.1 : Organigramme de la SONACOS,(EIZ).)	6
Figure 1.2 : Schéma de production de la SONACOS, (EIZ)	7
Figure 1.3 : Photos des produits de la SONACOS.....	8
Figure 1.4 : Chaudière à tubes de fumées [4].....	10
Figure 1.5 : Chaudière à tubes d'eau [4]	11
Figure 2.1 : Évolution de la quantité d'arachide réceptionnée en tonne par la Sonacos.....	16
Figure 2.2 : Évolution de la disponibilité des coques d'arachides en tonnes à la Sonacos.....	17
Figure 2.3 : Évolution des quantités de coques d'arachides importées en tonnes à la Sonacos	17
Figure 2.4 : Photo de coques de palmistes	18
Figure 2.5 : Évolution de la disponibilité des coques de palmiste en tonnes au Sénégal	18
Figure 2.6 : Photo de coques d'anacarde.....	19
Figure 2.7 : Évolution de la disponibilité des coques d'anacarde tonnes au Sénégal	20

Figure 2.8 : Evolution du PCI des différents combustibles.....	26
Figure 3.1 : Schéma simplifié de la chaudière Duquenne de la SONACOS	35
Figure 3.2 : Photo de la chaudière Duquenne	36
Figure 3.3 : Principe de production d'électricité.....	38
Figure 3.4 : Photo du turbo-alternateur	39
Figure 3.5 : Bilan thermique du système chaudière Duquenne.....	49
Figure 3.6 : Résumé de l'évaluation des pertes de la chaudière Duquenne	52

Introduction générale

Depuis la révolution industrielle, la consommation énergétique mondiale n'a pas cessé d'augmenter. Elle a progressé de plus de 90 % de 1975 à 2015. Selon l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE ou IEA en anglais) la consommation finale énergétique mondiale est passée de 4 672 Mtep en 1973 à 9 384 Mtep en 2015 avec 29 % pour la part des industries. Cette consommation pourrait augmenter d'un tiers à l'horizon 2040 (12 538 Mtep). Selon le même rapport, sur les perspectives, l'augmentation de la demande énergétique sera de l'ordre de 30 % à l'horizon 2040 (IEA, 2016). Par ailleurs en 2012, plus des deux tiers de la consommation énergétique mondiale est attribuée aux énergies fossiles avec (40,7 % en pétrole, 15,2 % en gaz naturel et 15,2 % en charbon) [1]. Selon certaines estimations, si le rythme d'exploitation ne change pas, les réserves prouvées de pétrole correspondraient à une cinquantaine d'années de production. Pour continuer à satisfaire les besoins énergétiques mondiaux en général et industriels en particulier, le recours à des sources d'énergies renouvelables s'avère indispensable afin de préserver l'environnement. En raison de ses gisements importants, la filière biomasse est une voie prometteuse. Ainsi, l'AIE projette que d'ici 20 ans toute énergie consommée par l'humanité sera produite ou originaire des sources renouvelables, cette dernière est d'environ 14 % d'énergie produite dans le monde, avec 11,4 % de la part de la biomasse.

La biomasse est la fraction biodégradable des produits, des déchets et des résidus provenant de l'agriculture, y compris les substances végétales et animales issues de la terre et de la mer, de la sylviculture et des industries connexes, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et ménagers [2]. L'utilisation de la biomasse à des fins énergétiques permet de diversifier les sources d'énergie, de dynamiser l'économie et surtout de favoriser l'indépendance énergétique vis-à-vis des énergies fossiles. La valorisation thermochimique de la biomasse (combustion, pyrolyse, gazéification) utilisée dans les procédés modernes offre une grande efficacité énergétique et a la possibilité de fournir de l'énergie pour la production d'électricité, mais aussi de la chaleur (vapeur) pour des process industriels.

La source principale de production d'énergie à partir de la biomasse provient des résidus (déchets). Ces déchets actuellement générés dans la région de Ziguinchor constituent un gisement très important d'énergie potentielle. Cependant il existe de nombreuses tentatives pour estimer la production et l'utilisation des résidus, mais toutes ces tentatives présentent de nombreuses

variations selon l'utilisation alternative de ces déchets comme aliments de bétails, engrais, recyclage de matériaux, etc., et aussi pour la nécessité de déterminer leurs disponibilités réelles. Ainsi les coques d'arachides, de palmistes, d'anacardes, les tiges de mil, la balle de riz sont les résidus les plus présents au Sénégal, particulièrement en Casamance où elles sont présentes en une grande quantité ; ils représentent une quantité énorme en potentiel. Soit, par ignorance de leur capacité énergétique, soit par faute de moyens techniques ou financiers, ces résidus sont le plus souvent inutilisés ou rejetés dans la nature après les récoltes. Il est donc indispensable de mettre en place des plans stratégiques pour atténuer la forte pression qui pèse sur la nature, mais aussi pour lutter efficacement contre les changements climatiques. C'est dans ce sens que la valorisation énergétique des résidus constitue un pôle principal de politique de promotion du secteur des énergies renouvelables. Cette valorisation se fait à travers différentes techniques et méthodes dont l'une sera justement la problématique de notre étude qui porte sur la production de l'électricité à partir de coques d'arachide à la SONACOS de Ziguinchor. Ce choix stratégique de l'entreprise en matière d'énergie réside dans le besoin de réduire la consommation de combustible de dérivées pétrolières, et par conséquent de valoriser les résidus issus de la biomasse locale (sous-produits). Faisant partie des industries qui consomment le plus d'énergie électrique et thermique au Sénégal [3], la SONACOS utilise le système de cogénération pour satisfaire ses besoins énergétiques et réduire de manière significative son coût de production et rendre ainsi les produits de l'entreprise compétitifs. La cogénération est un système de production d'énergie à haut rendement qui fait partie des techniques les plus efficaces pour l'utilisation de la biomasse. Elle consiste à produire à partir d'une énergie primaire combustible deux énergies secondaires utilisables : une thermique et une autre mécanique (électrique). D'autres grandes industries du pays notamment dans le secteur de la sucrerie et de la cimenterie utilisent le même système de production d'énergie. Ainsi, pour bien mener notre étude, nous ferons dans le premier chapitre une présentation de la SONACOS suivie d'une étude bibliographique sur les chaudières ; le second chapitre présentera la caractérisation thermo-physique des différents résidus étudiés ; et enfin, dans le dernier chapitre, nous ferons une étude concernant les bilans massiques et énergétiques de la chaudière Duquenne de la SONACOS.

Chapitre 1 : Présentation de la société SONACOS

Introduction

La société nationale de commercialisation des oléagineux du Sénégal (SONACOS) est un grand complexe industriel et une des premières sociétés agroalimentaires du Sénégal ; celle de Ziguinchor est en même temps une société agroalimentaire et électrique. Les principales activités menées dans cette entreprise sont la production de l'huile brute d'arachide (HBA) et du tourteau. Elle présente la particularité d'être productrice d'énergies dont elle a besoin à partir de la biomasse principalement des résidus de ses sous-produits que sont les coques d'arachide et de palmistes autrement dit coque de palme afin de réduire sa dépendance en électricité vis-à-vis de la Senelec. Dans ce chapitre, nous allons présenter la SONACOS ainsi que les chaudières communément rencontrées.

1.1 Historique et Organigramme de la SONACOS

1.1.1 Historique

La plus grande ressource de développement économique du Sénégal demeure sans doute l'arachide. À l'époque coloniale, l'arachide faisait l'objet d'une exportation vers l'Europe, Chine, etc., et de par son abondance, d'année en année. Les caractéristiques de l'huile d'arachide font d'elle une des meilleures huiles dans le monde et la croissance de son prix sur le marché mondial a motivé l'entreprise à mettre fin à l'exportation de l'arachide en tant que matière première, mais la transformer localement en produit semi-fini qu'est l'huile brute d'arachide avant de procéder à son exportation. Cela pour des raisons économiques et logistiques, car pour eux, il était plus facile de transporter de l'huile que de transporter de l'arachide. De là, est née l'idée de créer, d'une part les usines de transformation de l'arachide qui est la SONACOS, et d'autre part de valoriser cette matière première.

La SONACOS est une entreprise agroalimentaire évoluant dans le secteur arachidier et qui regroupe cinq établissements ou unités industrielles que sont :

- ❖ SONACOS-SA Établissement Industriel de Dakar (SEID), région de Dakar ;
- ❖ SONACOS-SA Établissement Industriel de Lyndiane (SEIL), région de Kaolack ;
- ❖ SONACOS-SA Établissement Industriel de Baol (SEIB), région de Diourbel ;
- ❖ SONACOS-SA Établissement Industriel de Louga (SEIL), région de Louga ;
- ❖ SONACOS-SA Établissement Industriel de Ziguinchor (SEIZ), région de Ziguinchor.

Tous ces établissements sont sous l'administration et la supervision de la Direction Générale siégeant à Dakar à la rue Calmette. Dans notre travail, nous nous limitons à la SONACOS-SA de Ziguinchor, notre lieu de stage. Située sur l'avenue Cherif Bachir AIDARA, au sud-est du port de Ziguinchor, la SONACOS de Ziguinchor est créée en 1932 sous le nom de SEIC (Société Électrique et Industrielle de la Casamance) par M. GIRALD avec une superficie de 50 910 m². En 1956 la SEIC cède la société à l'UNIPOL (Union des Industries de Produits Oléagineux de France) qui dirigea l'entreprise pendant quatorze ans, c'est précisément en 1970 qu'elle sera reprise par LESIEUR AFRIQUE.

Jusqu'en 1975, l'entreprise était une société privée qui regroupait les unités industrielles (SEID, SEIL, SEIB, SEIC).

En septembre 1975, elle est nationalisée et devient la Société Nationale de Commercialisation des Oléagineux du Sénégal (SONACOS). Celle de Ziguinchor sera appelée Établissement Industriel de la Casamance (SEIC), et plus tard, SEIZ de Ziguinchor.

Mais la filière arachide rencontra des difficultés et en mars 2005 la SONACOS est privatisée au profit du groupe ADVENS (France). En janvier 2007, l'entreprise devient SUNEOR, « SUNU » qui veut dire « notre » en Wolof et « OR » et repart avec de nouvelles bases.

En 2016, elle rencontra encore d'autres difficultés, c'est ainsi que l'État du Sénégal reprend l'entreprise et la SUNEOR qui est devenue désormais la SONACOS.SA.

1.1.2 Organigramme

Comme toute entreprise, la SONACOS (EIZ) respecte une hiérarchie. Elle est dirigée par un directeur d'usine qui administre et supervise l'ensemble des activités menées dans l'entreprise. Il est assisté par les chefs de départements (voir organigramme).

La SONACOS compte trois cent quatorze (314) travailleurs, dont quarante-cinq (45) permanents (comptant 06 cadres, trente-cinq (35) agents de maîtrise et quatre (04) ouvriers et employés) et 259 saisonniers dont (zéro cadre, trente-six (36) agents de maîtrise et deux cent vingt-trois (223) ouvriers et employés). La société collabore avec douze GIEs qui comptent environ deux cents (200) personnes.

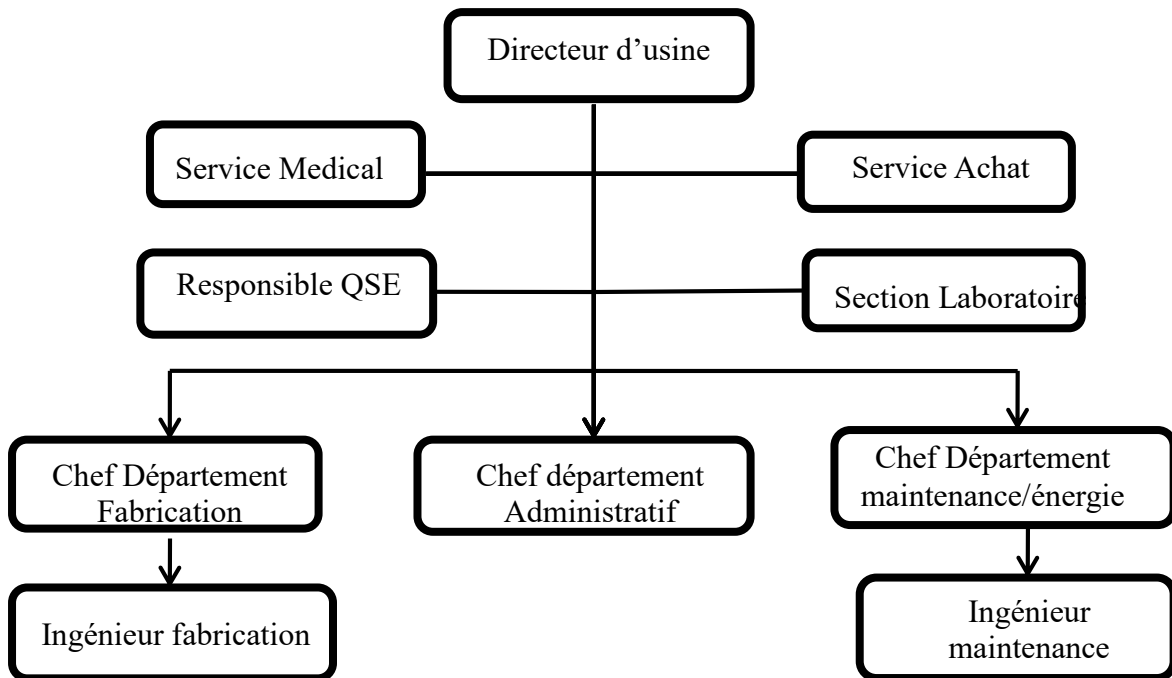


Figure 1.1 : Organigramme de la SONACOS,(EIZ)

1.1.3 Process et schéma de production de la SONACOS

La SONACOS de Ziguinchor produit essentiellement de l'huile d'arachide brute et du tourteau traité, destinés à l'exportation. Actuellement, sa capacité de trituration annuelle est d'environ 120 000 tonnes de graines d'arachide non décortiquées avec 39 600 tonnes d'huile brute, 49 200 tonnes de tourteaux et 27 600 tonnes de coques d'arachide, dont la production journalière est de 450 T de grains en coques, 149 T d'huile brute, 185 T de tourteau et 104 T de coques d'arachides. La production de l'huile brute et du tourteau à partir de l'arachide est la principale vocation de l'usine. La production de HBA est contrôlée grâce à des analyses physico-chimiques qui sont aussi appliquées sur la matière première. La figure ci-dessous illustre le processus de production.

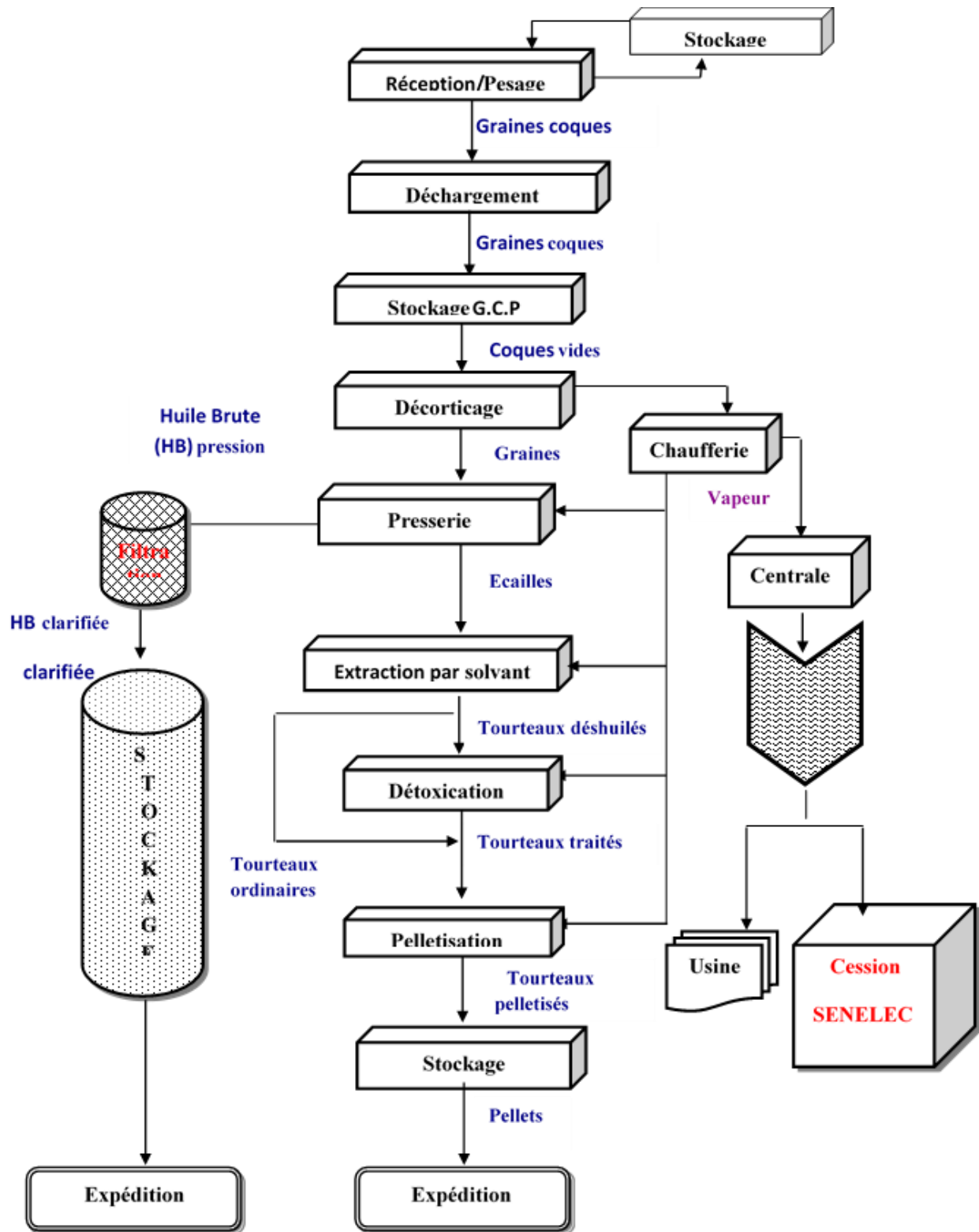


Figure 1.2 : Schéma de production de la SONACOS, (EIZ)

Cette figure retrace l'ensemble des activités qui transforme les éléments d'entrées en éléments finis. Elle comprend les activités réalisées par différents services et ateliers. Elle produisait aussi du savon à partir de l'huile de l'amande de palme de 1995 jusqu'en 2005. Aujourd'hui, seule l'arachide est structurée dans cette entreprise. Tous ces équipements consomment de l'énergie thermique et électrique. La figure suivante illustre les produits de la SONACOS.



Figure 1.3 : Photos des produits de la SONACOS

1.2 Chaudières à combustibles

1.2.1 Généralités

La chaudière est un dispositif permettant de chauffer de l'eau et de produire de la vapeur si l'eau est chauffée au-delà de la pression atmosphérique. Historiquement le mot chaudière désignait un foyer avec son échangeur dans les installations de cuisine et de chauffage, dans les machines à vapeur, les chaudières sont utilisées dans différents domaines tels que dans les applications industrielles (agroalimentaire, chimie, cimenterie), dans les centrales thermiques, dans les maisons, etc. Certaines chaudières ont une très grande capacité de produire de l'eau chaude, de la vapeur d'eau, de la vapeur saturée et de la vapeur surchauffée avec une puissance très élevée, elles présentent aussi une efficacité adéquate permettant de transférer l'énergie thermique (chaleur) à un fluide caloporteur le plus généralement de l'eau. Les chaudières sont aussi utilisées pour récupérer

la chaleur contenue dans un autre fluide pouvant être des gaz de combustion ou des gaz de procédés chimiques. Cependant, la première chaudière à tubes de fumée a été mise au point qu'avec le développement des machines à vapeur modernes qui servait les premières locomotives, mais ce sont les travaux de Babcock et al [4] sur la nécessité d'avoir des débits et pressions importants qui ont permis d'aboutir à la chaudière à tubes d'eau, depuis lors, les chaudières se sont perfectionnées sans cesse avec des rendements d'environ 90 %. Ainsi il existe une grande variété de chaudières qui peuvent se différencier par l'architecture, par les sources de combustibles (liquide, solide, gaz), par le type d'application, etc. En fonction d'éléments constitutifs génériques, les chaudières industrielles peuvent être classées en deux catégories principales : les chaudières conventionnelles dans lesquelles la chaleur nécessaire à la vaporisation de l'eau est fournie par combustion de combustibles solides, liquides ou gazeux. Selon le type de chaudière, ce sont l'eau ou les fumées de combustion qui circulent dans un faisceau tubulaire ; on distingue ainsi les chaudières à tubes de fumées et les chaudières à tubes d'eau. Les chaudières de récupération utilisant la chaleur disponible dans des fluides de procédés à haute température ou dans les fumées de fours ou de turbines à gaz. En fonction de la nature des fluides et de leurs conditions de disponibilité, les chaudières de récupération peuvent être construites comme les chaudières conventionnelles. Dans la suite de ce travail, nous nous intéressons qu'aux chaudières conventionnelles à combustibles qui sont plus couramment utilisées et dans ce cas précis, celle utilisée par la SONACOS. Et pour ce type de chaudière, il nous est nécessaire d'en connaître son fonctionnement.

1.2.2 Types de chaudières à combustibles

La majeure partie de ces chaudières est fabriquée à partir des matériaux comme le fer, l'acier, la fonte, la laine, etc. La plupart de ces chaudières disposent de deux compartiments distincts, l'un appelé le foyer, four ou la chambre de combustion dans lequel s'effectue la combustion et il en existe de plusieurs types de fours : les fours à grilles mobiles, tournants, à lit fluidisé. L'autre dans lequel l'eau est chauffée. Ainsi nous distinguons deux types de chaudières à combustibles en fonction de la circulation de l'eau à chauffer par rapport à la chaleur de combustion.

1.2.2.1 Chaudière à tubes de fumées

Dans les chaudières à tubes de fumées, l'élément assurant la combustion s'appelle le brûleur qui peut être liquide (fioul) ou gazeux. Ce type de chaudière fournit un débit de vapeur saturée de 1 à 25 T/h en basse et moyenne pression. Ce type de chaudière est illustré dans la figure ci-dessous.

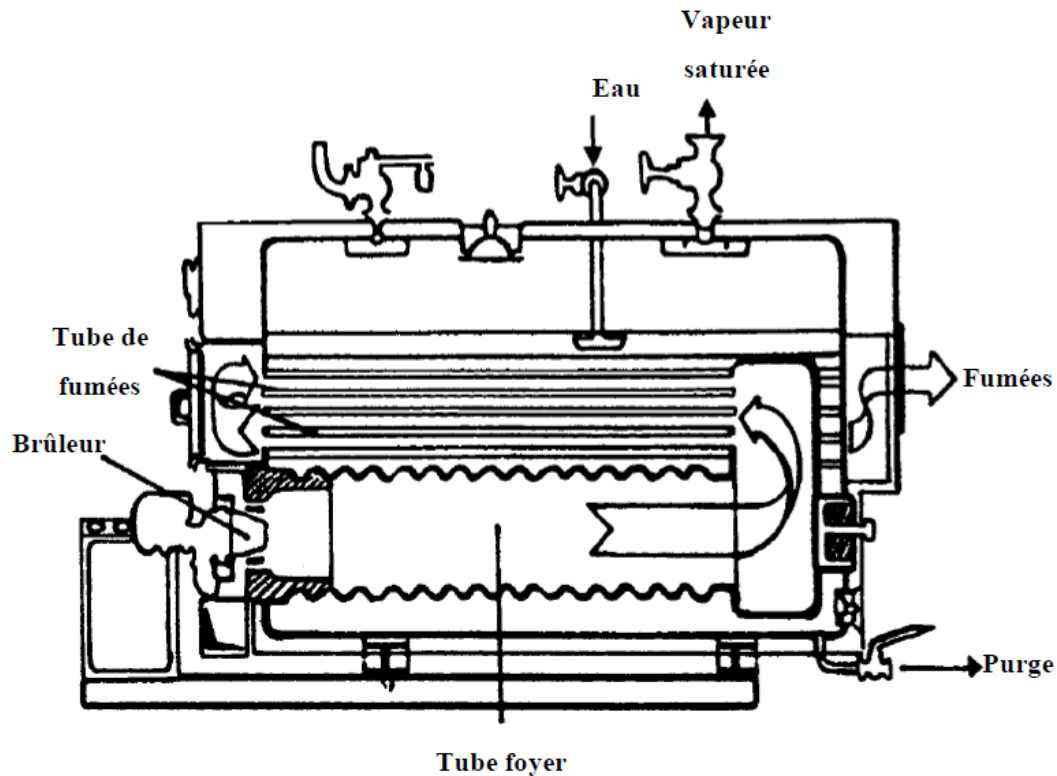


Figure 1.4 : Chaudière à tubes de fumées [4].

La chaudière à tubes de fumées est constituée d'un grand réservoir d'eau traversé par des tubes de fumées. Cette eau reçoit de la chaleur du réseau des tubes de fumée par convection. Le premier tube de parcours a un gros diamètre et constitue le foyer. Il se trouve dans le ballon de la chaudière sous le plan d'eau et collecte les gaz chauds en sortie du brûleur. Ces gaz chauds accumulés dans un premier caisson à l'arrière de la chaudière sont véhiculés par un groupe de tubes immergés dans le ballon d'eau vers un second caisson à l'avant de la chaudière. Un autre groupe de tubes immergés emporte les gaz vers le troisième caisson qui évacuera la fumée à l'extérieur. La production de vapeur surchauffée se fait à l'aide d'un surchauffeur installé en aval de la chaudière.

1.2.2.2 Chaudière à tubes d'eau

Ce type de chaudière utilise des déchets solides (ou fioul, gaz) comme combustibles. Elle peut fournir un débit de vapeur saturée supérieur à 20 T/h en moyenne et à haute pression. La figure (3.2) illustre parfaitement la chaudière à tubes d'eau.

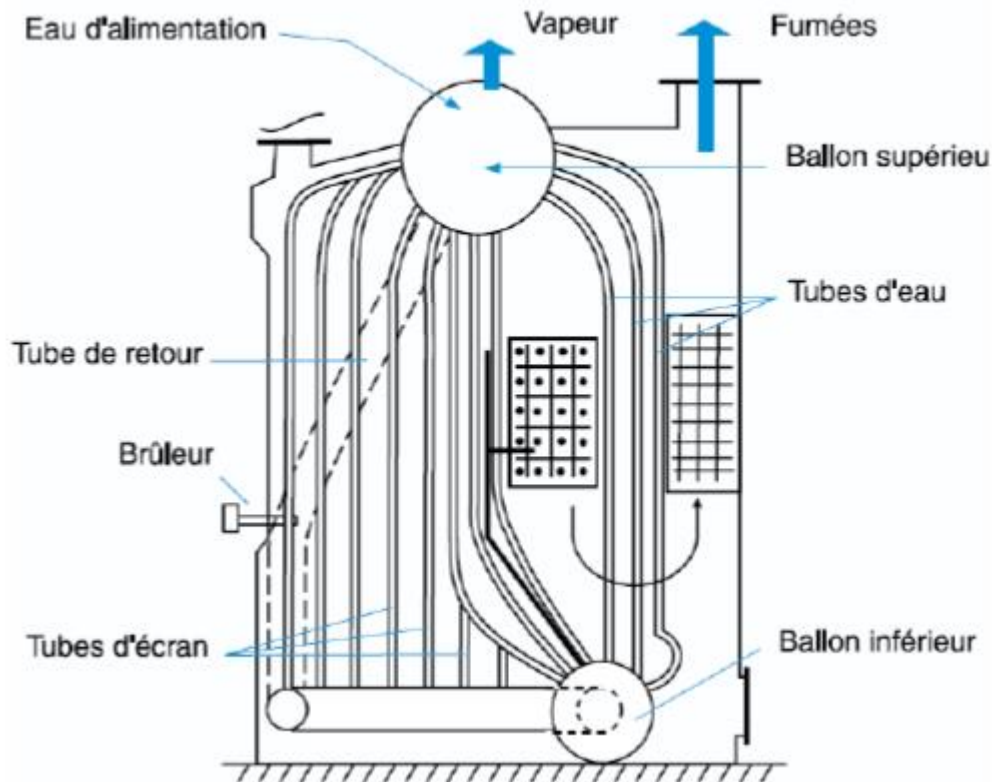


Figure 1.5 : Chaudière à tubes d'eau [4]

La chaudière à tubes d'eau comporte deux réservoirs, l'un situé sur la partie supérieure appelé ballon collecteur (ou ballon de vaporisation) de la chaudière et l'autre à la partie inférieure appelé ballon distributeur. Ces deux ballons sont reliés par un faisceau de tubes vaporisateurs où circule l'eau à vaporiser. Les gaz chauds produits par le brûleur sont directement en contact avec les tubes vaporisateurs à l'intérieur de ceux-ci se produit la vaporisation. Puisque la masse volumique de la vapeur est inférieure à celle de l'eau liquide, la différence de pression entraîne la circulation de l'eau dans le circuit (ballon, tubes de descente, tubes de foyer, retour au ballon) avant d'être évacuée du ballon sous forme de vapeur saturée et l'eau excédentaire est ramenée vers le ballon inférieur par des tubes de chutes non soumis à la chaleur. Cette circulation de l'eau est assurée par une pompe.

1.2.2.3 Comparaison des performances

Les eaux des deux types de chaudières doivent impérativement être traitées afin d'éviter toute contamination et dépôt de tartre à l'extérieur et à l'intérieur des différents tubes. En effet, le tartre peut provoquer une longue durée de mise en pression-température et un mauvais échange

thermique. Cependant, les deux types de chaudières n'ont pas les mêmes caractéristiques. Le tableau ci-dessous montre les caractéristiques de ces chaudières.

Tableau 1.1 : Comparaison des performances des deux types de chaudières [5]

Propriétés	Chaudière à tubes de fumée	Chaudière à tubes d'eau
Mise à route (à puissance équivalente)	Lent (grand volume d'eau à chauffer)	Rapide
Adaptation au changement de régime	Médiocre (inertie importante)	Bonne (inertie faible)
Surface de chauffe	Moyenne	Élevée
Sécurité	Médiocre	Bonne
Encombrement	Faible	Fort
Prix	Limité	Élevé
Puissance	Moyenne	Importante
Débit	1,5 à 25 T/h	4 à 200 T/h
Timbre (Pression max)	10 à 20 bars	90 à 100 bars
Combustibles appropriés	Gazeux et liquides	Solides

Ce tableau montre l'avantage des chaudières à tubes d'eau sur celle à tubes de fumée sur plusieurs domaines. En plus de ces propriétés, la chaudière à tubes d'eau a un foyer volumineux qui a la possibilité d'être ouvert dans sa partie inférieure et facilitant l'extraction des cendres, elle a la possibilité d'utiliser d'autres types combustibles ; telle n'est pas le cas pour la chaudière à tubes de fumés, car la forme du foyer rend difficilement l'extraction des cendres.

Conclusion

La SONACOS était une entreprise capitale pour l'équilibre interne et externe du Sénégal. Premier facteur de stabilité sociale par les recettes d'exportation qu'elle apporte, la culture d'arachide présente la principale activité du secteur primaire. Bien qu'elle reste aujourd'hui un acteur important, surtout de par son potentiel, la SONACOS a perdu beaucoup de parts de marché aussi bien dans la production que l'exportation de l'huile brute d'arachide. Ceci s'explique par la forte concurrence des autres entreprises, des autres oléagineux, la présence des autres pays comme la Chine, les facteurs climatiques mais également à la vétusté de ses installations. Mais la société reste toujours le principal partenaire des agriculteurs de la filière arachidière et participe aussi à

l'utilisation des résidus de biomasse à des fins énergétiques. La majorité de ses besoins énergétiques est issue de la cogénération, qui fait partie des techniques les plus efficaces pour la valorisation de la biomasse par utilisation des chaudières à combustibles solides.

Chapitre 2 : Présentation et caractérisation des différents résidus

Introduction

La conversion énergétique des résidus de biomasse par combustion nécessite une présentation et une détermination de certains paramètres (humidité, taux de cendres, taux de matières volatiles, pouvoir calorifique, etc.) de ces différents résidus. Pour le cas de la SONACOS, malgré une demande croissante en combustibles, la coque d'arachide demeure toujours le premier combustible de la société. Pourtant, il existe d'autres types de résidus qui peuvent servir de recours même s'ils n'ont pas tous les mêmes caractéristiques physiques et thermo physiques. De façon générale, la valorisation énergétique des déchets nécessite une caractérisation physico-chimique, parfois, selon la nature du résidu un prétraitement s'impose au préalable visant à faciliter le conditionnement.

2.1 Présentation des différents résidus de la Casamance

2.1.1 Les coques d'arachide

L'arachide est une plante oléagineuse de la famille des légumineuses, très cultivée aussi en Casamance. Sa culture dans la région est d'une grande importance économique et stratégique, du fait qu'elle est à la fois vivrière, commerciale et industrielle. La coque d'arachide est le résidu de la gousse d'arachide après le décorticage. Généralement, elle est constituée de cellulose, de l'hémicellulose et de la lignine. La coque d'arachide est le principal combustible utilisé à la SONACOS pour l'alimentation de la chaudière.

La Sonacos, qui faisait figure de leader dans l'exportation de l'huile brute d'arachide (HBA) à partir de l'arachide dans le passé, a beaucoup perdu de son importance, notamment dans les deux dernières années y compris les années 2012 et 2013. Cette perte de part de marché se produit dans une tendance générale de l'instabilité des exportations mondiales de HBA et des grains d'arachide et se situait à un niveau historique de 120 000 Tonnes/an. En 2016, la faible réception, 3 958 tonnes de grains d'arachide réceptionnés par rapport à la production nationale 719 000 tonnes (FAOSTAT), traduit le fait que l'entreprise n'a pas pu concurrencer les acheteurs chinois. Ces acheteurs ne sont pas revenus en 2014 et les résultats furent meilleurs, et grâce en partie aux subventions de l'État. Ces crises profondes peuvent être aussi la combinaison de plusieurs facteurs d'ordre socio-économique (privatisation ratée), politique (fluctuation du prix d'arachide), des aléas climatiques (irrégularités et diminution de la pluviométrie, la baisse de fertilité des sols et les attaques de ravageurs pouvant impacter fortement la production), mais également conjoncturels (concurrence des autres oléagineux). Ainsi, pour estimer la quantité de coques obtenue, nous avons déterminé le pourcentage du ratio (C/G) de la masse de la coque (C) à celle de la gousse (G). Les

essais effectués montrent que la coque d'arachide représente 21 à 27 % en masse de sa gousse. Pour faire nos calculs, nous avons effectué trois essais qui consistent à déterminer les masses des trois tubes remplis de gousses d'arachide et de coques. Les figures ci-dessous donnant les résultats de ces calculs, montrent respectivement la quantité d'arachides réceptionnée durant la période de 2010 à 2017, l'évolution de la disponibilité des coques d'arachide pendant cette même période et l'évolution de la quantité de coques importée de la période allant de 2011 à 2016 au niveau de la SONACOS.

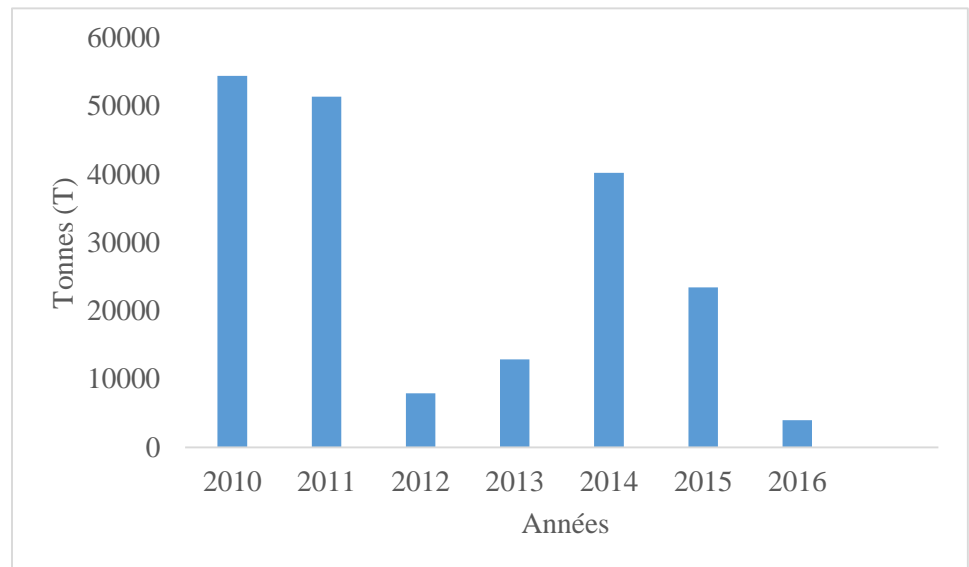


Figure 2.1 : Évolution de la quantité d'arachide réceptionnée en tonne par la Sonacos

Nous constatons sur la figure 2.1 ci-dessus que la quantité d'arachide réceptionnée a un impact direct sur la disponibilité des coques d'arachides. Car plus la production baisse plus l'estimation des coques diminue. Les années 2012, 2013, 2016 et 2017, marquent une forte baisse de la production d'arachide. En plus de ce déficit, une partie de cette coque provenant du décorticage est très poussiéreuse (fines). Malgré la place qu'occupe la culture d'arachide au Sénégal, la SONACOS importe la coque d'arachide dans les pays frontaliers (la Guinée-Bissau et la Gambie) afin de subvenir ses besoins en combustibles, cette coque importée a un taux d'humidité élevé (exposée aux eaux de pluie) que celle produite localement (Voir figure 2.3).

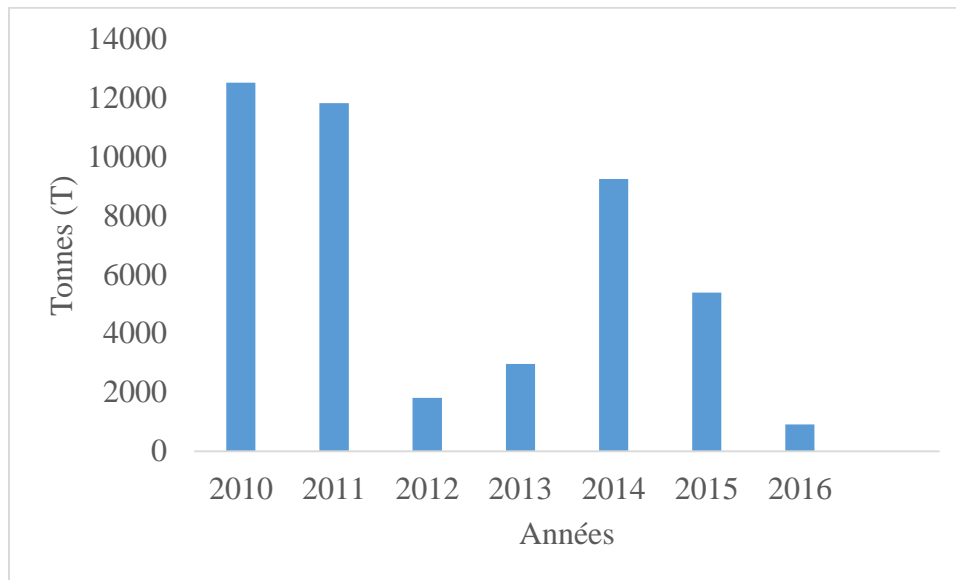


Figure 2.2 : Évolution de la disponibilité des coques d’arachides en tonnes à la Sonacos

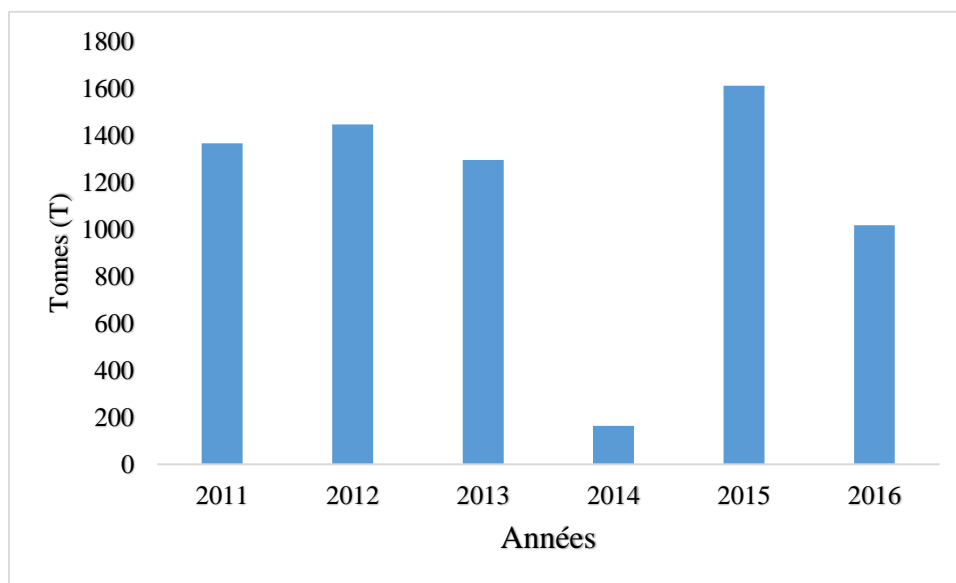


Figure 2.3 : Évolution des quantités de coques d’arachides externes en tonnes à la Sonacos

2.1.2 Les coques de palmistes

Le produit de la trituration des noix de palmistes à l’état extrait est la base d’élaboration de plusieurs autres sous-produits que sont les huiles alimentaires de palmistes, le savon, le tourteau, etc. À la Sonacos, la noix de palmiste était la seconde matière de 1995 jusqu’en 2000 ; le fruit (l’amande) est transformé en huile puis en savon et les coques obtenues après le concassage de ces noix servaient de combustibles. Les palmiers sont localisés sur les rives du fleuve Casamance principalement en moyenne et basse Casamance (Kalounayes). Aujourd’hui, ils connaissent un faible potentiel d’expansion à cause de l’attaque des insectes ravageurs, des défrichements abusifs effectués par les populations locales, la sécheresse et surtout des problèmes écologiques (la perte

de la biodiversité, les émissions des GES). La figure suivante montre la photo des coques de palmistes.



Figure 2.4 : Photo de coques de palmistes

Cette instabilité de la production des palmiers s'explique par la domination de l'huile d'arachide sur le marché, mais aussi la Sonacos n'utilise plus ce produit, car elle ne dispose plus de la technologie adaptée et aussi elle ne produit plus d'huile de palmistes pour fabriquer du savon. Alors que sur la figure 2.5 ci-dessous qui est établie à partir des valeurs trouvées sur la base de données de la FAO montre que la disponibilité des coques de palmistes tourne autour de 73 000 tonnes de 2010 à 2013, et ceci peut encourager la SONACOS de réutiliser les coques de palmistes afin de subvenir ses besoins en combustible.

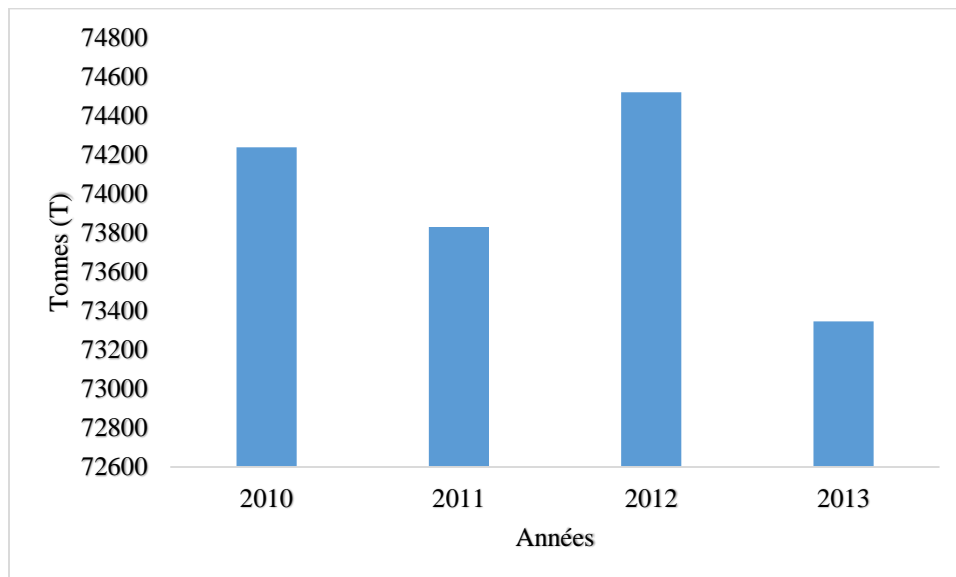


Figure 2.5 : Évolution de la disponibilité des coques de palmiste en tonnes au Sénégal

2.1.3 Les coques d'anacarde

En Afrique de l'Ouest, les anacardiens ont été plantés à partir des années 1950 principalement pour la diversification de la flore et le reboisement des forêts. Mais ce n'est qu'en 1990 que la noix de

cajou a commencé à être cultivée comme une culture commerciale et industrielle. L'augmentation du commerce entre l'Asie et l'Afrique et la forte demande mondiale de noix de cajou ont stimulé ce nouveau secteur. L'Afrique de l'Ouest fait partie des zones principales de production de noix d'anacarde et est la plus récente, la plus dynamique au monde [6] dans ce secteur. Au Sénégal, cette culture d'anacarde est plus développée en Casamance et dans la région de Fatick, et une grande partie de la production nationale est exportée vers l'Inde en passant par Banjul (Gambie). La coque d'anacarde est obtenue après le décorticage de la noix de cajou contenant l'amande. La coque d'anacarde représente 60 à 80 % de la masse de sa noix torréfiée. La figure suivante illustre la photo de coques d'anacarde.



Figure 2.6 : Photo de coques d'anacarde

Depuis 2010, nous constatons une augmentation exponentielle de la disponibilité des coques d'anacarde, cela est dû à l'accrue de sa production d'année en année. Cette augmentation s'explique non seulement par la présence des indiens sur le marché, mais aussi par la mise en valeur de la noix d'anacarde. La coque d'anacarde est l'une des biomasses abondant en Casamance principalement dans les régions de Ziguinchor et Kolda. De plus le volume de produit transformé (l'amande) est relativement très faible en raison de la non-maitrise des techniques de valorisation et des difficultés d'accès aux technologies performantes. Or la valorisation de cette coque constitue une réelle opportunité économique en termes d'énergie pour le Sénégal. Elle est riche en huile (CNSL) très prisée dans les industries mécaniques pour la fabrication de caoutchoucs, d'isolants ; mais présente de grands potentiels énergétiques grâce à son pouvoir calorifique élevé. La région dispose d'énormes quantités de coques d'anacarde, pouvant être un combustible de recours pour la Sonacos à condition de trouver une technologie adéquate, car le baume libéré lors de la combustion impacterait la grille de la chaudière. La figure 2.7 ci-dessous dresse les estimations en coques au Sénégal.

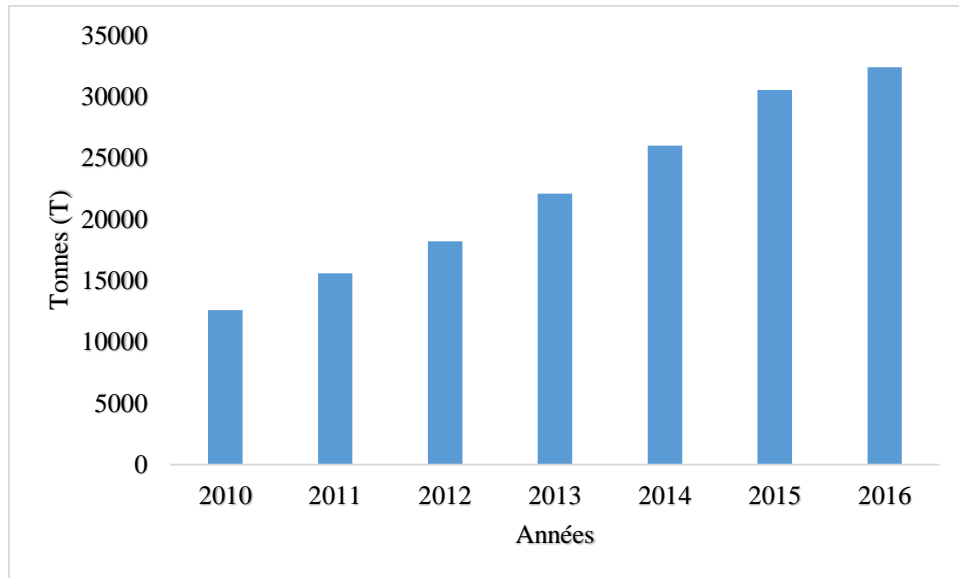


Figure 2.7 : Évolution de la disponibilité des coques d’anacarde en tonnes au Sénégal

2.2 Caractérisations des propriétés physiques et thermo-physiques des différents résidus

2.2.1 Masse volumique apparente des différents résidus

Par définition la masse volumique apparente ρ est le quotient de la masse du matériau par unité de volume apparent. Elle est exprimée en g/cm^3 ou en kg/m^3 . Il existe plusieurs méthodes pour déterminer la masse volumique apparente selon la dimension et la dispersion du matériau.

Dans notre étude, nous avons utilisé un récipient (boîte) de dimension $15,9 \text{ cm} \times 8,8 \text{ cm} \times 5,5 \text{ cm}$ dont la masse m_0 à vide est connue, puis nous avons rempli le récipient avec le matériau à peser ce qui donne la masse m_1 . Au final, la masse volumique apparente est donnée par :

$$\rho = \frac{m_c}{V} \quad (2.1)$$

$$\rho = \frac{m_1 - m_0}{V} \quad (2.2)$$

Avec :

m_c : masse combustible

m_0 : masse récipient vide

m_1 : masse récipient et échantillon de combustible

V : volume apparent du récipient

Avec $m_0 = 24,9 \text{ g}$; $m_1 = 142,8 \text{ g}$; $V = 769,56 \text{ cm}^3$ et en appliquant l'équation 2.2, nous trouvons les valeurs de la masse volumique des différents résidus qui sont ainsi consignés dans le tableau 2.1 ci-dessous.

Tableau 2.1 : La masse volumique apparente des résidus

Résidus	Coques d'arachide	Coques de palmiste	Coques d'anacarde
$\Delta m \text{ (g)}$	177,10	402,60	277
$\rho \text{ (g/cm}^3\text{)}$	0,153	0,523	0,359

Ce tableau indique que les coques d'arachide ont la plus petite masse volumique, ceci est dû non seulement par leur humidité, mais aussi par le fait que l'agencement (structure) des coques présente beaucoup de porosités. Par contre les coques de palmistes ont une granulométrie beaucoup plus fine et un agencement compact d'où l'importance de leur masse volumique apparente. Ces résultats montrent bien que la masse volumique apparente dépend de l'humidité, de la porosité et de la granulométrie des résidus.

2.2.2 Analyse élémentaire des résidus

La composition chimique des résidus de biomasse peut varier sensiblement d'un élément à l'autre. Afin d'être à l'abri de différents risques lors de la valorisation énergétique de ces résidus, il serait important de déterminer leur composition chimique.

Tableau 2.2 : Analyse élémentaire des différents résidus

Résidus	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)	Cl (%)
Coque d'arachide	56,49	6,62	35,28	1,51	-----	-----
Coque de palmiste	54,40	7,49	35,60	2,03	-----	-----
Coque d'anacarde	56,40	7,10	33,50	0,62	0,01	< 0,1

Ces résidus appartiennent à la famille des biomasses lignocellulosiques. Cette dernière est composée principalement de trois grands polymères organiques : la cellulose (environ 50 %), l'hémicellulose (environ 25 %), la lignine (environ 25 %) et de faibles quantités de matière minérales et cendres Akien *et al* [7]. En effet, la cellulose constitue la fraction la plus large et riche en carbone. Ainsi, les proportions en carbone, en oxygène et en hydrogène varient d'un résidu à l'autre, mais restent relativement semblables : environ 50 % de C, 40 % de O et 6 % de H et de faibles concentrations en N (de 0,4 à 1,2 %) Michel [8] ce qui confirme les résultats du tableau 2.2 la teneur en carbone est de 56,49 %, en oxygène 35,28 % et moins de 7 % en hydrogène pour la coque d'arachide Vladimir *et al* [9]. Quant à la coque de palmiste, elle possède une teneur de

54,40 % en carbone, 35,60 % en oxygène et 7,49 % en hydrogène, Richard *et al* [10]. De même pour la coque d'anacarde, elle présente aussi une teneur de 56,40 % en carbone, 33,50 % en oxygène et 7,10 % en hydrogène, Irfan *et al* [11]. Ces résultats montrent une forte teneur en carbone dans ces trois types de coques. Un taux élevé en carbone et en hydrogène augmentent la quantité énergétique et le PCI du combustible.

2.2.3 Analyse immédiate des résidus

Historiquement l'analyse immédiate a été développée sur la base des combustibles solides, tels que le charbon de bois et le biocharbon qui se comportent essentiellement de l'énergie chimique stockée sous deux formes : matière volatile et carbone fixe.

2.2.3.1 Indice de matières volatiles

L'indice de matières volatiles (MV) est la perte de masse obtenue dans les conditions normalisées, après pyrolyse de l'échantillon chauffé à l'air, abstraction faite de la perte de masse qui est due à l'évaporation de l'eau de l'humidité.

❖ Mode opératoire

Nous avons chauffé au préalable dans le four à moufle des creusets (nacelles) pendant 30 minutes à une température de 950 °C, puis les creusets sont refroidis dans le dessiccateur (étuve) et pesés (m_1). Nous avons introduit l'échantillon pesé (m_2) à 0,1 mg près. Ensuite, le creuset est recouvert de résidus avant d'être introduit dans le four à 950 °C pendant une heure et est pesé à la sortie du four (m_3). L'indice de matières volatiles est exprimé en pourcentage, elle est donnée par la formule suivante.

$$MV = \frac{100(m_2 - m_3)}{m_2 - m_1} - H \quad (2.3)$$

Avec :

m_1 : masse creuset vide ;

m_2 : masse creuset et échantillon avant chauffage ;

m_3 : masse creuset et échantillon après chauffage ;

H : humidité en pourcentage massique de l'échantillon analysé.

2.2.3.2 La teneur en cendres

Le taux de cendres est la quantité d'éléments non combustible des résidus. Ce taux de cendres est déterminé expérimentalement, il est exprimé en pourcentage et est donné par la formule ci-dessous.

❖ Mode opératoire

Nous avons commencé à calciner une nacelle de silice au four à 750 °C pendant 30 min puis refroidie dans un dessiccateur pendant 30 min et pesée à 0,1 mg près. Ensuite nous avons pesé 2 g d'échantillon de granulométrie inférieure à 200 micromètres enveloppé dans le papier d'aluminium. L'échantillon est mis dans la nacelle, nous l'avons placé dans le four à moufle avec une température initiale inférieure à 300 °C et nous avons chauffé le four à une vitesse de 250 à 300 °C/heure pour atteindre la température 750 °C ± 20 °C souhaitée.

$$C_e = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \times 100 \quad (2.4)$$

Avec :

m_1 : masse de la nacelle ;

m_2 : masse de la nacelle et de l'échantillon ;

m_3 : masse de la nacelle et des cendres.

2.2.3.3 Le taux de carbone fixe

Par définition le carbone fixe est la masse restante après la libération des substances volatiles, le passage à l'étuve et excluant le taux des cendres. Il est défini par la formule suivante :

$$CF = 100 - (H + MV + Ce) \quad (2.5)$$

Tableau 2.3 : Analyse immédiate des différents résidus

Résidus	MV (%)	CF (%)	Cendres (%)
Coques d'arachide	69,6	24,6	5,74
Coques de palmistes	83,3	15,5	1,2
Coques d'anacarde	79,8	16,34	3,7

L'analyse de ce tableau montre que la coque d'arachide possède une teneur en matières volatiles 69,6 %, moins élevée, 24,6 % en carbone fixe et 5,74 % en cendres. Ces valeurs sont comparables à celles trouvées par P.B Himbane (2016) [12] dont les valeurs sont respectivement égales à 65,42 % ; 23,79 % et 5,74 %. Quant à la coque de palmiste, elle présente une forte teneur en matières volatiles 83,3 %, une teneur en carbone fixe de 15,5 % et une faible teneur en cendres 1,2 %. Une forte teneur en cendres donne lieu à des problèmes liés à l'encrassement de la chaudière, surtout si les cendres contiennent une proportion élevée en potassium, mais aussi elle influence le contenu énergétique disponible dans le résidu. Le taux de matière volatile élevé favorise l'inflammation et la réaction de combustion du combustible.

2.2.4 L'humidité

Le taux d'humidité d'un combustible représente la quantité d'eau contenue dans ce combustible. Il existe deux types d'humidité :

- ❖ L'humidité sur base humide qui représente le rapport de la masse d'eau contenue dans le combustible et de la masse totale du combustible ;
- ❖ L'humidité sur base sèche qui est le quotient de la masse d'eau contenue dans le combustible sur la masse sèche du combustible.

Les deux humidités sont données par les formules suivantes :

$$\text{Sur base humide : } H_b = \frac{m_h - m_s}{m_h} \times 100 \quad (2.6)$$

$$\text{Sur base sèche : } H_s = \frac{m_h - m_s}{m_s} \times 100 \quad (2.7)$$

Avec :

m_h : masse de l'échantillon humide ;

m_s : masse de l'échantillon anhydre après séchage à l'étuve ;

❖ Détermination expérimentale du taux d'humidité

Pour son mode opératoire, nous avons pris un échantillon que l'on détermine la masse m_h par une balance électronique. L'échantillon est passé à l'étuve à 105 °C pendant 24 heures. À la sortie de l'étuve nous avons déterminé la masse m_s de l'échantillon afin de déterminer le taux d'humidité à l'aide des formules (2.5) et (2.6). Le tableau 2.4 résume le taux d'humidité brute des différents résidus.

Tableau 2.4 : Taux d'humidité des résidus

Essais	Masse humide m_h (g)	Masse sèche m_s (g)	Moyenne de la masse $\Delta m = m_0 - m_1$	Taux d'humidité H_b (%)
Coques d'arachide				
Essai 1	7,31	6,86	0,45	6,15
Essai 2	5,20	4,97	0,23	4,42
Essai 3	8,46	7,37	1,09	12,88
Moyenne				7,82
Coques de palme				
Essai 1	30,04	27,73	2,31	7,68
Essai 2	30,03	27,72	2,31	7,69
Essai 3	30,08	27,73	2,35	7,81
Moyenne				7,72
Coques d'anacarde				
Essai 1	22,20	18,40	3,80	17,11
Essai 2	24,60	20,70	3,90	15,85
Essai 3	23,61	19,70	3,90	16,53
Moyenne				16,49

Le tableau montre que toutes les coques recèlent une certaine teneur en eau. Cependant cette humidité est plus importante chez la coque d'anacarde (16,49 %) que chez les autres coques, cela est dû à sa richesse en baume (Cashew Nut Shell Liquid, CNSL). Par contre une teneur plus élevée en humidité est défavorable à la combustion des résidus (coques d'arachide). Nous avons aussi déterminé la teneur sur base sèche, les résultats sont consignés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 2.5 : Humidité sur base sèche des résidus

Combustibles	Taux d'humidité H_s (%)
Coques d'arachide	8,65
Coques de palmiste	8,37
Coques d'anacarde	19,76

L'analyse de ce tableau montre que l'humidité à base sèche est plus importante que celle à base brute. De même, la coque d'anacarde présente une humidité plus élevée que les autres coques comme dans le cas précédent.

2.2.5 Le pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique (PC) d'un combustible exprime le contenu énergétique d'un combustible ou la quantité de chaleur libérée lors de la combustion de ce combustible. Il est exprimé par unité de masse MJ/kg. Il existe deux sortes de pouvoirs calorifiques : le pouvoir calorifique supérieur (PCS) est l'énergie dégagée par la combustion en tenant compte de la chaleur latente de vapeur d'eau lors de la combustion et le pouvoir calorifique inférieur (PCI) c'est lorsque la combustion s'effectue sans récupérer la chaleur latente c'est-à-dire à pression constante.

Le pouvoir calorifique peut être déterminé expérimentalement à l'aide d'une bombe calorimétrique ou bien par calcul théorique en connaissant la fraction massique de carbone (taux de carbone fixe) du combustible considéré. Dans notre étude, le PCS et PCI sont déterminés en appliquant les formules empiriques suivantes et sont exprimés en Kcal/kg puis nous les ont convertis en kJ/kg :

$$PCS = 81,3C + 345,5\left(H - \frac{O}{8}\right) + 22,2S \quad (2.8)$$

$$PCI = PCS - 6(9H + HumiditéH) \quad (2.9).$$

La figure ci-dessous présente le PCI des combustibles de biomasse et celui du combustible fossile, le gasoil.

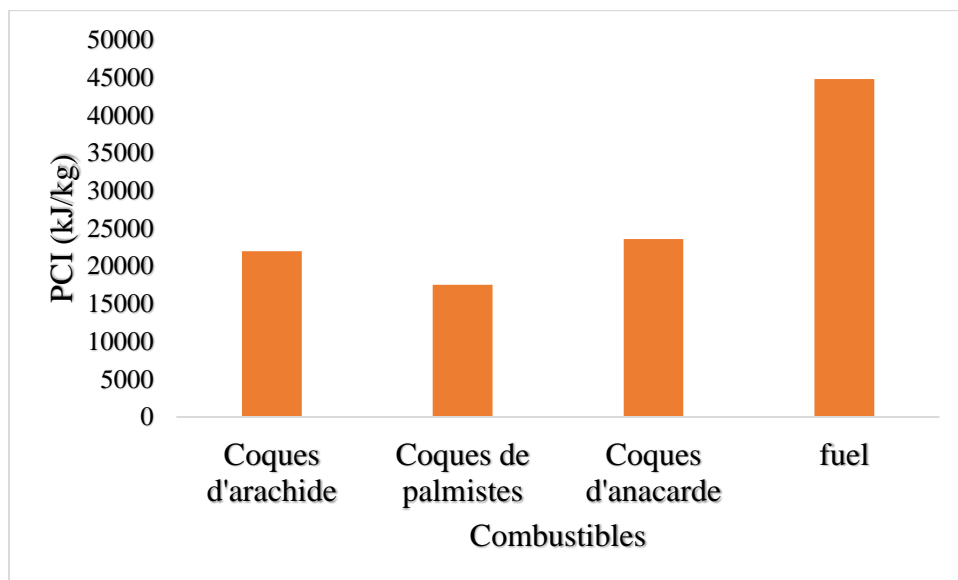


Figure 2.8 : Evolution du PCI des différents combustibles

Cette figure montre que le PCI du gasoil est plus élevé que celui des résidus de biomasse. Ceci peut être expliqué par le fait que les résidus de biomasse ont une teneur moyenne en carbone, en hydrogène et plus en oxygène vis-à-vis à celle des combustibles fossiles (gasoil).

Néanmoins tous les trois types de coques présentent un PCI qui favorise bien leur combustion. Nos valeurs de PCI sont comparables à celles trouvées par Diémé [13] dont les valeurs sont 18 120 kJ/kg pour la coque d'arachide, 19 627 kJ/kg pour le palmiste et 20 657 kJ/kg pour l'anacarde.

2.2.6 Capacité thermique massique

La capacité thermique massique ou encore la chaleur thermique massique est la quantité d'énergie (chaleur) fournie (ou prise) pour élever (ou abaisser) d'un (1 °C) la température d'une unité de masse. La capacité thermique des résidus peut être déterminée à l'aide du calorimètre à vase de Dewar. La méthode consiste d'abord à déterminer la valeur en eau de ce calorimètre en mélangeant deux masses d'eau de températures différentes. Ce mélange est choisi et le Cp de l'eau est connu. Puis un autre mélange d'une masse d'eau chaude à une température de 40 °C et une masse d'échantillon de résidus de capacité inconnue est réalisé. Lorsque la température d'équilibre du mélange est atteinte, par application du bilan thermique à l'équilibre du mélange eau-résidu, on en a déduit le Cp de l'échantillon.

À l'équilibre thermique, le bilan thermique s'écrit :

$$\Delta Q_2 = \Delta Q_1 + Q_{eau} \quad (2.10)$$

Avec :

ΔQ_1 : La quantité de chaleur échangée par l'eau ;

ΔQ_2 : La quantité de chaleur échangée par l'échantillon (résidu).

Les deux grandeurs exprimées en J, s'écrivent sous les formules suivantes :

$$\Delta Q_1 = m_1 C_{p1} (T_1 - T_{Eq}) \quad (2.11)$$

$$\Delta Q_2 = m_2 C_{p2} (T_{Eq} - T_2) \quad (2.12)$$

Avec :

m_1 : masse de l'eau (kg) ;

C_{p1} : capacité thermique massique de l'eau (J.kg-1K-1) ;

T_1 : température de l'eau (K) ;

T_{Eq} : température d'équilibre du mélange eau-résidu (K) ;

m_2 : masse échantillon de résidu (kg) ;

C_{p2} : capacité thermique massique de l'échantillon de résidu (J.kg-1K-1) ;

T_2 : température de résidu (K) ;

Q_{eau} : la valeur en eau du calorimètre, c'est la quantité de chaleur absorbée lorsque le calorimètre est vide (J).

En remplaçant les équations (2.11) et (2.12) dans l'équation bilan (2.10), ce qui donne la capacité thermique massique de l'échantillon de résidu :

$$C_{p2} = \frac{m_1 C_{p1} (T_1 - T_{Eq}) + Q_{eau}}{m_2 (T_{Eq} - T_2)} \quad (2.13)$$

2.2.7 Conductivité thermique

La conductivité thermique est une grandeur physique qui caractérise le comportement du matériau lors d'un transfert de chaleur. En présence d'un gradient de température d'un degré Kelvin, la conductivité thermique représente la quantité de chaleur qui se propage par conduction thermique par unité de surface et par unité de temps d'un matériau de 1 m d'épaisseur. Elle est notée λ et exprimée en $Wm^{-1}K^{-1}$.

Tout comme le bois ces résidus de biomasse sont anisotropes donc leur conductivité diffère d'une direction à l'autre. Elle dépend de la masse volumique apparente (densité) et de l'humidité à base sèche de la biomasse. En ce qui suit, nous avons déterminé la conductivité thermique transverse à partir de cette formule empirique suivante :

$$\lambda_{radialetransverse} = d(0,200 + 0,0052Hs) + 0,024 \quad (2.14)$$

Avec d la densité apparente (masse volumique apparente de biomasses par rapport à l'eau), les résultats récapitulatifs des propriétés thermo-physiques sont consignés dans le tableau 2.6 suivant.

Tableau 2.6: Les propriétés thermo-physiques des résidus

Résidus	ρ (kg m ⁻³)	Hs (%)	PCS (kJ/kg)	PCI (kJ/kg)	Cp (J.kg ⁻¹ K ⁻¹)	λ (Wm ⁻¹ K ⁻¹)
Coque d'arachide	153	8,65	22 370	21 960	3048,71	0,061
Coque de palmites	523	8,37	17 909	17 523	3525,83	0,151
Coque d'anacarde	359	19,76	24 076	23 563	4637,87	0,133

Ce tableau montre que la coque d'anacarde possède le plus élevé PCI, donc le plus grand potentiel énergétique. La coque d'arachide présente la plus faible chaleur spécifique par rapport aux autres coques, cela signifie qu'elle apporte moins d'énergie pour élever sa température à 1 °C. Cette valeur de Cp de la coque d'arachide est comparable à celle trouvée dans la littérature. Quant à la coque d'anacarde, elle possède une chaleur spécifique élevée différente de celle trouvée dans la littérature (1916 kJ/kg K). Pour la coque de palmiste, elle présente la masse volumique la plus élevée, cette valeur est en accord avec celle trouvée par Traoré et al [14]. Les coques ont toutes le caractère d'isolant thermique. Ces valeurs renvoient la dépendance de la conductivité thermique à la densité apparente, plus celle-ci est importante, plus la conductivité thermique est élevée. Soulignons un taux élevé d'humidité favorise l'apport énergétique du combustible, ce qui nécessite un équipement adapté et sophistiqué pour la valorisation énergétique des coques d'anacarde.

Conclusion

Les résultats de caractérisation des résidus ont montré que ces déchets n'ont pas les mêmes caractéristiques. L'analyse élémentaire et immédiate montre que ces résidus présentent un bon pourcentage de carbone, d'hydrogène et une teneur en matière volatile élevée ce qui favorise la réaction de combustion. Ainsi la détermination de l'humidité de ces résidus indique que la coque d'anacarde possède la plus grande teneur d'humidité (16,49 %), ceci est dû à la grande quantité de baume (CNSL) qu'elle contient, qui se libère lors de son étuvage. Malgré cette humidité, le PCI de la coque d'anacarde demeure sans doute le plus élevé même si les autres coques ont un PCI élevé. La littérature montre que les coques de palmistes ont un grand pouvoir d'absorption de chaleur grâce à non seulement leur masse volumique apparente 523 kg/m³, mais aussi sa conductivité thermique élevée, humidité et capacité massique moyenne, mais également grâce à

leur structure. Enfin les coques d'arachides présentent une faible masse volumique apparente (153 kg/m³), une bonne quantité de fines ce qui défavorise sa densité énergétique d'où la nécessité d'une étape de densification afin d'augmenter son efficacité. Tous les résidus étudiés possèdent un taux de cendres faible par conséquent les risques de corrosion sont limités.

Chapitre 3 : Bilans massique et énergétique de la chaudière Duquenne

Introduction

Les chaudières à combustibles sont très fréquentes dans les centrales thermiques et dans les installations industrielles, en raison de leur système de cogénération. La connaissance de ses caractéristiques et de certains paramètres comme les bilans massique, énergétique sont importants afin de mieux décrire et utiliser ces installations. Dans le cas de notre étude, nous présenterons la chaudière Duquenne avant de penser aux bilans massique et énergétique obtenus dans ce type d'installation.

3.1 Présentation générale

3.1.1 Description de la chaudière Duquenne

L'installation de la SONACOS date depuis 1982, elle est une chaudière conventionnelle à tubes d'eau conçue en acier, en fonte et laines de matelas servant d'isolant. La chaudière Duquenne a une hauteur de 11 m et une largeur égale à 4 m. La chaudière est constituée principalement d'une bache alimentaire, d'un dégazant, d'un économiseur, de ballons, d'un surchauffeur, d'un désurchauffeur, d'une chambre de combustion (foyer), de ventilateurs, de dépoussiéreurs, les ramoneurs, d'une cheminée, de barillets, etc.

- ❖ **La bache alimentaire** : c'est un réservoir de forme cylindrique en tôle d'acier, elle est montée sur un socle calorifugé attaché à une bache dégazant de l'oxygène en son dessus. Elle reçoit et stocke les retours d'eau condensée (ou condensats) et l'eau d'alimentation issue de l'osmose inverse ou de la chaîne déminée qui sert d'appoint. Plus la chaudière débite de vapeur, plus une quantité d'eau équivalente à cette vapeur doit être remplacée à partir de la bache alimentaire. Elle approvisionne la chaudière en eau à une température de 105 °C et sans risque d'interruption grâce aux pompes automatiques.
- ❖ **La bache dégazant** : elle a pour rôle d'éliminer l'oxygène et le dioxygène de carbone dissouts dans l'eau d'alimentation afin de protéger les équipements contre la corrosion du fer et ses alliages. Le procédé de dégazage physique est plus utilisé dans les centrales thermiques, en effet il présente plus d'avantages que le procédé chimique du fait qu'il est basé sur la solubilité des gaz en fonction de la température et la pression.
- ❖ **L'économiseur** : il est constitué de faisceau en tubes (serpentins) en acier frittés, de larges ailettes en fontes ; chaque file calorifugée est soudée à ses extrémités sur un collecteur d'entrée et de sortie d'eau. Les tubes constituant les différentes nappes d'une même file sont reliés entre eux par des coudes. L'économiseur est le lieu de refroidissement des fumées en sortie du foyer, il récupère une

partie de la chaleur dissipée avec les fumées de la combustion pour préchauffer de l'eau d'alimentation. Dans ce procédé, l'économiseur sert à monter considérablement la température de retour (eau) à 160 °C.

- ❖ **Le ballon Duquenne** : il est constitué de deux réservoirs l'un situé à la partie supérieure appelé ballon collecteur (ou ballon de vaporisation) de la chaudière, ce dernier est équipé de cyclones séparateurs et de sécheurs primaires et secondaires qui produisent une vapeur de très haute pureté à une pression de 25 bars et à une température de 370 °C. Et l'autre à la partie inférieure appelé ballon distributeur. Ces deux ballons sont reliés par un faisceau de tubes vaporisateurs. Cet ensemble est en acier. Le ballon comporte des piquages servant des raccordements avec les tuyauteries de vapeur saturée du surchauffeur, au raccordement par manchons à la chambre de combustion, les raccordements d'indication du niveau d'eau et aux soupapes de sécurité. Quant aux tubulures à portées coniques, elles servent des raccordements par manchon avec les tuyauteries d'alimentation des écrans latéraux de la chambre de combustion. À l'intérieur du ballon, il y'a des centrifugeurs qui ont pour but de séparer la vapeur des gouttelettes d'eau en suspension. Toutes les soudures des piquages et tubulures se font à l'arc, intérieurement et extérieurement.
- ❖ **Le surchauffeur** : il est placé au-dessus du foyer dans une cavité délimitée sur les côtés par des écrans latéraux et à l'avant et l'arrière par des tubes de mur d'autel. Ces tubes forment d'abord un nez de voûte, puis des grilles par où les gaz entrent et sortent du surchauffeur. La grille d'entrée, constituée par des tubes vaporisateurs, protège les premières nappes du surchauffeur du rayonnement direct du foyer.
- ❖ **Le désurchauffeur par surface** : situé dans le réservoir inférieur de la chaudière, il permet de régulariser la température de vapeur à la température à la valeur désirée.
- ❖ **La chambre de combustion (foyer ou four)** : elle est une des parties les plus importantes du générateur de par sa fonction et sa taille. Elle a une largeur entre murs de 3,961 m, une profondeur de 3,7 m et une hauteur moyenne devant les faisceaux vaporisateur de 10,700 m. Elle est constituée de panneaux de tubes d'ailettes longitudinales (contour) et d'une grille à gradins mouvants sur lequel brûle le combustible en couche. Les combustibles arrivent sur la grille à l'aide des trémies et goulottes reliant aux alimentateurs, aux distributeurs, mais également des projecteurs pneumatiques qui sont disposés en façade et comportant chacun un papillon de réglage et un déflecteur commandé par volant, qui permet d'agir sur la répartition du combustible dans le foyer. La couche de combustibles est insérée en haut de la grille, souvent à l'aide d'un poussoir, et le

mouvement de la grille fait avancer le combustible vers l'ignition. En bas de la grille, il ne reste plus que les cendres qui sont évacuées dans une fosse. C'est dans la chambre de combustion que s'effectuent les échanges de chaleur les plus intenses (environ 800 à 1000 °C). Compte tenu des températures très élevées, ces échanges se font principalement par rayonnement.

- ❖ **Les ventilateurs** : ils sont aux nombres de quatre ; le ventilateur de tirage qui assure l'évacuation des fumées en créant une dépression suffisante pour vaincre la résistance de la chaudière, du récupérateur et de l'équipement de dépoussiérage, des gaines et pour maintenir une légère dépression dans le foyer. Le ventilateur de soufflage délivre l'air nécessaire à la combustion dans le foyer. Ces deux ventilateurs sont constitués chacun d'un collecteur en tôle d'acier soudé, renforcé par des profilés, d'un vérin de commande d'ouverture, d'une turbine constituée par un ailettage monté sur un disque et une couronne latérale, un arbre en acier un peu dur. Le ventilateur de distribution répartit le combustible sur la grille, il assure une combustion homogène, rapide tout en évitant l'entassement du combustible. Et enfin le ventilateur secondaire ou de barrage qui limite la dépression dans la chambre de combustion pour conserver la stabilité de la flamme afin de ne pas détruire les tubes d'écran contenant de l'eau à chauffer.
- ❖ **Les dépoussiéreurs** : ils sont placés entre la sortie de l'économiseur et l'entrée du ventilateur de tirage. Ils permettent d'éliminer les particules solides contenues dans les fumées, de réduire la teneur en poussière de (7 g/Nm³ à 300 mg/Nm³) et de limiter les rejets de poussières dans l'atmosphère.
- ❖ **La cheminée** : à la sortie du dépoussiéreur, les fumées sont envoyées à la cheminée grâce au ventilateur de tirage.
- ❖ **Les ramoneurs** : ils sont au nombre de trois, avec des tubes à vapeur très longs l'un installés au niveau du surchauffeur, et les ramoneurs paradoxe sont placés dans l'économiseur portant des tubes à vapeur moins longs par rapport au premier. Ils servent à éliminer les dépôts formés sur les tubes et parois afin de faciliter l'échange thermique entre l'eau et la chaleur.
- ❖ **Les barillets** : ils sont au nombre de deux, l'un à haute pression (BHP) reçoit la vapeur séchée, à une température maximale de 370 °C et à une pression de 25 bars du ballon avant de l'envoyer au turbo-alternateur pour en produire de l'électricité. L'autre à basse pression (BBP) c'est dans ce barillet qu'une partie de la vapeur est détendue à 12 bars et à 220 °C avant d'être distribuée dans les différents ateliers de la fabrication (laboratoire, presserie, extraction, dégazeur). Pour sa bonne marche, elle dispose également des pompes d'alimentation en eau à une pression maximale de (35

bars), des capteurs, des électrovannes, des vannes pneumatiques, des vérins des distributeurs pour assurer le système automatique, des soupapes de sécurité, etc. La figure 3.1 suivante résume le schéma de fonctionnement d'une chaudière Duquenne et la figure 3.2 correspond à la photo de celle-ci.

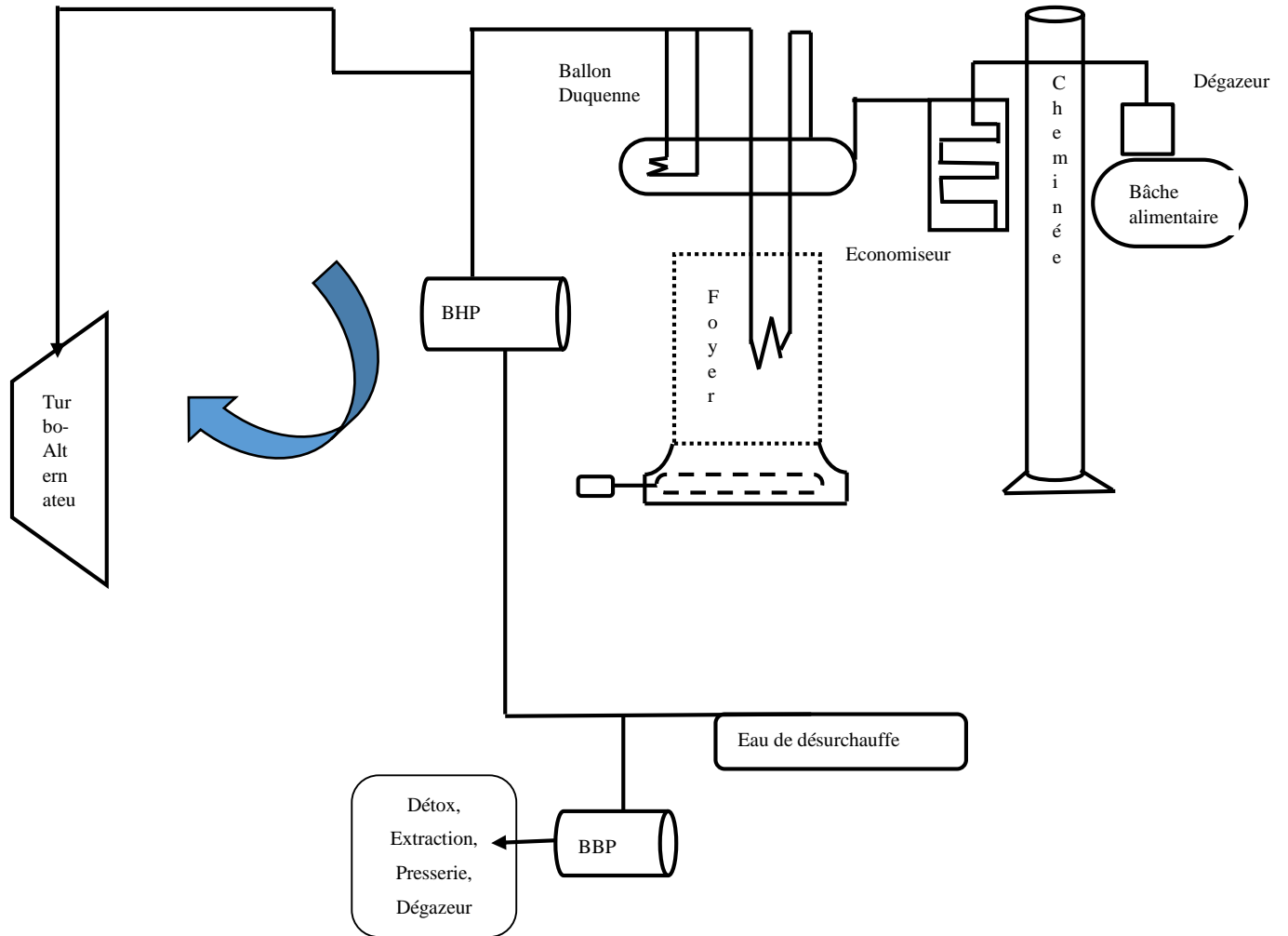


Figure 3.1 : Schéma simplifié de la chaudière Duquenne de la SONACOS



Figure 3.2 : Photo de la chaudière Duquenne

3.1.2 Caractéristiques de la chaudière duquenne

La limite la plus remarquable dans cette chaudière est sur le combustible, malheureusement elle ne peut utiliser que ce type de combustible (coques d'arachide), à cause de l'équipement de sa grille.

Tableau 3.1 : Caractéristiques de la chaudière Duquenne (cas des coques d'arachide)

Paramètres	Résultats
Débit combustible (T/h)	4,25
Débit d'eau (L/h)	250
Débit vapeur (T/h)	21,25
Température d'eau d'alimentation (°C)	105
Température vapeur (°C)	370
Température des fumées (°C)	180
Température ambiante (°C)	30

Ces caractéristiques sont utilisées lorsque tous les ateliers de l'usine fonctionnent en même temps et qu'il y'est aussi la production d'électricité.

3.1.3 Le turboalternateur

- ✓ **La turbine :** la turbine est un dispositif rotatif destiné à utiliser l'énergie cinétique d'un fluide gazeux (vapeur) pour faire tourner un arbre supportant ses aubes. Cette turbine fonctionne selon le cycle thermodynamique de Rankine. Elle est l'une des technologies les plus employées pour la production d'électricité à partir de la vapeur. Cette technique très utilisée dans les industries peut produire une grande quantité d'énergie qui sera transformée en électricité. La turbine est la pièce maitresse de toute centrale à vapeur.
- ✓ **Alternateur :** l'alternateur est un dispositif qui transforme l'énergie mécanique en électricité (du courant alternatif) et fournit à ses bornes une tension alternative. Il est constitué d'une bobine fixe et d'une source de champ magnétique rotative (un aimant ou un électroaimant). L'alternateur exploite un phénomène physique appelé la loi d'induction de Faraday, selon laquelle lorsque l'aimant ou l'électroaimant tourne à ses bornes, la bobine fixe fournit une tension alternative grâce à l'énergie obtenue par la turbine. L'alternateur produit un courant à une tension de 5500 V qui, pour son utilisation, est abaissée jusqu'à 220 V à l'aide d'un transformateur pour qu'il puisse être facilement transporté et distribué dans les différents ateliers.
- ✓ **Le condenseur :** est un grand cylindre monté au-dessous de la turbine, il est constitué de multiples petits tubes sur les deux parties frontales, il est le lieu de refroidissement la vapeur sortie de la turbine et ce phénomène se fait par un échange calorifique. C'est à l'intérieur de ces tubes où est passée l'eau de mer à forte pression, une fois arrivée au condenseur grâce à la pompe guinard ou caprari au même moment que la vapeur détendue par la turbine arrive à l'extérieur de ces tubes. Donc on assiste alors à un échange calorifique. La condensation est facilitée par la création d'un vide partiel qui est assurée sous l'action des trois éjecteurs (démarrage, amont, aval). Le tableau 3.2 suivant montre les données techniques du turbo-alternateur.

Tableau 3.2 : Les caractéristiques techniques du turbo-alternateur

TURBINE A VAPEUR					
Puissance nominale : 5 000 kW			Type : D2Ff34		
Puissance maximale : 6 250 kW			Nbre de tour : 3000Tr/mn		
Pression de vapeur : 24 kg/cm ² (bars)			Température vapeur : 350 °C		
Année : 1957 (BADEN SUISSE)			Marque : BROWN BAVERI		
ALTERNATEUR					
Phase : 3		N° : B 56184		Type : WT 532f	
Puissance : 10 000 KVA				3 000 Tr/mn	50 Hz
				Excitation	
Tension(V)	Intensité(A)	Cos ϕ		Tension(V)	Intensité(A)
6 900	836	0,8		130	270
Dynamo					
N° : B 56184			Type : GFT 36		
Tension(V)	Excitation	Intensité(A)	Puissance (kW)	Continue	Tr/mn
125	125	273	34		3 000
143		310	45	30	3 000

La figure ci-dessous résume le principe de production de la vapeur et de l'électricité.

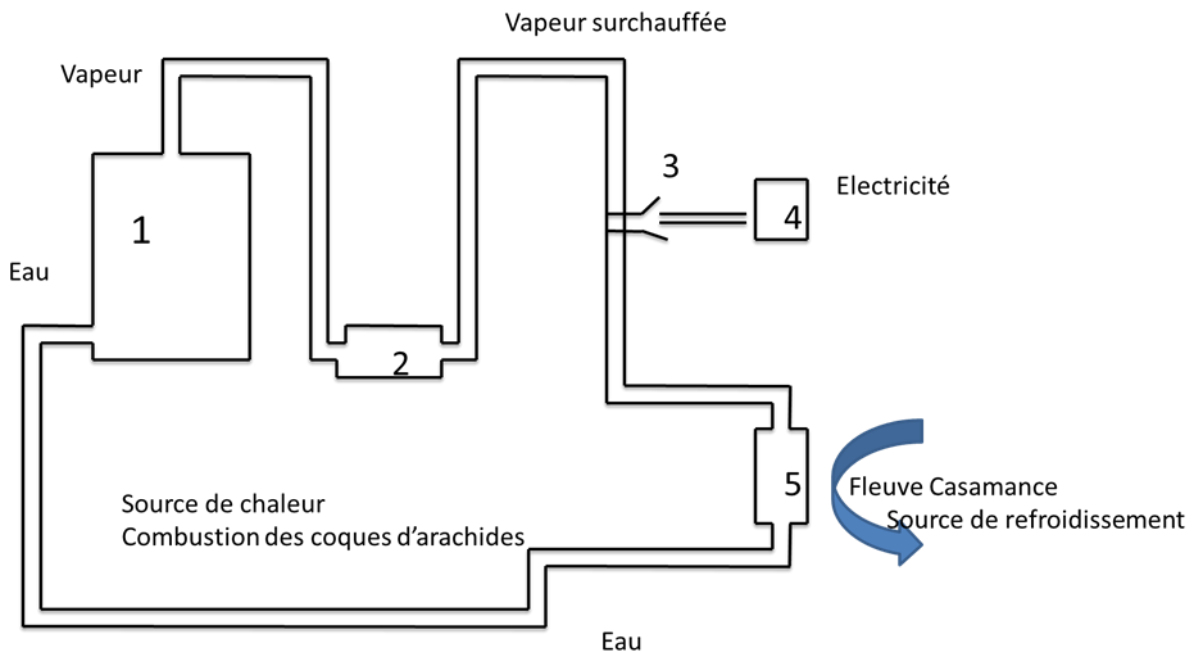


Figure 3.3 : Principe de production d'électricité

Ce schéma résume les différentes étapes du processus de production de l'électricité. L'eau introduite dans la chaudière (1) est chauffée, puis s'évapore sous l'effet de la chaleur. Afin

d'augmenter sa température, cette vapeur est passée dans le surchauffeur (2) ; la vapeur ainsi surchauffée est ensuite dirigée vers la turbine (3). En y passant, elle entraîne un arbre de transmission qui est relié à l'alternateur (4). Dans l'alternateur, le mouvement de l'arbre est converti en énergie électrique.

Une fois que la vapeur sort de la turbine, il est nécessaire de la liquéfier. Pour ce faire, cette vapeur traverse le condenseur (5) qui la refroidit par l'eau provenant du fleuve Casamance par l'intermédiaire d'une pompe appelée pompe Guinard. Enfin, l'eau (condensat) revient alors dans la chaudière (bâche alimentaire) pour entamer un nouveau cycle.



Figure 3.4 : Photo du turbo-alternateur

3.2. Bilan de l'installation

Dans cette partie nous allons déterminer les bilans massique, thermique et énergétique de la chaudière, lorsque le combustible est de la coque d'arachide, puis nous utiliserons deux autres types de coques (palmistes et anacarde) afin d'évaluer et de comparer leur rentabilité en termes de chaleur et d'électricité.

3.2.1 Le bilan massique

Le bilan massique nous permet de connaître la consommation de combustibles. Cette partie joue un rôle très important dans la modélisation d'une installation d'incinération/combustion, en utilisant le modèle de Massard [15]. Nous allons d'abord déterminer la quantité de solide dans chaque type de coques (équation 3.1), puis la quantité d'imbrûlés (équation 3.2) et enfin nous pourrions calculer la quantité de solides réellement brûlée par heure à partir de l'équation (3.3).

La proportion de solides contenu dans la quantité totale de combustibles (coques) par heure est donnée par l'équation suivante :

$$\dot{Q}_s = \dot{D}_c - \dot{Q}_e \quad (3.1)$$

Pour une fraction d'incombustibles connue, on obtient un débit d'imbrûlés égal à :

$$\dot{Q}_i = \dot{Q}_s \times F_i \quad (3.2)$$

Et le débit de combustibles à brûler est alors :

$$\dot{Q}_c = \dot{Q}_s - \dot{Q}_i \quad (3.3)$$

Pour bien mener nos calculs, nous avons utilisé quelques paramètres définis dans le tableau ci-dessous.

Tableau 3.3 : Définitions et unités de quelques paramètres utilisés

Paramètres	Définitions	Unités	Modes
\dot{Q}_s	Débit de solide dans le combustible	T/h	Calcul
\dot{D}_c	Débit combustible	T/h	SONACOS
\dot{Q}_e	Débit eau dans le combustible	T/h	Calcul
\dot{Q}_{ce}	Débit cendres dans le combustible	T/h	Calcul
F_e	Fraction de l'eau	-	Calcul
\dot{Q}_i	Débit d'imbrûlés dans le combustible	T/h	Calcul
F_{ce}	Fraction de cendres	-	Calcul
F_i	Fraction d'imbrûlés	-	Calcul

À la SONACOS, la chaudière fonctionne en régime continu et que tous les ateliers fonctionnent.

✓ Coques d'arachide

Le débit \dot{D}_c indique la quantité de coques d'arachide introduite dans la chambre de combustion pendant une heure, il est exprimé en tonnes par heure et vaut 4,25.

Le débit \dot{Q}_e (quantité) d'eau contenue dans les coques d'arachides et est donnée par la formule suivante :

$$\dot{Q}_e = \dot{D}_c \times F_e \quad (3.4)$$

La fraction d'incombustible représente le débit (quantité) d'imbrûlés lors de la combustion du combustible, elle s'obtient par :

$$F_i = \frac{F_{ce}}{1 - F_e} \quad (3.5)$$

La fraction d'eau représente l'humidité du combustible, elle est déterminée expérimentalement au laboratoire. (Chapitre 2, (2.2.4)) elle est donnée par la formule (2.6) :

$$F_e = \frac{m_h - m_s}{m_s} \times 100$$

$$F_e = 7,82 \%$$

La fraction de cendres est équivalente au taux de cendres du combustible.

$$F_{ce} = 5,74 \%$$

En substituant (3.4) dans (3.1) ; (3.6) et (3.5) dans (3.2), on obtient l'équation suivante :

$$\dot{Q}_s = \dot{D}_c - \left(\dot{D}_c \times F_e \right) \quad (3.6)$$

En substituant successivement (3.6) et (3.5) dans (3.2), l'équation finale devient :

$$\dot{Q}_c = \left[\dot{D}_c - \left(\dot{D}_c \times F_e \right) \right] \left[1 - \frac{F_{ce}}{1 - F_e} \right] \quad (3.7)$$

A.N :

$$\dot{Q}_c = \left[4,25 - (4,25 \times 0,078) \right] \left[1 - \frac{0,057}{1 - 0,078} \right] = 3,67 T / h$$

Ainsi nous pouvons en déduire la quantité de cendre obtenue lors de la combustion :

$$\dot{Q}_{ce} = \dot{Q}_c \times F_{ce} \quad (3.8)$$

$$\text{A.N : } Q_{ce} = 3,67 \cdot 10^3 \times \frac{5,74}{100} = 0,210 T = 210 \text{ kg}$$

✓ Coques de palmiste

En ce qui concerne la coque de palmiste, la SONACOS utilisait deux (2) bennes par (8 heures de temps). Nous avons déterminé la masse de coques en calculant d'abord le volume de la benne (camion) dont les dimensions sont : 5,24 m de longueur, 2,45 m de largeur et 1,70 m de hauteur.

$V = L \times l \times h = 21,825 \text{ m}^3$. Or la masse volumique apparente des coques de palmiste vaut 523 kg/m^3 .

D'où $M = 2V \times \rho$

$M = 2V \times \rho = 22\,828,95 \text{ kg} = 22,828 \text{ T}$ par huit heures donc le débit de coques de palmiste vaut $2,85 \text{ T/h}$.

$$F_e = 7,72 \%$$

$$F_{ce} = 1,2 \%$$

En suivant les mêmes démarches et en utilisant les mêmes équations que précédemment, nous avons trouvés les quantités de coques de palmiste brûlées et de cendres générées suivantes :

$$\text{A.N : } Q_c = \left[2,85 - \left(2,85 \times \frac{7,72}{100} \right) \right] \left[1 - \frac{0,012}{1-0,0772} \right] = 2,59 \text{ T/h}$$

$$\text{A.N : } Q_{ce} = 2,5910^3 \times \frac{1,2}{100} = 0,03108 \text{ T} = 31,08 \text{ kg}$$

✓ Coques d'anacarde

En suivant le même raisonnement que celui de la coque de palmiste, nous trouvons la consommation massique des coques d'anacarde pour huit heures :

$M = 15\,670,35 \text{ kg} = 15,67 \text{ T}$ par huit heures d'où le débit massique horaire est de $1,95 \text{ T/h}$.

$$F_e = 16,49 \%$$

$$F_{ce} = 3,7 \%$$

Ainsi nous trouvons les quantités de coques d'anacarde brûlées et de cendres générées suivantes :

$$\text{A.N : } Q_c = \left[1,95 - \left(1,95 \times \frac{16,49}{100} \right) \right] \left[1 - \frac{0,037}{1-0,01649} \right] = 1,57 \text{ T/h}$$

$$\text{A.N : } Q_{ce} = 1,5710^3 \times \frac{3,7}{100} = 0,05809 \text{ T} = 58,09 \text{ kg}$$

Ainsi, nous pouvons évaluer la consommation journalière de la SONACOS pour les trois types de coques. Les résultats de cette évaluation sont consignés dans le tableau 3.4 suivant.

Tableau 3.4 : Récapitulatif des résultats du bilan massique de la chaudière Duquenne

Résidus	\dot{D}_c (T/j)	\dot{Q}_c (T/j)	\dot{Q}_{ce} (T/j)
Coques d'arachide	102	88,08	5,04
Coques de palmiste	68,40	62,16	0,75
Coques d'anacarde	46,80	37,68	1,39

L'analyse du tableau 3.4 montre les estimations de la consommation journalière des trois coques. Nous remarquons que la consommation journalière de la coque d'anacarde est moins importante que celle des autres types de coques. En effet, la quantité de coques d'arachide consommée par

jour est deux fois plus importante que celle d'anacarde et sa quantité en cendres est plus élevée que celle des autres coques. Ensuite il vient la coque de palmiste qui demeure le second combustible et qui n'est pas utilisée aujourd'hui pourtant plus économique que la coque d'arachide. La coque de palmiste a moins de cendres par rapport les autres types de coques.

3.2.2 Le bilan thermique et énergétique

3.2.2.1 La combustion

La combustion est une réaction auto-entretenue entre un carburant (combustible) et comburant (air) caractérisé par une flamme et un dégagement de chaleur. La combustion peut être lente ou rapide, complète ou non. Quand la réaction est complète, les produits de cette réaction sont des solides résiduels qui sont des matériaux inertes (cendres, mâchefers et les gaz chauds d'incombustibles) et la chaleur est généralement utilisée pour chauffer de l'eau. Les caractéristiques de combustion d'un combustible sont définies à partir de son équation de combustion complète réalisée sans défaut ni excès d'air. Ces caractéristiques sont le pouvoir comburivore, le pouvoir fumigène. La connaissance de ces caractéristiques est non seulement indispensable pour le fonctionnement de la chambre de combustion, mais également pour son contrôle effectué à partir de l'analyse des fumées. Cependant la pratique en industrie est d'utiliser un surplus d'air afin d'assurer la combustion complète. Les combustibles sont de types biomasse, ils sont constitués principalement de C, H, O donc leur formule brute peut être écrite comme suit, $C_x H_y O_z$. Les indices molaires x, y et z peuvent être déterminés à partir des pourcentages massiques correspondants, tout en connaissant la masse molaire moyenne.

Indice molaire de carbone

$$x = \frac{\%C \times Mc}{12 \times 100} \quad (3.9)$$

Indice molaire d'hydrogène

$$y = \frac{\%H \times Mc}{1 \times 100} \quad (3.10)$$

Indice molaire d'oxygène

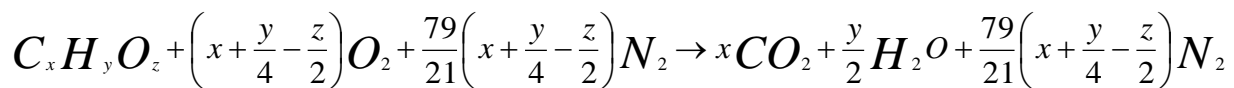
$$z = \frac{\%O \times Mc}{16 \times 100} \quad (3.11)$$

Les équations donnant les caractéristiques de la combustion des combustibles définies à partir de la réaction de combustion sont exprimées en fonction des pourcentages massiques des éléments

chimiques constituants ces combustibles. Ces équations nous permettent de déterminer la plupart du temps les indices du composé, sa masse molaire moyenne et les pouvoirs comburivore et fumigène. Autrement dit, vue que l'évaluation de la masse molaire moyenne du combustible suppose la connaissance au préalable de leur composition chimique sous forme moléculaire, à savoir la nature et les proportions relatives de tous ses éléments constitutifs chimiques. Cependant l'accès à cette grandeur est expérimentalement difficile dans la plupart des combustibles d'origine naturelle. En supposant toujours que le combustible appartient à la famille des biomasses lignocellulosiques, on a alors la masse molaire moléculaire du combustible :

$$M_c = (12x + y + 16z) \times 10^{-3} \text{ kg / mol} \quad (3.12)$$

Ainsi l'équation de la combustion neutre s'écrit :

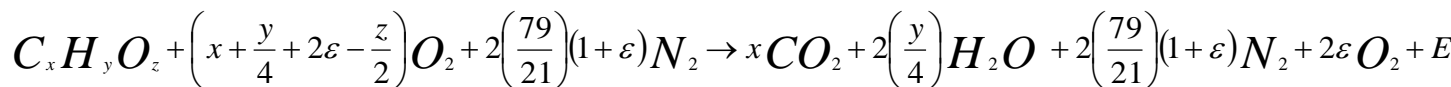


(3.13)

Il convient de noter que l'oxygène impliqué dans la structure du combustible participe à l'oxydation de la matière organique. Ceci a pour conséquence de réduire le volume de dioxygène de l'air théorique nécessaire pour brûler un kg de combustible.

En effet la combustion étant une combustion industrielle (four), donc elle est réalisée avec de l'air, il serait intéressant de connaître le volume d'air, et excès d'air nécessaire.

L'équation de la combustion complète du combustible avec l'excès d'air est alors :



(3.14)

Les seuls produits principaux de la combustion sont le dioxyde de carbone (CO₂), de l'eau (H₂O), la chaleur et le diazote provenant de l'air utilisé et éventuellement des protoxydes d'azote tels NO, NO₂, le dioxyde de soufre SO₂, l'oxygène O₂ et les imbrûlés solides ou gazeux. La masse molaire atomique de ces éléments (C, H, O) sont respectivement : 12 10⁻³ kg, 1 10⁻³ kg, 16 10⁻³ kg.

- La nature et composition de l'air comburant : le comburant est l'air atmosphérique dont la composition massique et volumique est donnée dans le tableau 3.5 suivant.

Tableau 3.5 : Les Proportions massique et volumique de l'air comburant

Constituant	% en Masse	% en Volume
O ₂	24	21
N ₂	76	79

Le combustible étant complexe, afin de simplifier son étude, nous supposons que la combustion est neutre ou stœchiométrique en Nm³ pour un kg de combustible solide.

- Le pouvoir comburivore est le volume d'air nécessaire à la combustion neutre

$$V_a = \frac{1}{y_{O_{2a}}} \left(V_{CO_2} + V_{SO_2} + \frac{V_{H_2O}}{2} - V_{O_2} \right) \quad (3.15)$$

- Rappelons que pour l'air, $y_{O_{2a}}$ est compris entre 0,21 et 1 pour certaines applications industrielles à l'air suroxygéné et $y_{O_{2a}} = 0,211$ pour l'oxygène.

- D'après [16] un gaz occupe $22,4 \times 10^{-3}$ Nm³ dans les CNTP et que la masse molaire moyenne du combustible est inconnue donc le calcul de V_a peut aussi s'effectuer à partir de la composition élémentaire, exprimée en pourcentage massique, en utilisant les relations (3.9, 10 et 11) et la formule (3.13). On a :

$$V_a = \frac{79}{21} \times \left(\frac{22,4 \times \%C}{12 \times 100} + \frac{22,4 \times \%H}{4 \times 100} + \frac{22,4 \times \%O}{32 \times 100} \right) \quad (3.16)$$

Ainsi en tenant compte qu'une mole de gaz carbonique consomme une mole d'oxygène pour se former, de même pour le dioxyde de soufre (SO₂) et pour l'eau il faut par contre une demi-mole d'oxygène. Nous avons les équations de combustion des éléments C, S et H suivantes :



Puisque nous sommes dans le cas d'un four (chambre de combustion), donc nous posons $y_{O_{2a}} = 0,21$ et en fonction des volumes occupés d'espèces gazeuses, l'équation (3.15) devient alors :

$$V_a = \frac{1}{0,21} \left(V_{CO_2} + V_{SO_2} + \frac{V_{H_2O}}{2} - V_{O_2} \right) \quad (3.20)$$

Le combustible étant les coques d'arachide et en se référant au tableau (2.2) du chapitre précédent on trouve les volumes suivants :

$$V_{CO_2} = 1,054 \text{ Nm}^3/\text{kg} ; V_{H_2O} = 0,370 \text{ Nm}^3/\text{kg} ; V_{O_2} = 0,248 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

D'où $V_a = 4,719 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ de coques d'arachide.

- Le pouvoir fumigène

C'est le volume de fumées libérées pendant la combustion d'un kg de combustible.

$$V_{FH} = V_{FS} + V_{H_2O} + V_H \quad (3.21)$$

Or

$$V_{FS} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + (1 - y_{O_2a}) V_a \quad (3.22)$$

$$V_{FS} = 4,806 \text{ Nm}^3/\text{kg} \text{ de coques d'arachide}$$

Le combustible ne possède pas de soufre $V_{SO_2} = 0$; $V_{N_2} = 0,024 \text{ Nm}^3/\text{kg}$

$$V_{FH} = 5,254 \text{ Nm}^3/\text{kg} \text{ de coques d'arachide.}$$

En utilisant les mêmes hypothèses et équations sur les deux autres types de combustibles (coques de palmiste et d'anacarde) nous trouvons les résultats consignés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 3.6 : Les pouvoirs comburivore et fumigène des résidus

Combustibles	V_a (Nm ³)	V_{FS} (Nm ³)	V_{FH} (Nm ³)
C.arachide	4,719	4,806	5,254
C. palmiste	4,645	4,717	5,213
C.anacarde	4,843	4,888	5,451

La détermination des pouvoirs comburivore et fumigène (humide et sèche) permet de déterminer la teneur en CO₂ dans les fumées dégagées pendant la combustion des trois types de coques pour les comparer à celle produite par la source fossile qui est aussi utilisée par l'entreprise. Elle permet également d'envisager les risques potentiels de corrosion de la chaudière, de pollutions atmosphériques, mais aussi d'affiner les réglages de la combustion afin d'améliorer le rendement. Puisque nous sommes dans le cas de la valorisation énergétique, le comburant (air) est en excès et cet excès d'air est estimé à 36 % d'après les données techniques du constructeur [17].

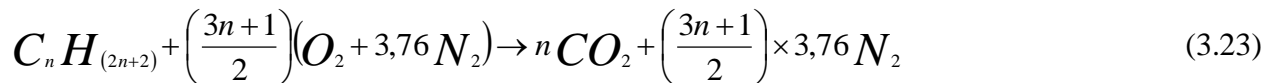
$$\gamma_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{V_{FS} + \varepsilon V_a} = \frac{1,054}{4,806 + (0,36 \times 4,719)} \times 100 = 16$$

$$\gamma_{CO_2} = 16\%$$

Le gasoil est le principal fuel utilisé pour l'alimentation des groupes électrogènes de la SONACOS. Afin d'être à l'abri des changements climatiques, nous avons fait une étude comparative de la teneur en CO₂ des résidus de biomasse (coques d'arachide, de palmiste et d'anacarde) avec celle du gasoil.

Détermination de la teneur en CO₂ du gasoil.

Le gasoil peut être assimilé à un hexadécane (n=16). Considérons donc l'équation de la combustion des alcanes :



La masse de CO₂ rejetée est de 16 × 44 = 704 g, tandis que la masse d'une mole d'hexadécane est de 226 g.

Donc le rapport CO₂ émis en fonction de la consommation de gasoil est alors 704/226 = 3,16.

Sachant que la masse volumique du gasoil est de 850 kg/m³ (0,85 kg/l) et qu'un gramme de gasoil brûlé rejette 3,16 grammes de CO₂, il vient : 0,85 × 3,16 = 2,67 kg de CO₂ par litre de gasoil consommé. Or la consommation journalière d'un groupe électrogène alimentant un atelier de puissance moyenne 215 kW est de 1 551 L. Donc la masse de CO₂ rejetée par cet atelier est de 172,54 kg soit 4 % par heure. Cependant si la Sonacos utilisait les groupes électrogènes pour le démarrage la consommation de gasoil serait beaucoup plus importante de même que les rejets de CO₂.

Le tableau 3.6 contient quelques paramètres intéressants trouvés sur les tables. À côté, de ces paramètres il y'a la teneur en CO₂ et les PCI des trois coques qui sont déterminés par calcul. Ces valeurs sont déterminées tout en considérant que toutes les coques sont étudiées dans les mêmes conditions de température ambiante, même température de fumées, avec un même débit d'eau d'alimentation. Nous avons comparé ces paramètres avec ceux du combustible fuel, le gasoil.

Tableau 3.7 : Comparaison de quelques paramètres des résidus

Éléments	Définitions paramètres	Unités
Coques d'arachide	D _c : Débit	4,25 T/h
	T _a : Température	30 °C
	PCI : Pouvoir calorifique inférieur	21 960 kJ/kg
Fumées	T _f : Température	180 °C
	Teneur en CO ₂	16 %
Eau d'alimentation	D _e : Débit	250 L/h
	T _e : température d'entrée	160 °C
	T _s : température de sortie	350 °C
Coques de palmiste	D _c : Débit	2,85 T/h
	PCI : Pouvoir calorifique inférieur	17 523 kJ/kg
	Teneur en CO ₂	15 %
Coques d'anacarde	D _c : Débit	1,95 T/h
	PCI : Pouvoir calorifique inférieur	23 563 kJ/kg
	Teneur en CO ₂	15 %
Gasoil	Consommation spécifique	0,30 l/kWh
	PCI : Pouvoir calorifique inférieur	44 800 kJ/kg
	Teneur en CO ₂	4 %

À travers ce tableau, nous avons constaté que la coque d'arachide a le plus grand débit massique, et une teneur en oxyde de carbone élevée dans les fumées par rapport aux autres types de coques. Par ailleurs, comparé au gasoil, le PCI du gasoil est plus élevé que celui des résidus de biomasse. Ceci peut être expliqué par le fait que les résidus ont une teneur moyenne en carbone, en hydrogène et plus en oxygène vis-à-vis à celle des combustibles fossiles (gasoil).

3.3.2.2 Le bilan thermique et énergétique

▪ Le bilan thermique

Dans les installations de chaudières, toutes les formes d'énergies mises en jeu sont généralement négligeables devant l'énergie thermique. Par conséquent les bilans énergétiques se réduisent à des bilans thermiques. La réalisation de bilan permet d'effectuer des calculs de puissance thermique à fournir à une installation ou à évacuer d'une installation, et aussi permet la détermination de pertes thermiques. Pour cela, appliquons aux bilans thermiques le principe de conservation de l'énergie entre l'entrée et la sortie de l'installation en se référant à la figure (3.4).

Afin de simplifier les calculs, nous considérons les données techniques de la SONACOS ci-contre :

- ✓ 4,25 T/h de combustibles (coques d'arachide) produisent 21,25 T/h de vapeur surchauffée (1T coques équivaut à 5 T de vapeur surchauffée) ;
- ✓ 46,7 % de cette vapeur est transformée en électricité.

Pour ce faire, nous avons commencé d'abord par évaluer les différentes pertes rencontrées dans ce type de chaudière, car les énergies entrantes sont supposées connues.

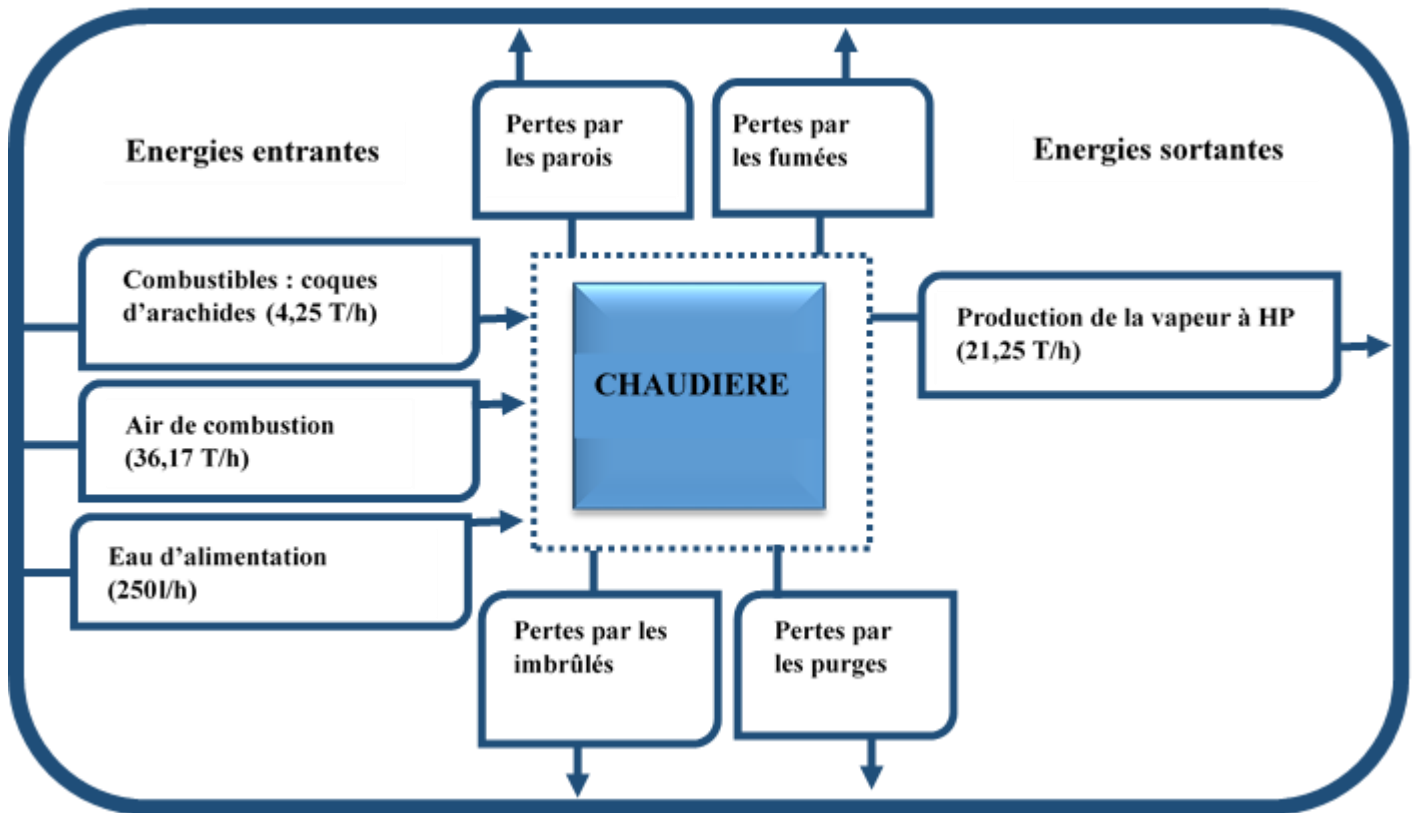


Figure 3.5 : Bilan thermique du système chaudière Duquenne

Le système chaudière nous permet d'évaluer les énergies entrantes (le combustible qui est de la coque d'arachide, l'air de combustion et l'eau d'alimentation) et les énergies sortantes que sont toutes les différentes pertes y compris la production de la vapeur.

Ainsi nous pouvons écrire : Énergie entrante = Énergie perdue + Énergie sortante.

- Énergie entrante : la puissance absorbée générée par la combustion du combustible ; elle est donnée par :

$$P_a = PCI \times \dot{D}_c \quad (3.19)$$

$$P_a = 25\,925 \text{ kW}$$

➤ Énergie sortante : la puissance utile

L'eau entre dans le ballon avec une température (T_e) de 160 °C, puis elle se vaporise (T_v) à la température de 179 °C et le surchauffeur élève la température de celle-ci jusqu'à 350 °C, noté (T_s); cette vapeur est considérée comme un gaz parfait. La définition et les résultats des différents paramètres utilisés sont consignés dans le tableau suivant.

Tableau 3.8 : Définitions des paramètres utilisés pour le calcul de la puissance utile

Paramètres	Définitions	Résultats
D_e (L/h)	Débit de l'eau d'alimentation	250
L_v (kJ/kg)	Chaleur latente de l'eau	2 013
C_{pl} (kJ/kg)	Capacité massique de l'eau	4,185
C_{pv} (kJ/kg)	Capacité massique de la vapeur	1,61
T_e (°C)	Température d'entrée de l'eau	160
T_v (°C)	Température de vaporisation de l'eau	179
T_s (°C)	Température de sortie de la vapeur	350

On obtient alors :

$$P_u = \dot{D}_c C_{pl} (T_v - T_e) + D_e L_v + \dot{D}_e C_{pv} (T_s - T_v)$$

$$P_u = [(250 \times 4,185) (179 - 160)] + (250 \times 2013) + [(250 \times 1,61) (350 - 179)]$$

$$P_u = 24\,644 \text{ kW}$$

▪ **Le rendement**

Le rendement est en général donné par le rapport entre l'énergie utile et l'énergie consommée. L'énergie utile est la chaleur qui sert à chauffer le fluide. Le rendement d'une chaudière exprime sa capacité à récupérer l'énergie de son combustible pour la restituer au circuit de chauffage. Cependant cette énergie n'est pas totalement récupérée par le fluide que l'on veut chauffer, une partie de celle-ci étant utilisée par les différents mécanismes. D'après les normes françaises et européennes, le PCI est considéré comme référence de calcul de rendement. Pris en une unité de masse (ou de volume) de combustible et sans tenir compte de l'énergie de la chaleur latente que l'on peut récupérer dans les fumées et les différentes pertes, le rendement énergétique s'exprimera ainsi en pourcentage de l'énergie directe produite par le combustible. Le rendement global de la chaudière est alors donné par :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} \quad (3.22)$$

Ainsi tout calcul fait, nous obtenons : $\eta = 95 \%$.

Évaluons les différentes pertes qui ne sont pas tenues en comptes pour ainsi connaître le rendement réel de la chaudière. Dans ce cas précis, les estimations de pertes utilisées sont tirées de la revue de littérature pour ce type de chaudière, ces valeurs sont consignées dans le tableau 3.9 ci-dessous.

Tableau 3.9 : Définitions et résultats des différentes pertes [17]

Paramètres (%)	Définitions	Résultats
P_f	Pertes de chaleur par les fumées	6,9
P_{purges}	Pertes par les purges	2,5
P_{parois}	Pertes de chaleur par les parois	1,06
$P_{\text{imbrûlés}}$	Pertes par les imbrûlés	6,2
X	Coefficient qui varie avec le combustible	0,74

- Les pertes par les fumées représentent la chaleur emportée par les gaz chauds, cette quantité de chaleur est proportionnelle au volume de fumées. Il existe deux types de pertes de chaleur par des fumées : pertes en chaleur sensible (température des fumées) et pertes en chaleur latente (pertes de vapeur d'eau). Elles peuvent être déterminées à partir d'abaque, de la capacité calorifique des fumées, des enthalpies spécifiques des composants des fumées ou encore par les formules empiriques (de Siegert). Dans cette formule, T_f est la température des fumées et vaut $180 \text{ }^\circ\text{C}$, T_a température ambiante $30 \text{ }^\circ\text{C}$, D_{mf} débit massique des fumées égale à $11,5 \text{ kg/s}$ et C_f capacité massique des fumées qui vaut 1043 J/kgK et γ_{CO_2} égale à 16, trouvé dans la littérature. Ainsi, la teneur en oxyde de carbone des fumées.

$$Q_f = \frac{x(T_f - T_a)}{\gamma_{CO_2}} = \frac{0,74(453 - 303)}{16} = 6,9\% \quad (3.20)$$

$$P_f = D_m \times C_f (T_f - T_a) \quad (3.21)$$

$$P_f = 1799 \text{ kW}$$

- Les pertes par les purges : ces pertes sont issues de la chaleur sensible des purges et des retours de condensats.

$$P_{\text{purgés}} = P_u \times \% Q_{\text{purgé}} \quad (3.22)$$

$$P_{\text{purgés}} = 616 \text{ kW}$$

- Les pertes par parois : elles dépendent de la température moyenne de l'eau de la chaudière, de la configuration de cette dernière, mais aussi de son état d'isolation).

$$P_{\text{parois}} = P_u \times \% Q_{\text{parois}} \quad (3.23)$$

$$P_{\text{parois}} = 261 \text{ kW}$$

- Les pertes par imbrulés : elles correspondent à la quantité d'incombustibles.

$$P_{\text{imbrulés}} = P_u \times \% Q_{\text{imbrulés}} \quad (3.24)$$

$$P_{\text{imbrulés}} = 1527 \text{ kW}$$

Le schéma suivant résume les différentes pertes de la chaudière.

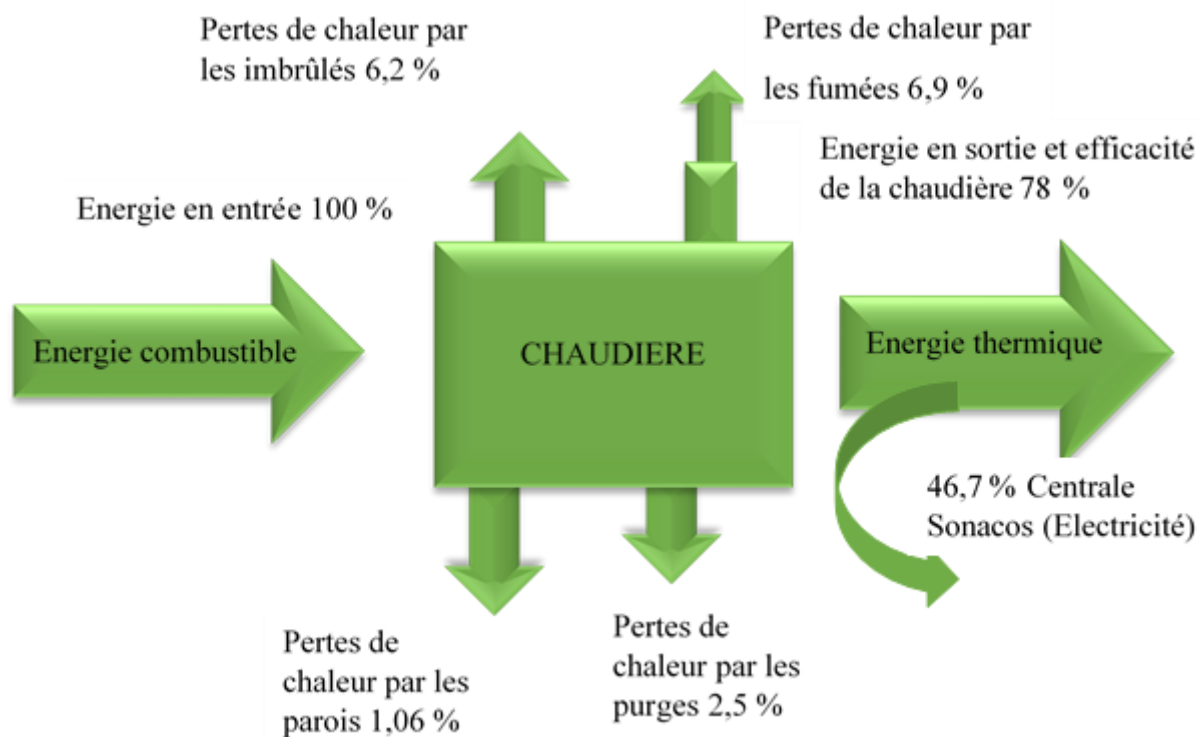


Figure 3.6 : Résumé de l'évaluation des pertes de la chaudière Duquenne

Cette figure montre que les pertes sont estimées à 17 %. En réalité le rendement global de la chaudière sera donc égal à 78 % en tenant compte de toutes ces pertes. Cette valeur du rendement est inférieure au rendement du constructeur (86 %). Cette situation s'explique par l'importance des

différentes pertes de chaleur qui sont négligées à la SONACOS, mais aussi l'âge de l'installation. D'après les calculs, nous remarquons que les pertes par les fumées et les pertes par imbrûlés sont les plus importantes, donc elles peuvent avoir une grande influence sur le rendement de la chaudière. Ces pertes peuvent être dues d'un mauvais réglage de circulation d'air, l'état physique du combustible, etc. Les fumées emportent beaucoup de chaleur, car l'économiseur retient moins la chaleur contenue dans les fumées. Nous constatons aussi des pertes par les parois à cause des fuites dans les tuyauteries. Toutes ces pertes impactent la rentabilité de la chaudière qui pourra dépasser 100 % (revue de littérature).

Pour réduire les pertes par fumées et imbrûlés, il faut maîtriser l'excès d'air périodiquement, afin d'éviter la combustion incomplète. Pour les pertes par parois nettoyer régulièrement les surfaces d'échanges calorifiques, mettre en place un bon isolant sur les parois et enfin pour les pertes par purges, la vapeur peut être récupérée par insertion d'un séparateur de phase (vase de pré-vaporisation).

- **Le bilan énergétique**

Le bilan énergétique est une étape importante dans une installation de chaudière. Ce bilan permet d'établir un lien entre la puissance thermique, la puissance électrique et permet ainsi de déterminer la quantité de vapeur transformée en électricité. Par ailleurs, nous nous sommes amusés à déterminer les puissances électriques des autres types de coques qui ne sont certes pas valorisées à la SONACOS, mais qui possèdent de bons potentiels énergétiques et c'est dans le but de les comparer avec ceux de la coque d'arachide.

Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau 3.10 suivant.

Tableau 3.10 : Comparaison des résultats en terme énergétique des résidus

Valeurs calculées	PCI (kJ/kg)	D _c (T/h)	P _E (kWh)
Coques d'arachide	21 960	4,25	25 925
Coques de palmiste	17 523	2,85	13 872
Coques d'anacarde	23 563	1,95	12 763
Valeurs SONACOS (Coques d'arachide)	-	4,25	1 596

D'après les calculs, nous constatons que les coques de palmistes et d'anacarde sont beaucoup plus rentables que celle d'arachide en termes de production d'énergie. En effet, nous remarquons une grande différence entre les trois types de coques. Ceci peut être expliqué par le fait que lors de la combustion des coques d'arachide, il y'a des particules volantes, la flamme n'est pas dans une même direction et le taux d'imbrûlés est plus élevé. En conséquence, ceci peut réduire la production de chaleur.

Notre modèle d'étude basé sur des calculs a permis d'évaluer des besoins horaires de la chaudière, tout en utilisant et en respectant les résultats de mesures des différents paramètres fournis par la SONACOS et par le laboratoire de Chimie et de Physique des Matériaux (LCPM) de l'université Assane Seck de Ziguinchor. Les résultats de notre étude sont comparables à ceux trouvés sur les tables (FIVES-CAIL BABCOCK). Cependant, les valeurs calculées restent légèrement différentes des résultats actuels de la Sonacos basés sur des formules à titre indicatif et sur des hypothèses, etc. Cette différence des résultats peut être expliquée par la différence de méthode, mais aussi par le fait l'usine ne prend pas en compte les pertes ; ainsi leur production énergétique a fortement baissé.

Conclusion

L'unité de valorisation énergétique des déchets par combustion de la SONACOS nous a permis de mieux comprendre les procédés de transformations des combustibles en énergie. Les multiples pertes notées (pertes par combustion, pertes par parois et pertes liées à l'arrêt) ont une influence sur le bilan énergétique global. En plus de ces pertes (non tenue en compte dans le bilan de la SONACOS), la chaudière qui est au cœur de ce processus de production d'énergie, connaît beaucoup de pannes récurrentes (pannes de grille, pompe, moteurs, élévateurs, alimentateurs, compresseurs, etc.) il faut donc corriger ces distorsions afin d'augmenter les performances de la chaudière et ainsi accroître son rendement dans un premier temps. Dans un second temps, cette valorisation des coques (biomasse) pourra participer à la promotion des énergies renouvelables, à la fourniture d'électricité aux populations via un renouvellement de la convention de vente d'énergie entre SONACOS et Senelec ; ce qui contribuerait davantage à réduire la dépendance énergétique de la Senelec vis-à-vis des énergies fossiles et pourrait amorcer une prise de conscience à ce niveau pour une valorisation des résidus agricoles, produits localement.

Conclusion générale et perspectives

L'énergie est un des points cruciaux pour le fonctionnement d'une industrie comme la SONACOS. Les énormes quantités de déchets industriels, agricoles et ménagers demeurent sans doute une voie prometteuse de diversification des sources d'énergie.

La présente étude vise donc à illustrer le processus de production de l'électricité à partir des coques d'arachide à la SONACOS. Après avoir fait une étude de caractérisation (masse volumique apparente, analyse élémentaire, humidité, taux de cendres, indice de matières volatiles, pouvoir calorifique, capacité thermique massique, conductivité thermique) des différentes coques. La détermination du bilan énergétique de la chaudière de la Sonacos a été réalisée à partir des calculs de débits des différentes coques.

À l'issue de ces résultats, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

Sur le plan de la caractérisation :

- La coque d'arachide demeure aujourd'hui, l'unique combustible utilisé à la SONACOS. Cependant cette coque possède une faible masse volumique apparente donc une densité énergétique faible et la matière première disponible devient d'année en année de plus en plus inférieure aux besoins de l'entreprise. En plus, une grande quantité des coques est poussiéreuse ce qui nécessite plus de prétraitement avant leur utilisation (densification, pellets pour améliorer l'apport énergétique).
- Les coques de palmiste servaient de combustibles à la SONACOS, durant les années 1995. Cependant, elles ne sont plus utilisées aujourd'hui à cause de leur rareté, mais aussi à cause d'absence de technologie adéquate.
- La coque d'anacarde présente une humidité plus élevée que celle des autres déchets, mais également un important PCI d'où un grand potentiel (car disponible en grandes quantités dans la région) de valorisation avec une technologie adaptée (en effet la SONACOS a testé la valorisation de la coque d'anacarde, mais elle ne l'utilise pas à cause du manque d'équipements adéquat pour sa valorisation).
- Les taux de matières volatiles, les capacités thermiques et les conductivités thermiques que possèdent ces trois types de coques sont appréciables.

En termes de bilans massique et énergétique :

- Le rendement de la chaudière Duquenne est inférieur au rendement à titre indicatif, qui est d'environ 90 % (revue de la littérature).

- Plus la consommation des coques est importante, plus la production de vapeur est favorisée. À la suite de ce travail, nous proposons à la SONACOS de diversifier les sources de combustibles. En ce sens, il serait ainsi très intéressant d'augmenter leur production énergétique et sa vente en valorisant tous les autres résidus agricoles (les tiges de mil, de maïs, balle de riz, et les coques de cajou et de palme.) et forestiers (feuilles mortes, copeaux de bois, etc.) ; et améliorant ainsi leurs performances technologiques. Mais aussi de disposer d'un laboratoire équipé pour la détermination de la composition chimique (élémentaire) des cendres et d'analyser les fumées. En effet, ces cendres issues de la combustion peuvent être utiles pour d'autres applications (amendement des terres, lutte contre la salinisation) (fabrication de cellules photovoltaïques si les cendres sont riches en silicium). Enfin, dans la détermination du rendement de la chaudière et pour une meilleure exploitation, SONACOS doit tenir en comptes des pertes de chaleur dont la quantité devient de plus en plus importante du fait de la vétusté de l'installation.

En perspective à notre travail, il serait intéressant d'approfondir les recherches sur les propriétés thermodynamiques et technologiques de la valorisation énergétique de la coque d'anacarde, vu ses potentielles énergétiques et l'augmentation exponentielle de sa production dans les régions de la Casamance. Il serait intéressant aussi d'approfondir les recherches sur la composition chimique afin de mieux connaître l'utilité des cendres issues de la valorisation de cette coque.

Références bibliographiques

- [1] IEA International energy agency (2014). Key word energy statistics www.iea.org.
- [2] ADEME agence de l'environnement de la maîtrise d'énergie (2001). Cirad-observer, pyrolyse et gazéification de la biomasse pour la production d'électricité.
- [3] Denise, Oléagineux Corps Gras. Lipides- (Sept/Oct 98). Rapport final, Étude d'impact et de danger ICS (DAMES AND MOORE, 25 mars 1998).
- [4] Alleau, C. (2011). Chaudière à vapeur à combustible.
- [5] Tuene Talla, F. (2013). Étude et élaboration d'une politique de maintenance préventive d'une chaudière industrielle.
- [6] R, C., Rullier, N., Ricau, P. (April to October 2015). Analysis of cashew production, processing and trade in Africa.
- [7] Akien, G., Qi, L., and Horváth, I.T., (2010). Thermochemical conversion of biomass to liquid fuels and chemicals, chapter 14.
- [8] Michel, R. (2009). Gazéification catalytique du *Miscanthus X giganteus* et vapo-reformage d'un composé modèle : production de gaz de synthèse Thèse de Doctorat.
- [9] Diédhiou, A. (2017). Étude hydrodynamique et valorisation énergétique par transformation thermochimique de déchets de biomasse pour l'alimentation d'une briqueterie, Vladimir (2013). Thèse de Doctorat
- [10] Richard, T. and Trautmann, N. (202). Substrate composition table, Cornell University, Ithaca, NY.14853, www.cfe.cornell.edu/compost, composition élémentaire de la coque d'arachide. ;
- [11] Irfan, M. F., Arash, A. N., Mohamed, H. C., Wan, M. A. W. D., Usman, M. R. (2002). Kinetics of gasification of coal biomass and their blends in air (N₂/O₂) and different Oxyfuel (O₂/CO₂) atmosphere, 37 (1) 663-672.
- [12] Himbane, P. B. (2016). Caractérisation dynamique d'un lit de coques d'arachide, d'anacarde, de palme en rotation dans un tambour tournant, Mémoire de Master.
- [13] Diémé, K. (2013). Valorisation énergétique des coques d'arachide et de palmistes à la Suneor de Ziguinchor, Mémoire de Master.

- [14] Traoré, Y., Messan, A., Tsobnang, F., Gérard, J. (2014). Influence du traitement des coques de noix de palme sur les propriétés physico-mécaniques des bétons légers. MATÉRIAUX 2014, 24-28 novembre 2014, Colloque 01 Ecomatériaux.
- [15] Massard, F.(1997). Aide-mémoire du thermicien Elsevier P :255,257,287-288.
- [16] Sawerysyn, J.P. (2012). La combustion du bois et impacts sur la qualité de l'air.
- [17] FIVES-CAIL-Babcock