

REPUBLIQUE DE COTE D'IVOIRE
Union - Discipline – Travail

**MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**



Institut National Polytechnique
Félix HOUPHOUËT-BOIGNY de Yamoussoukro



Ecole Doctorale Polytechnique

N° d'ordre : 110 / 2022

THÈSE

Pour l'obtention du grade de

DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE FELIX HOUPHOUËT-BOIGNY

Mention : Energétique et Environnement

Spécialité : Bioénergie

Thème :

Etude de la production d'électricité à partir d'une centrale thermique de 5 MW utilisant de la biomasse : cas des résidus des cultures de riz, café et cacao provenant de Kodaya.

Présentée et soutenue publiquement le **12 Avril 2022** par

ZINLA Bi Tra Désiré

JURY

M. YAO Kouassi Benjamin	Professeur Titulaire, INP-HB	Président
M. GBAHA Prosper	Maître de Conférences, INP-HB	Directeur de thèse
M. AKA Boko	Professeur Titulaire, UNA	Rapporteur
M. FASSINOU Wanignon Ferdinand	Maître de Conférences, UFHB	Rapporteur
M. ORI Théophile Roch	Maître de Conférences, UFHB	Examineur

A feu mon père, Boli bi Zinla,

A ma mère, Boue lou Irié

A mes filles, Grâce Auréane, Marie-Emmanuella et Yoana Marilda

REMERCIEMENTS

Nous exprimons notre profonde gratitude et nos sincères remerciements aux membres du jury qui ont bien voulu évaluer ce travail et à toutes les personnes qui nous ont guidés dans sa réalisation, en particulier :

Monsieur **YAO Kouassi Benjamin**, Professeur Titulaire, Directeur de l'Ecole Doctorale Polytechnique (EDP) de l'Institut National Polytechnique Félix Houphouët Boigny de Yamoussoukro (INP-HB), Directeur du Laboratoire des Procédés Industriels et de Synthèse de l'Environnement (LAPISEN) de l'Institut National Polytechnique Félix Houphouët Boigny de Yamoussoukro (INP-HB), pour avoir accepté de présider le jury de cette thèse. Veuillez trouver ici, le témoignage de notre profonde reconnaissance.

Monsieur **AKA Boko**, Professeur Titulaire, Directeur de l'Institut de Recherche sur les Energies Nouvelles (IREN) de l'Université Nangui Abrogoua d'Abidjan, et Monsieur **FASSINOU Wanignon Ferdinand**, Maître de conférences, à l'Unité de Formation et de Recherche des Sciences des Structures de la Matière et Technologie (UFR-SSMT) de l'Université Félix Houphouët Boigny d'Abidjan, pour avoir accepté de juger ce travail en tant que rapporteurs. Nous vous remercions pour l'honneur que vous nous avez fait.

Monsieur ORI Théophile Roch, Maître de conférences, à l'Unité de Formation et de Recherche des Sciences des Structures de la Matière et Technologie (UFR-SSMT) de l'Université Félix Houphouët Boigny d'Abidjan, qui nous a fait l'honneur d'être examinateur de cette thèse. Qu'il en soit grandement remercié.

Monsieur **GBAHA Prosper**, Maître de conférences, au Département de Formation et de Recherche Génie Mécanique et Energétique (DFR-GME) de l'Institut National Polytechnique Félix Houphouët Boigny de Yamoussoukro (INP-HB), notre Directeur de Thèse, qui a bien voulu nous proposer ce sujet et a également guidé nos réflexions tout au long de ces années de recherche. Nous le remercions pour la confiance qu'il nous a accordée, pour ses encouragements, et pour tout le temps qu'il nous a consacré pour venir à bout de ce travail.

Monsieur KOFFI Ekoun Paul Magloire, Maître de conférences, au Département de Formation et de Recherche Génie Mécanique et Energétique (DFR-GME) de l'Institut National Polytechnique

Félix Houphouët Boigny de Yamoussoukro (INP-HB), votre esprit de recherche et vos compétences nous ont éclairés plusieurs voies. Vous avez fait preuve de la plus grande disponibilité à notre égard. Nous apprécions votre rigueur, votre simplicité et votre grande modestie.

Monsieur **KOUA Kamenan Blaise**, Maître Assistant, à l'Unité de Formation et de Recherche des Sciences des Structures de la Matière et Technologie (UFR-SSMT) de l'Université Félix Houphouët Boigny d'Abidjan, vos compétences et vos remarques constructives, nous ont guidés pour la réalisation de cette thèse. Vous avez fait preuve de la plus grande disponibilité à notre égard. Nous vous prions de trouver ici le témoignage de notre profonde reconnaissance.

Nous ne pouvons terminer ces remerciements sans témoigner notre gratitude à la direction de l'École Doctorale Polytechnique.

RÉSUMÉ

Face à l'épuisement des ressources fossiles et au réchauffement climatique, l'avenir de la planète dépend de l'exploitation de sources d'énergie propres et renouvelables. En Côte d'Ivoire, la biomasse, dont les ressources sont abondantes, apparaît comme la filière idéale de substitution aux combustibles fossiles pour la production d'électricité. Le pays envisage alors d'introduire dans son mix énergétique, la biomasse issue des résidus agricoles et agro-industriels. C'est dans ce contexte que cette étude s'est intéressée à la valorisation énergétique des résidus des cultures de riz, café et cacao d'une zone rurale. Ainsi, la balle de riz, la paille de riz, la coque de café et le cortex de cacao provenant de Kodaya, un village situé à environ 75 kilomètres de Buyo, son chef-lieu de région, et à environ 490 kilomètres d'Abidjan; plus précisément dans la région de la Nawa, au sud-ouest de la Côte d'Ivoire, et leurs mélanges sont analysés pour être utilisés comme combustibles d'une centrale thermique de 5 MW utilisant la biomasse pour produire de l'électricité.

D'abord des analyses chimiques et thermochimiques effectués sur des échantillons ont permis de déterminer les caractéristiques thermochimiques des différents résidus. Ensuite, les analyses énergétiques et exergétiques d'un modèle de l'installation thermique à vapeur ont servi à caractériser les mélanges utilisables des résidus de culture. Enfin, les performances environnementales du procédé de production d'électricité ont été évaluées à l'aide d'une analyse du cycle de vie (ACV).

Mots clés : Bioénergie, Biomasse, Résidus de culture, Centrale thermique à biomasse, ACV.

ABSTRACT

Faced with the depletion of fossil resources and global warming, the future of the planet depends on the exploitation of clean and renewable energy sources. In Côte d'Ivoire, biomass, whose resources are abundant, appears to be the ideal alternative to fossil fuels for electricity production. The country is therefore considering introducing biomass from agricultural and agro-industrial residues into its energy mix. It is in this context that this study looked at the energy recovery of rice, coffee and cocoa crop residues in a rural area. Thus, rice husk, rice straw, coffee husk and cocoa pod husk from Kodaya, a village located about 75 kilometers from Buyo, its regional capital, and about 490 kilometers from Abidjan; more precisely in the Nawa region, in the south-west of Côte d'Ivoire, and their mixtures are analysed to be used as fuel for a 5 MW thermal power plant using biomass to produce electricity.

First, chemical and thermochemical analyses of samples were carried out to determine the thermochemical characteristics of the different residues. Secondly, energy and exergy analyses of a model steam plant were used to characterize the usable mixtures of crop residues. Finally, the environmental performance of the electricity generation process was assessed using a life cycle assessment (LCA).

Keywords: Bioenergy, Biomass, Crop residues, Biomass power plant, LCA.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE 1 : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	7
Introduction	7
1.1 Présentation du système électrique ivoirien	8
1.1.1 Ressources énergétiques.....	8
1.1.2 Moyens de production.....	8
1.1.3 Offres et accès à l'électricité	9
1.2 Présentation des cultures	10
1.2.1 Description botanique	10
1.2.1.1 Riz	10
1.2.1.2 Caféier	11
1.2.1.3 Cacaoyer.....	12
1.2.2 Milieux écologiques	13
1.2.3 Pratiques agronomiques	14
1.2.3.1 Riziculture	14
1.2.3.2 Caféiculture	15
1.2.3.3 Cacao culture.....	15
1.2.4 Résidus des cultures de riz, café et cacao.....	16
1.3 Biomasse	17
1.3.1 Définition	17
1.3.2 Ressources	18
1.3.3 Propriétés thermochimiques.....	18
1.3.3.1 Analyse élémentaire	19
1.3.3.2 Analyse immédiate.....	19
1.3.3.3 Analyse des cendres	20
1.3.3.4 Pouvoir calorifique.....	20
1.4 Procédés de conversion de la biomasse en électricité	21
1.4.1 Combustion	22
1.4.2 Gazéification	22
1.4.3 Digestion anaérobie.....	23
1.5 Performance des déchets agricoles.....	23
Conclusion.....	24
CHAPITRE 2 : CARACTERISATION DES RESIDUS.....	26
Introduction	26
2.1 Présentation de la zone d'étude	27
2.1.1 Situation géographique.....	27
2.1.2 Disponibilité des résidus	28
2.2 Méthodologie	30
2.2.1 Matériels.....	30

2.2.2	Méthodes	33
2.2.2.1	Préparation des résidus	33
2.2.2.2	Analyse immédiate	33
2.2.2.3	Analyse élémentaire	36
2.2.2.4	Pouvoir calorifique supérieur	37
2.2.2.5	Analyse des cendres	37
2.3	Résultats et discussion	37
2.3.1	Analyse immédiate	37
2.3.2	Analyse des cendres	39
2.3.3	Analyse élémentaire et pouvoir calorifique supérieur	42
	Conclusion	45
CHAPITRE 3 : CARACTERISATION DES MELANGES UTILISABLES		47
	Introduction	47
3.1	Méthodologie	48
3.1.1	Matériels	48
3.1.2	Méthodes	51
3.1.2.1	Caractéristiques thermochimiques des mélanges	51
3.1.2.2	Analyse énergétique du modèle de la centrale thermique	52
3.1.2.3	Analyse exergétique du modèle de la centrale thermique	56
3.2	Résultats et discussion	58
	Conclusion	71
CHAPITRE 4 : ANALYSE ENVIRONNEMENTALE		74
	Introduction	74
4.1	Méthodologie	75
4.1.1	Définition des objectifs et du champ d'étude	76
4.1.1.1	Objectif de l'étude	76
4.1.1.2	Frontière du système	77
4.1.2	Analyse de l'inventaire	78
4.1.2.1	Production des cultures	79
4.1.2.2	Collecte des résidus de culture	84
4.1.2.3	Transport des résidus de culture	85
4.1.2.4	Combustion des résidus de culture	86
4.1.3	Évaluation des impacts environnementaux	90
4.1.3.1	Procédure	90
4.1.3.2	Définitions des impacts	90
4.2	Résultats et discussion	93
4.2.1	Impacts environnementaux	93
4.2.1.1	Eutrophisation	94
4.2.1.2	Toxicité humaine	95
4.2.1.3	Acidification	96
4.2.1.4	Réchauffement climatique	96
4.2.2	Analyse de sensibilité	98
4.2.3	Réduction des polluants environnementaux	99

Conclusion.....	101
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	103
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	107
ANNEXE I : Principales caractéristiques du système électrique ivoirien au 31 décembre 2020 (ANARE-CI, 2020).....	122
ANNEXE II : Récapitulatif des centrales isolées par région administrative	124
ANNEXE III : Zones de production des cultures en Côte d’Ivoire	125
ANNEXE IV : Processus de production des résidus de cultures	128
ANNEXE V : Technologies des chaudières à biomasse.....	129
ANNEXE VI : Types de turbines à vapeur	133
ANNEXE VII : Fiches d’enquête.....	135
ANNEXE VIII : Page d’accueil THERMOPTIM.....	136
ANNEXE IX : Page d’accueil d’OpenLCA 1.10.3.....	137
ANNEXE X : Modèles des procédés sous OpenLCA	138
ANNEXE XI : Analyse économique	142

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1. Indicateurs relatifs à l'accès à l'électricité.	10
Tableau 2.1. Analyse immédiate (% en masse) des résidus agricoles	38
Tableau 2.2. Composition élémentaire (% en masse) des cendres des résidus agricoles	40
Tableau 2.3. Température de fusion des principaux oxydes de la biomasse agricole	41
Tableau 2.4. Analyse élémentaire (% en masse) et PCS (MJ/kg) des résidus agricoles.....	42
Tableau 2.5. Analyse élémentaire (% en masse) et PCS (MJ/kg) du charbon.....	45
Tableau 3.1. Propriétés thermodynamiques de la vapeur d'eau de l'installation.....	51
Tableau 4.1. Inventaire des engrais et pesticides du cacaoyer pour 1kWh.....	80
Tableau 4.2. Inventaire des engrais et pesticides de la rizière pour 1 kWh.	82
Tableau 4.3. Inventaire des engrais et pesticides du caféier pour 1 kWh.	83
Tableau 4.4. Énergie consommée par la collecte des résidus pour la production de 1 kWh .	85
Tableau 4.5. Énergie consommée par le transport des résidus pour la production de 1kWh	85
Tableau 4.6. Quantité des différents polluants émis par kWh.	88
Tableau 4.7. Caractéristiques énergétiques des résidus des cultures	89
Tableau 4.8. Quantité de <i>CO2</i> produite par la combustion des résidus pour 1 kWh.	89
Tableau 4.9. Résultats des impacts environnementaux pour 1 kWh d'électricité	93

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1-1. Répartition de la production électrique par source énergétique	9
Figure 1-2. Plante du riz	11
Figure 1-3. Caféier et ses fruits	12
Figure 1-4. Cacaoyer et ses fruits	13
Figure 1-5. Résidus des cultures de riz, café et cacao disponibles en milieu rural.	17
Figure 1-6. Principaux procédés de conversion de la biomasse en électricité	21
Figure 2-1. Carte de la région de la Nawa.....	28
Figure 2-2. Périodes de disponibilité des différents résidus de culture	30
Figure 2-3. Matériel d'analyse immédiate / INP-HB.....	31
Figure 2-4. Analyseur Elementar Vario Micro cube / Université de Montpellier	32
Figure 2-5. Dispositif d'analyse des cendres / PETROCI.....	32
Figure 2-6. Dispositif de microanalyse avec détection chromatographique	36
Figure 2-7. Spectres EDS des cendres de la paille de riz et de la balle de riz, et leurs compositions élémentaires	40
Figure 2-8. Spectres EDS des cendres du cortex de cacao et de la coque de café, et leurs compositions élémentaires	41
Figure 3-1. Modèle de l'installation motrice à vapeur	49
Figure 3-2. Modèle de l'installation motrice à vapeur sous le logiciel Thermoptim	50
Figure 3-3. Corrosion dans la chaudière lors de la combustion de la biomasse.....	59
Figure 3-4. Mélanges de la balle de riz avec la paille de riz : Evolutions des teneurs des principaux composants des cendres et des teneurs en chlore	60
Figure 3-5. Mélanges de la balle de riz avec la paille de riz : Evolutions des débits de combustibles et des rendements exergetiques	61
Figure 3-6. Mélanges de la coque de café avec le cortex de cacao : Evolutions des teneurs des principaux composants des cendres et des teneurs en chlore .	63

Figure 3-7. Mélanges de la coque de café avec le cortex de cacao : Evolutions des débits de combustibles et des rendements exergetiques	63
Figure 3-8. Mélanges de la paille de riz avec le cortex de cacao : Evolutions des teneurs des principaux composants des cendres et des teneurs en chlore .	65
Figure 3-9. Mélanges de la paille de riz avec la coque de café : Evolutions des débits de combustibles et des rendements exergetiques	65
Figure 3-10. Mélanges de la balle de riz avec le cortex de cacao : Evolutions des teneurs des principaux composants des cendres et des teneurs en chlore .	67
Figure 3-11. Mélanges de la balle de riz avec le cortex de cacao : Evolutions des débits de combustibles et des rendements exergetiques.....	67
Figure 3-12. Mélanges de la balle de riz avec la coque de café : Evolutions des teneurs des principaux composants des cendres et des teneurs en chlore .	69
Figure 3-13. Mélanges de la balle de riz avec la coque de café : Evolutions des débits de combustibles et des rendements exergetiques	69
Figure 3-14. Mélanges de la paille de riz avec la coque de café : Evolutions des teneurs des principaux composants des cendres et des teneurs en chlore .	70
Figure 3-15. Mélanges de la paille de riz avec la coque de café : Evolutions des débits de combustibles et des rendements exergetiques	71
Figure 4-1. Étapes d'une Analyse du Cycle de Vie	76
Figure 4-2. Frontières du système de production de l'électricité	78
Figure 4-3. Cycle du carbone	87
Figure 4-4. Contribution des étapes du procédé à l'eutrophisation	94
Figure 4-5. Contribution des étapes du procédé à la toxicité humaine	95
Figure 4-6. Contribution des étapes du procédé à l'acidification.....	96
Figure 4-7. Contribution des étapes du procédé au réchauffement climatique	97
Figure 4-8. Émissions de GES par sources d'énergies	98
Figure 4-9. Émissions de GES en fonction de la distance parcourue.....	99

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ACV	Analyse du cycle de vie
ANARE-CI	Autorité Nationale de Régulation du Secteur de l'Électricité de Côte d'Ivoire
PCI	Pouvoir Calorifique Inférieur
PCS	Pouvoir Calorifique Supérieur
PETROCI	Société Nationale d'opérations Pétrolières de Côte d'Ivoire
PH	Potentiel Hydrogène
LCA	Life Cycle Assessment
ISO	International Standardization Organization
ICV	Inventaire du Cycle de Vie
UF	Unité fonctionnelle
CML	Canonical Maximum Likelihood
CEDEAO	Communauté Economique des Etats de l'Afrique de l'Ouest
INP-HB	Institut National Polytechnique Houphouët Boigny
LAPISEN	Laboratoire des Procédés Industriels, de Synthèse, de L'Environnement et des Energies Nouvelles
ASTM	American Standards of Technical Material
NF EN	Norme Française European Norm
PCDD	dibenzodioxines chlorées
PCDF	dibenzofurannes polychlorés
HF	Acide fluorhydrique
HCFCs	Hydrochlorofluorocarbone
BP	Basse pression
HP	Haute pression
HC	hydrocarbures
PM	Micro particule
USEPA	United States Environmental Protection Agency
PRG	Pouvoir de Réchauffement Global
RSNC	Réduction Sélective Non Catalytique

RSC	Réduction Sélective Catalytique
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (France)
RGPH	Recensement Général de la Population et de l'Habitat
HVO	Hydrotreated Vegetable Oil (Huile végétale hydrogénée)
DDO	Distillate Diesel Oil
GO	Gas-Oil
COV	Composé Organique Volatile
TAG	Turbine à Gaz
TAV	Turbine à Vapeur

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

Grandeurs physiques

MW	Mégawatt
MJ	Mégajoule
Kg	Kilogramme
m/s	Mètre par seconde
m/s ²	Mètre par seconde carré
J/kg.K	Joule par kilogramme kelvin
K	Kelvin
J/kg	Joule par kilogramme
g	Gramme
mm	Millimètre
cm	Centimètre
t	Tonne
ha	Hectare
kWh	Kilowattheure
t/ha	Tonne par hectare
MJ/kg	Mégajoule par kilogramme
°C	Degré Celsius
mg	Milligramme
kg/kWh	Kilogramme par kilowattheure
g/mol	Gramme par mole
km	Kilomètre
MJ/litre	Mégajoule par litre
ml	Millilitre

Eléments chimiques

Ca	Calcium
K	Potassium
Zn	Zinc
Pb	Plomb
Hg	Mercure
Cd	Cadmium
P	Phosphore
C	Carbone
H	Hydrogène
O	oxygène
S	Soufre
N	Azote
Cl	Chlore
PO_4^{3-}	Ion phosphate
SO_2	Dioxyde de soufre
CO_2	Dioxyde de carbone
CH_4	Méthane
SO_x	Oxyde de soufre
NO_x	Oxyde d'azote
H_2O	Eau
$C_6H_{12}O$	Glucose
O_2	Dioxygène
HCl	Acide chlorhydrique
SO_2	Dioxyde de soufre
SO_3	Trioxyde de soufre
N_2	diazote
NO_2	Dioxyde d'azote
NO_3	Trioxyde d'azote
NO	Monoxyde d'azote

NH ₃	Ammoniac
N ₂ O	Protoxyde d'azote
CFC	Chlorofluorocarbone
Mg	Magnésium
H ₂	Dihydrogène
CO	Monoxyde de carbone
SiO ₂	Dioxyde de silicium
Al ₂ O ₃	Alumine
FeO	Oxyde de fer
CaO	Oxide de calcium
MgO	Oxyde de magnesium
Na ₂ O	Oxyde de sodium
K ₂ O	Oxyde de potassium
V ₂ O ₅	Oxyde de vanadium ou pentoxyde de vanadium
TiO ₂	Dioxyde de titane
MnO	Monoxide de manganese
Fe ₂ O ₃	Oxyde de fer (III)
CoO	Monoxyde de cobalt
PbO	Monoxyde de plomb
CuO	Oxyde de cuivre (II)
P ₂ O ₅	Pentoxyde de phosphore
CaO	Oxyde de calcium

Symboles

Symboles	Signification	Unité
η	Rendement	
η_{En}	Rendement énergétique	
η_{ex}	Rendement exergetique	
E_X	Exergie	kW
m	Masse	kg
\dot{m}	Débit massique	kg/s
c	Vitesse	m/s
Z	Altitude	m
g	Accélération gravitationnelle	m/s ²
h	Enthalpie spécifique	kJ/kg
s	Entropie spécifique	kJ/kg/K
T	Température	K
ϕ	Facteur multiplicateur	
\dot{W}	Puissance mécanique	kW
\dot{Q}	Quantité de Chaleur/puissance thermique	kW
w	Taux d'humidité	
A	Teneur en cendre	
m_v	Teneur en matière volatile	
c_f	Teneur en carbone fixe	
M	Masse molaire	g/mol
t	Temps	Heure
$P_{ét}$	Puissance électrique	kW
ψ	Caractéristique thermochimique	

INTRODUCTION GENERALE

1. Contexte

L'électricité étant un besoin vital dans les sociétés modernes ; tous les pays désirent en produire en abondance et à moindre coût pour le bien-être de leurs populations. Mais, cette production d'électricité se devra d'être respectueuse des normes environnementales et aussi préserver les ressources énergétiques naturelles pour les générations futures.

Ainsi, en Afrique de l'ouest, les gouvernements commencent à investir dans les projets d'énergie renouvelables. Parmi ceux-ci, la biomasse est considérée comme une des sources d'énergie renouvelable les plus prometteuses de par son potentiel important.

En effet, dans cette partie du continent, il existe de grandes quantités de résidus associés à la production agricole (*Titiloye et al., 2013*). Celles de la Côte d'Ivoire sont estimées à environ 4,3 millions de tonnes d'équivalent pétrole par an. La valorisation des résidus agro-industriels de ce pays est principalement effectuée par des scieries et des industries agroalimentaires pour la production de chaleur et d'électricité pour satisfaire leurs propres besoins (*Koua et al., 2015*). Cependant, les résidus des cultures de riz, café et cacao disponibles dans les zones rurales du pays ne font pour l'instant l'objet d'aucune valorisation dans le secteur de l'électricité. C'est pourquoi cette thèse s'intéresse à l'utilisation de ces résidus de cultures provenant de Kodaya pour la production d'électricité à partir d'une centrale thermique à biomasse de 5 MW.

2. Problématique

Face à la forte croissance démographique et au développement économique, la Côte d'Ivoire fait face à une augmentation de sa consommation énergétique. Dans le secteur de l'électricité, la production est passée de 5876 GWh en 2010 à 10615 GWh en 2019. La production de cette énergie électrique est dominée par l'utilisation du gaz naturel, dont la contribution est estimée à environ 67,04% du mix énergétique. Cependant, depuis 2010, la totalité de gaz naturel extrait du sous-sol ivoirien est insuffisant pour satisfaire les besoins de production électrique du pays (*ANARE-CI, 2019*). Pourtant, outre son épuisement inéluctable, l'exploitation du gaz naturel est à l'origine de l'émission de nombreux polluants environnementaux engendrant des dégâts écologiques. En effet,

la combustion du gaz naturel dans les centrales électriques est à l'origine de l'émission de gaz à effet de serre, qui engendrent le réchauffement de la planète.

Il faut noter aussi que malgré tous les efforts consentis par le pays dans le secteur de l'électricité, environ 31% des 8513 localités ne sont pas encore connectées au réseau électrique. Pourtant, l'absence d'accès à l'électricité, est l'un des obstacles majeurs à l'amélioration des conditions socio-économiques des populations des zones rurales. Selon Van Gevelt (2014), l'électrification rurale contribue à une augmentation significative des revenus des ménages ruraux et à une amélioration considérable de la qualité de vie dans les villages. Ces améliorations des conditions sociales et économiques des populations rurales sont observables par la modernisation et la mécanisation de l'agriculture, par une expansion d'activités non agricoles et l'accès aux nouvelles technologies.

Enfin, en tant que pays leader dans le domaine de l'agriculture, la gestion actuelle des résidus post récoltes reste problématique pour l'environnement. En effet, après la récolte des cultures, les déchets agricoles sont pour la plupart abandonnés pour une décomposition à l'air libre ou brûlés à ciel ouvert dans les plantations. Cependant, selon Saidur et al. (2011), l'incinération à ciel ouvert ou le stockage de résidus agricoles, libère des constituants et des cendres toxiques dans l'environnement atmosphérique et les eaux souterraines.

3. Justification du choix des résidus des cultures de riz, café et cacao

La Côte d'Ivoire est le premier producteur mondial de fèves de cacao depuis quatre décennies. Le pays est également le septième producteur mondial de café robusta. En 2019, il a produit en moyenne 2180 000 tonnes de fèves de cacao et 67 697 tonnes de café vert. Aussi, le riz y est la première céréale consommée, environ 60 kg par habitant par an. En 2016, la production rizicole du pays a permis de couvrir 52% de sa consommation en riz estimée à environ 2 591 624 tonnes (Ducroquet et al, 2017 ; FAOSTAT, 2021). Ainsi, les zones rurales productrices de ces cultures disposent d'énormes quantités de résidus post-récoltes. Pourtant ces résidus ne font pour l'instant l'objet d'aucune valorisation énergétique dans le secteur de l'électricité.

Aussi, des études révèlent que des résidus des cultures de riz, de café et de cacao possèdent des caractéristiques thermochimiques pouvant faire d'eux de bons combustibles d'une centrale

thermique à biomasse. En effet, selon la littérature, les pouvoirs calorifiques supérieurs de la paille de riz, de la balle de riz, de la coque de café et du cortex de cacao sont compris entre 12,33 MJ/kg et 18,56 MJ/kg. Le pouvoir calorique supérieur (PCS) étant une propriété indiquant le contenu énergétique d'une biomasse donnée ; ces résidus de cultures peuvent être brûlés pour produire de la chaleur puis de l'électricité à partir d'une centrale thermique. Aussi, leurs faibles concentrations en azote, en soufre et en chlore, indiquent que leur impact environnemental est moindre que celui des combustibles fossiles, lorsqu'ils sont brûlés dans des chaudières (*Titiloye et al., 2013 ; Mhilu, 2014 ; Martínez-Ángel et al., 2015; Quispe et al., 2016*).

4. Justification du choix de la zone rurale, KODAYA

En Côte d'Ivoire, la riziculture est pratiquée dans toutes les régions. Cependant, le café et le cacao sont majoritairement cultivés dans les régions du centre-ouest, de l'ouest et du Sud-Ouest du pays.

Situé au sud-ouest de la Côte d'Ivoire, la région de la NAWA est le premier producteur national de cacao et le cinquième producteur national de café. Le riz y est également cultivé en abondance pour l'alimentation domestique des populations. Dans la région, les importantes plantations de café et de cacao sont situées dans les départements de Soubré, Méagui et Buyo (*La Nawa, 2018*).

Situé à environ 75 kilomètres de Buyo, son chef-lieu de région, et à environ 490 kilomètres d'Abidjan, capital économique; plus précisément dans la région de la Nawa au sud-ouest de la Côte d'Ivoire, les activités économiques de Kodaya sont à l'image de cette région. En effet les conditions climatiques caractérisées par une pluviométrie abondante, un couvert forestier joint à des sols de bonne qualité offrent au village des atouts pour le développement de l'agriculture tant de rente que vivrière. Ainsi, le cacao, le café et le riz sont les principales cultures pratiquées par la population de Kodaya.

5. Objectif de la thèse

Le présent travail s'inscrit dans le cadre de la recherche et du développement des sources d'énergies renouvelables. Ainsi, l'objectif de cette thèse est d'étudier un système de valorisation énergétique des déchets des cultures de riz, café et cacao disponibles dans une zone rurale en vue de produire de l'électricité. Ces déchets des cultures constituent l'une des richesses végétales les plus abondantes dans les zones rurales de la Côte d'Ivoire et qui jusqu'aujourd'hui sont pour la plupart inexploités. Les résultats attendus pour ce travail scientifique s'articulent autour de trois points :

- Caractérisation des différents résidus agricoles;
- Caractérisation des différents mélanges de résidus pouvant être utilisés;
- Protection de l'environnement par la réduction de la pollution.

6. Méthodologie utilisée

A partir d'analyses chimiques et thermochimiques, les caractéristiques thermochimiques des différents résidus agricoles ont été déterminées. Il s'agit de l'analyse élémentaire, de l'analyse immédiate, du pouvoir calorifique et de l'analyse des cendres.

Les analyses énergétiques et exergetiques d'un modèle de centrale thermique à biomasse de 5 MW, et les caractéristiques thermochimiques des différents résidus agricoles ont été utilisées pour caractériser les mélanges de résidus pouvant être utilisés pour une production efficace d'électricité. Pour cela, les débits de combustibles alimentant la chaudière, les rendements exergetiques du modèle de l'installation thermique et les caractéristiques thermochimiques des mélanges de résidus ont été évalués puis analysés. Les mélanges qui confèrent à l'installation thermique de meilleures performances énergétiques et environnementales ont été retenus.

Pour finir, l'analyse du cycle de vie (ACV) a été utilisée pour évaluer les impacts environnementaux et identifier les polluants émis lors de la production d'électricité. Pour cela les impacts environnementaux pour la production de 1 kWh d'électricité ont été calculés à l'aide du logiciel openLCA version 1.10.3. Puis des méthodes de réduction des polluants émis, issues de la littérature et adaptées à l'étude, ont été proposées.

7. Plan de la thèse

Ce travail de thèse a été divisé en quatre chapitres.

Le premier chapitre du manuscrit est consacré à la revue bibliographique. Il aborde les concepts clés de la thèse. En effet, ce chapitre présente le système électrique ivoirien ; les cultures de riz, café et cacao ; la biomasse et les procédés permettant de convertir la biomasse en électricité. Il fait une synthèse des travaux effectués sur la performance des résidus agricole pour la production d'électricité.

Le deuxième chapitre présente la détermination et l'analyse des caractéristiques thermochimiques des différents résidus agricoles. La caractérisation des résidus a été réalisée à l'aide de matériels de laboratoires selon les normes européennes, britanniques et américaines.

Le troisième chapitre traite de la caractérisation des mélanges des résidus pouvant être utilisés pour une production efficace d'électricité à partir de la centrale thermique à biomasse.

Le dernier chapitre est consacré à l'évaluation des impacts environnementaux du procédé de production d'électricité et aux méthodes permettant de réduire les polluants émis. L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) est utilisée dans ce cas.

La thèse se termine par une conclusion générale assortie de perspectives.

CHAPITRE 1 : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 1 : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction

La Côte d'Ivoire, pays agricole par excellence y a bâti son économie. Cependant, avec l'accroissement exponentiel de la population, il s'avère nécessaire d'explorer d'autres pistes pour l'amélioration des conditions de vie de ces populations. Parmi les indicateurs du développement, l'accès à l'électricité se présente comme une voie royale. Soucieux du bien-être de sa population, la Côte d'Ivoire envisage d'augmenter sa production électrique en construisant de nouvelles centrales thermiques qui utiliseront la biomasse issue des résidus agricoles, agro-industriels et ménagers.

Dans le contexte de production d'électricité, il est nécessaire d'identifier les besoins énergétiques à couvrir ; les résidus des cultures de riz, café et cacao disponibles en milieu rural et les propriétés physiques et chimiques nécessaires à la caractérisation des combustibles d'une centrale thermique à biomasse.

Ainsi, ce chapitre, dédié à la revue bibliographique, s'intéresse dans un premier temps au système électrique ivoirien. Il le présente à travers ses sources et moyens de production, et les chiffres concernant l'offre et l'accès à l'électricité. Il fait également une brève présentation des cultures de riz, café et cacao à travers leurs descriptions botaniques, leurs milieux aquatiques, les pratiques agronomiques les concernant et les déchets produits pendant les différents traitements agricoles. Enfin, pour mettre en évidence les propriétés physiques et chimiques nécessaires à la caractérisation thermochimique des résidus agricoles ; ce chapitre s'intéresse à la biomasse et aux procédés permettant de la convertir en électricité. Il fait une synthèse des travaux effectués sur la performance des résidus agricoles pour la production d'électricité.

Ce chapitre s'articule donc autour de cinq points essentiels, à savoir ;

- La présentation du système électrique Ivoirien ;
- La présentation des cultures de riz, café et cacao ;
- La description de la biomasse ;
- L'identification des procédés de conversion de la biomasse en électricité ;
- La performance des résidus agricoles.

1.1 Présentation du système électrique ivoirien

1.1.1 Ressources énergétiques

Les ressources énergétiques mondiales sont divisées en trois catégories : les combustibles fossiles (pétrole, charbon et gaz naturel), les ressources nucléaires et les ressources renouvelables. Mais, celles de la Côte d'Ivoire sont composées de combustibles fossiles (pétrole et gaz naturel) et d'énergies renouvelables.

Les sources d'énergies renouvelables de la Côte d'Ivoire sont abondantes. Elles se composent de l'énergie solaire, de l'énergie éolienne, de l'énergie hydraulique, et de la biomasse.

Parmi celles-ci, l'énergie hydraulique et la biomasse ont les potentiels les plus élevés. En effet, la surface d'eau représente environ 1,38% de la superficie totale du pays et les ressources d'énergie directement exploitable provenant des résidus agro-industriels, des cultures et des plantations sont estimées à 4,3 millions de tonnes d'équivalent pétrole par an (*Koua et al, 2015*).

Concernant les combustibles fossiles, les réserves de pétrole brut et de gaz naturels sont majoritairement situées au large des côtes maritimes. Les réserves de pétroles sont estimées à environ 300 millions de barils et celles du gaz naturel à plus de 1500 milliards de pieds cubes (*Koua et al, 2015*).

1.1.2 Moyens de production

L'électricité, en Côte d'Ivoire, est produite à partir de 7 centrales hydroélectriques, de 4 centrales thermiques et de 35 groupes électrogènes (*ANARE-CI, 2020*).

Les centrales hydroélectriques et thermiques alimentent le réseau interconnecté ; tandis que les groupes électrogènes sont utilisés pour alimenter les localités qui ne sont pas encore connectées au réseau national. En 2020, la puissance électrique globale installée s'élevait à 2207,239 MW. Cette puissance est répartie comme suit :

- 1323 MW pour les centrales thermiques ;
- 5239 kVA pour les groupes électrogènes ;

- 879 MW pour les centrales hydroélectriques.

Pour la production d'origine thermique, les centrales thermiques utilisent le gaz naturel et les combustibles liquides (HVO et DDO), tandis que les groupes électrogènes utilisent le Gas-Oil (GO) (ANARE-CI, 2020).

Toutefois, la production d'électricité, en Côte d'Ivoire, reste tributaire du gaz naturel. La Figure 1-1 montre la répartition de la production électrique par source énergétique.

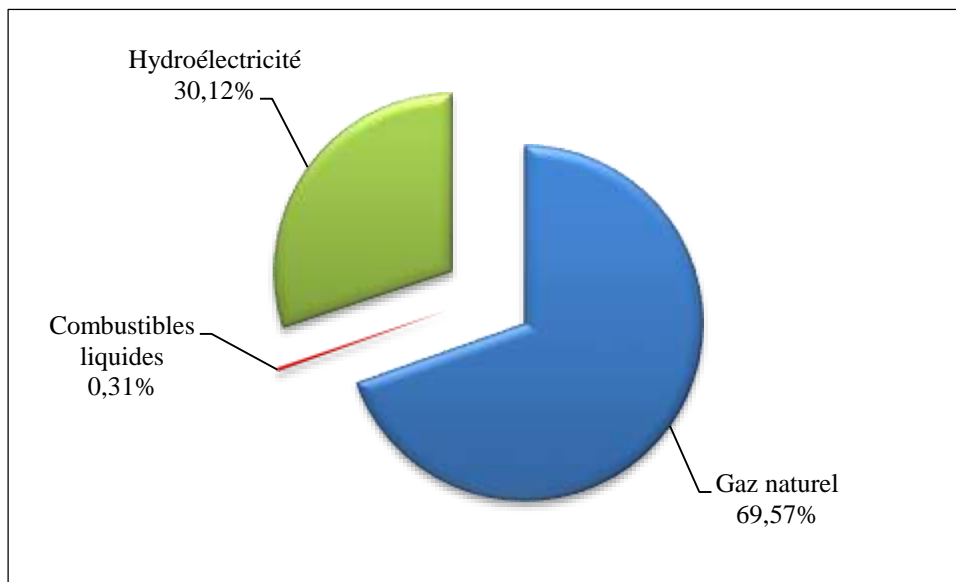


Figure 1-1. Répartition de la production électrique par source énergétique

1.1.3 Offres et accès à l'électricité

En 2020, le système électrique ivoirien a produit 11 210 GWh d'électricité. A cette même date, le pays a exporté 1 333 GWh (ANARE-CI, 2020).

L'électricité produite est répartie entre une clientèle nationale et des pays voisins (Ghana, Burkina Faso, Mali et Libéria). La clientèle nationale est constituée de 2 915 688 abonnés au service public de l'électricité. Les indicateurs relatifs à l'accès à l'électricité sont indiqués dans le Tableau 1.1 (ANARE-CI, 2020).

Tableau 1.1. Indicateurs relatifs à l'accès à l'électricité.

Indicateurs	Formules	2019
Taux de desserte	$\frac{\text{Nombre de ménages ayant l'électricité}}{\text{Nombre total de ménage}}$	55 %
Taux de couverture	$\frac{\text{Nombre de localités électrifiées}}{\text{Nombre total de localités}}$	80 %
Taux d'accès à l'électricité	$\frac{\text{Total des populations des localités ayant l'électricité}}{\text{Population totale de ces localités}}$	98 %

1.2 Présentation des cultures

1.2.1 Description botanique

1.2.1.1 Riz

Le riz est une plante monocotylédone appartenant à la famille des *gramineae* ou des graminées ; et connu botaniquement sous le nom d'*Oryza*. C'est une céréale de grande taille dont l'inflorescence est une panicule rameuse et le fruit est un caryopse (*Lim et al., 2012 ; De Man et Chartron, 2015*).

Il se compose de deux espèces cultivées et de vingt et une espèces sauvages. Les espèces cultivées *Oryza sativa* et *Oryza glaberrima*, proviennent respectivement d'Asie et d'Afrique. *Oryza sativa* est cultivé dans 112 pays du monde et *Oryza glaberrima* n'est cultivé que dans la région de l'Afrique de l'ouest (*Lim et al., 2012*). La Figure 1-2 présente la plante du riz.



Figure 1-2. Plante du riz

1.2.1.2 Caféier

Le caféier est un arbuste pouvant atteindre 10 à 12 mètres de hauteur, à plusieurs tiges, aux rameaux pendants et aux feuilles gaufrées persistantes (*Champéroux, 1991*). Il appartient à la famille botanique des *Rubiaceae*, qui comprend environ 80 espèces. Cependant, seulement deux espèces sont cultivées pour la consommation : le *café arabica*, connu sous le nom de café arabica, et le *Café canephora*, connu sous le nom de café robusta (*Narita et Inouye., 2014*).

La variété de café cultivé en Côte d'Ivoire est le « *Robusta* ». C'est une plante à haut rendement, résistante aux maladies, contenant environ 2% de caféine et produisant 1-1,5 kg de café vert par plante par an (*Chanakya, and De Alwis, 2004*). Ses feuilles sont de formes ovales et peuvent atteindre 20 à 30 centimètres de long et 8 à 15 centimètres de large. Les fleurs sont de couleur blanche et apparaissent à l'extrémité des branches. Fécondées, ces fleurs donnent un fruit appelé cerise de forme ronde et de couleur rouge à pleine maturité (*Champéroux, 1991*). La Figure 1-3 présente le caféier et ses fruits.

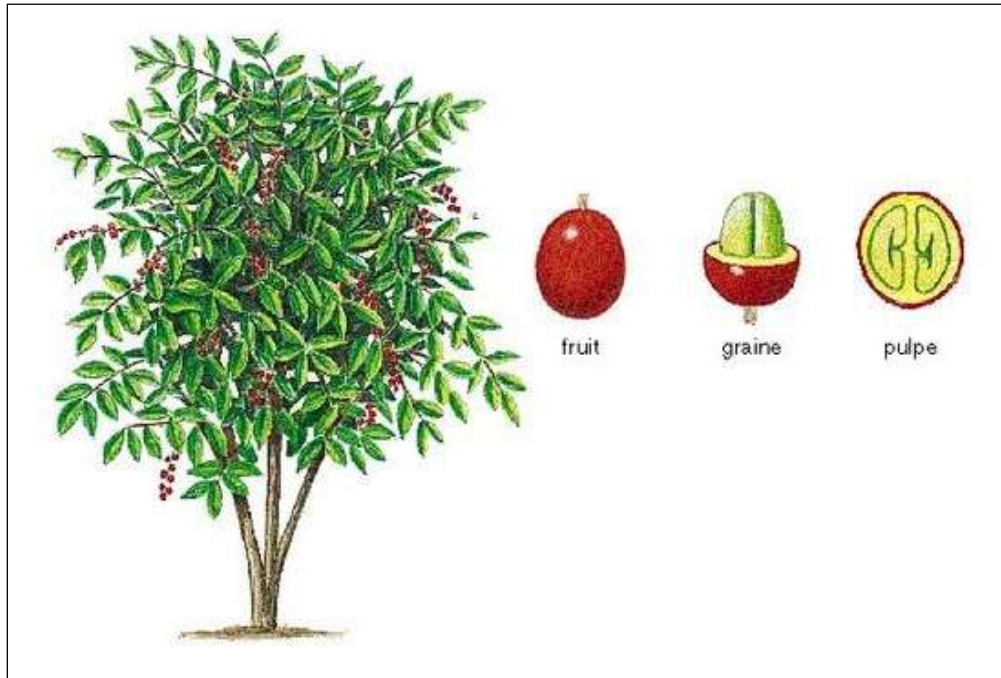


Figure 1-3. Caféier et ses fruits

1.2.1.3 Cacaoyer

Le cacaoyer (*Theobroma cacao*) est un arbre de sous-bois à feuilles persistantes ; d'une hauteur allant jusqu'à environ 9-10 m dans son port naturel. Originaire d'Amérique du sud (forêt Amazonienne) et d'Amérique centrale, il appartient à la famille des Malvacées (*Malvaceae*) (*Diby et al., 2017*).

Les espèces de cacao cultivées peuvent être réparties en trois groupes : Criollo, Forastero et Trinitario. Cependant, le cacao Forastero est l'espèce la plus cultivée en Côte d'Ivoire. Il est résistant aux maladies et facile à cultiver.

Le fruit du cacaoyer appelé "cabosse" est une drupe qui mesure 10-30 cm de long et 7-10 cm de large et pèse 400-1000g. Il peut être sphérique ou cylindrique, pointu ou émoussé, lisse ou ridé. Le péricarpe a une épaisseur de 10-15 mm et peut être de différentes couleurs selon la maturité et la variété, passant du vert au jaune, du rouge à l'orange. Les graines, appelées fèves ; au nombre de 20 à 60 par fruit, sont disposées en rangées régulières et immergées dans une pulpe acide mucilagineuse contenant du glucose et du fructose. Chaque fève de cacao se compose de deux

cotylédons et d'un embryon, tous enfermés dans une enveloppe appelée coque (*Caligiani et al., 2016*). La Figure 1-4 présente le cacaoyer et ses fruits.

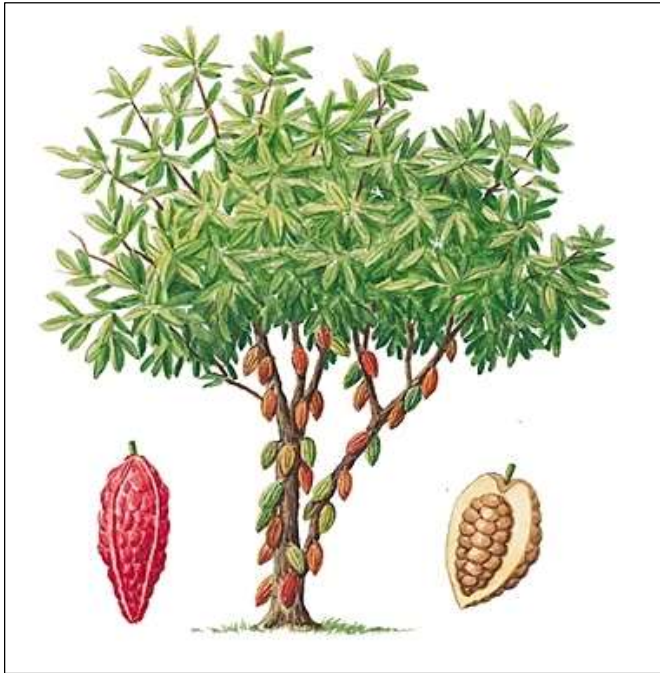


Figure 1-4. Cacaoyer et ses fruits

1.2.2 Milieux écologiques

Le riz pousse dans des sols salins, alcalins ou acides (*De Man et Chartron, 2015*). Il peut être cultivé dans diverses conditions de croissance telles que les écosystèmes irrigués, les basses terres pluviales, les hautes terres pluviales et les écosystèmes sujets aux inondations (*Khush, 1997*).

Cependant, le caféier pousse sur des sols très variés. Mais il est le plus souvent cultivé sur des sols acides dont le pH est compris entre 4.5 et 6.0. Ces sols doivent avoir une bonne structure physique permettant aux racines du caféier de bien s'étendre. Le caféier ne doit pas être cultivé dans une zone inondable ou avec une nappe phréatique proche de la surface (risque d'asphyxie des racines) (*Champéroux, 1991*).

La croissance du cacaoyer nécessite des climats chauds-humides avec des températures comprises entre 20 et 30°C et une humidité relative supérieure à 80%. Le cacaoyer tolère une saison sèche

n'excédant pas trois mois par an. Il est généralement cultivé à l'ombre d'autres grands arbres (bananiers, cocotiers, etc.) sur un sol profond, léger, contenant suffisamment de matières organiques et ayant un PH compris entre 5.5 et 8 (*Caligiani et al., 2016 ; Diby et al., 2017*).

1.2.3 Pratiques agronomiques

1.2.3.1 Riziculture

En Côte d'Ivoire, le riz est produit suivant trois systèmes : (1) la riziculture pluviale, (2) la riziculture inondée et (3) la riziculture irriguée.

Dans la riziculture pluviale, la terre est préparée et ensemencée à sec. Cependant, dans la riziculture irriguée, le sol est préparé à l'état humide et l'eau est retenue dans la rizière par des diguettes. Puis les semis sont repiqués en couches humides. La riziculture inondée est pratiquée sur sol piétiné dans des champs entourés de diguettes pouvant retenir l'eau à une profondeur allant jusqu'à 50 cm. Cette rizière est alimentée par la pluie ou par le ruissellement provenant d'un bassin local de réception, et par les transferts d'un casier à l'autre par gravité (*De Man et Chartron, 2015*).

La production du riz en Côte d'Ivoire se fait sur deux grandes saisons: le premier cycle de production s'effectue du mois de février au mois d'Août et le second cycle s'effectue du mois de septembre à janvier (*Esso, 2009*).

Toutes les régions du pays enregistrent des exploitants de riz. Mais, les régions du Poro, au nord, et du Tonkpi, à l'ouest, ont les plus grands nombres d'exploitants (plus de 36 000 exploitants). Tandis que toutes les régions de l'est ont moins de 7 000 exploitants de riz (*FAO et al., 2019*).

L'essentiel de la riziculture ivoirienne est réalisée en culture manuelle. Les moyens de production restent rudimentaires pour la majorité des riziculteurs. Cependant, dans les zones cotonnières du nord du pays, et sur les périmètres irrigués, il est pratiqué la culture attelée et à la motoculture.

1.2.3.2 Caféculture

Le caféier est planté soit par germination d'une graine, soit par bouturage.

La germination consiste à prendre une graine sur l'arbre adulte et la faire germer : c'est la multiplication sexuée ou propagation générative.

Le bouturage consiste à prélever un fragment de bois sur l'arbre adulte et en employant certaines techniques, faire pousser des racines sur ce morceau de bois, puis des feuilles : c'est une multiplication asexuée ou propagation végétative.

La vie d'un caféier peut se résumer suivant trois périodes : la période de croissance, la période de productivité et la période de déclin végétatif.

La période de croissance part de la germination de la graine jusqu'à l'âge adulte. Cette période dure quatre à sept ans. La moyenne d'âge adulte de la plante est de cinq ans.

La période de productivité débute avant l'âge adulte, vers trois ans et dure vingt ans en moyenne. Elle correspond à la période de floraison et de fructification. Enfin, la période de déclin végétatif est la période d'affaiblissement puis mort de l'arbre (*Champéroux, 1991*).

Les exploitations caféières du pays se localisent principalement à l'ouest, au centre-ouest, au sud-ouest, à l'est, et au sud-est du pays (*Esso, 2009*).

1.2.3.3 Cacao culture

Le cacaoyer est principalement multiplié par des méthodes génératives et végétatives.

Avec la méthode générative, les fèves de cacao sont directement semées dans le champ ou cultivées en pépinière pendant environ six mois avant d'être transportées dans le champ.

La multiplication végétative est adaptée aux cultures génétiquement hétérogènes. Elle comprend principalement le bouturage et le greffage. Les boutures sont prélevées sur de jeunes branches et sont enracinées dans des substances de rempotage avant d'être transportées dans le champ. Tandis que le greffage consiste à utiliser des greffons de plants de cacao d'élite et à les greffer sur de jeunes plants de cacao ou des cacaoyers matures (*Diby et al., 2017*).

Après sa mise en place, le cacaoyer croît et forme sa couronne vers 16 à 18 mois (*Konan et al., 2015*) puis apparaissent les fleurs. Le cacaoyer peut produire jusqu'à 120 000 fleurs par an, mais seulement 0,5 à 5 % atteignent la maturité et produisent des cabosses (*Diby et al., 2017*). En Côte d'Ivoire, le cacaoyer hybride proposé par le CNRA commence à produire dès la deuxième année après plantation (*Kébé et al., 2005.*). La récolte de cacao peut se faire sur plusieurs mois, une ou deux fois par an. Une récolte principale a lieu d'octobre à Mars et une récolte secondaire de mai à août.

Suivant la répartition géographique des exploitations, la culture du cacao se retrouve sur l'ensemble de la zone forestière de la Côte d'Ivoire. Cette culture au départ très importante dans les zones est et centre-est appelées initialement « Boucle du cacao », est aujourd'hui très implantée dans les zones du centre-ouest, de l'ouest et du Sud-Ouest, qu'on qualifie de « Nouvelle Boucle du Cacao » (*FAO et al., 2019*).

1.2.4 Résidus des cultures de riz, café et cacao

Les résidus des cultures de riz, café et cacao, en zone rurale, sont composés de balle de riz, de paille de riz, de coque de café et de cortex de cacao. La Figure 1-5 montre les différents résidus des cultures de riz, café et cacao.

Selon *Shafie et al. (2012)*, la paille de riz et la balle de riz sont les principaux résidus générés respectivement lors de la récolte et du décorticage du riz. La paille de riz est la tige de la plante de riz qui reste dans le champ lors de la récolte du paddy. Tandis que la balle de riz est la couche extérieure retirée de la graine de riz pendant le décorticage du riz paddy (*Lim et al., 2012*).

Le processus de production des grains de café vert génère d'énorme quantité de résidus. Mais les coques sèches retirées des cerises sèches constituent les principaux résidus du processus de traitement par la voie sèche (*Saenger et al., 2001*). Enfin, selon *Vriesmann et Oliveira (2017)*, la production de la fève de cacao génère des quantités considérables de déchets. Cependant, le cortex de cacao, produit après l'extraction des fèves de la cabosse mature, reste le premier sous-produit de la culture du cacao. Sous-exploitées, ces enveloppes sont laissées dans la nature et y pourrissent.



Figure 1-5. Résidus des cultures de riz, café et cacao disponibles en milieu rural.

1.3 Biomasse

1.3.1 Définition

La biomasse désigne la matière organique biodégradable et non fossilisée issue des plantes, des animaux et des micro-organismes (*Demirbas et al., 2009*). Elle est produite par les plantes vertes pendant la photosynthèse. En effet, grâce à la lumière du soleil, le dioxyde de carbone présent dans l'air est transformé par les plantes vertes en d'autres molécules contenant du carbone. Ces molécules sont stockées dans les plantes et les animaux ou dans leurs déchets.

Ainsi, la biomasse comprend (*Mckendry, 2002a*) :

- La végétation terrestre ;
- La végétation aquatique ; et
- Tous les déchets organiques.

Une autre définition de la biomasse donnée par l'article 29 de la loi 2005-781 de programmation fixant les orientations de la politique énergétique française dite "POPE" du 13 juillet 2005 est la suivante : "la fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture, y compris les substances végétales et animales, de la sylviculture (ensemble des techniques permettant la création et l'exploitation rationnelle des forêts tout en assurant leur conservation et leur régénération) et des industries connexes ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et ménagers".

1.3.2 Ressources

Les ressources de la biomasse comprennent le bois et les déchets de bois, les cultures agricoles et leurs sous-produits, les déchets solides municipaux, les déchets d'animaux, les déchets provenant de la transformation des aliments, les plantes aquatiques et les algues. Elles peuvent être subdivisées en trois catégories (*Goyal et al., 2008*) :

- Les déchets : Résidus de plantation, résidus de cultures, les résidus agro-industriels, déchets de bois de scierie, déchets de bois urbains, déchets organiques urbains.
- Les produits forestiers : Bois, résidus d'exploitation forestière, arbres, arbustes et résidus de bois, sciure de bois, écorce, etc.
- Les cultures énergétiques : Cultures ligneuses herbacées, graminées, cultures amylacées (maïs, blé et orge), cultures sucrières (canne à sucre et betterave), cultures oléagineuses (soja, tournesol, carthame).

1.3.3 Propriétés thermochimiques

Ce sont les propriétés inhérentes qui déterminent à la fois le choix du procédé de conversion thermochimique et les difficultés qui peuvent subvenir au cours du traitement de la biomasse. Les principales propriétés d'intérêt lors du traitement thermique de la biomasse en tant que source d'énergie sont (*Mckendry, 2002a*) :

- Teneur en humidité ;
- Pouvoirs calorifiques ;
- Proportions de carbone fixe et de matières volatiles ;
- Teneur en cendres ;
- Teneur en métaux alcalins.

Pour les procédés de conversion de la biomasse sèche, les cinq propriétés sont intéressantes.

Des analyses spécifiques permettent de déterminer ces différentes propriétés thermochimiques de la biomasse. Il s'agit de l'analyse élémentaire, de l'analyse immédiate, et de l'analyse des cendres (*Cai et al, 2017*).

1.3.3.1 Analyse élémentaire

L'analyse élémentaire permet de déterminer les proportions de carbone (C), d'hydrogène (H), d'oxygène (O), de soufre (S), d'azote (N) et de chlore (Cl) contenues dans la biomasse. Ces éléments sont présents dans la biomasse à des concentrations variables selon son origine et son type (*Obernberger et al., 2006*).

La connaissance de la composition élémentaire permet de mesurer l'impact de la combustion de la biomasse sur la chaudière et l'environnement, de calculer avec précision les paramètres qui régissent la combustion : les pouvoirs calorifiques, le pouvoir comburivore et le pouvoir fumigène (*Caï et al., 2017 ; Saidur et al., 2011 ; Haider et Seguin, 2012*).

En effet, les proportions de carbone (C), d'hydrogène (H), d'oxygène (O), de soufre (S), et d'azote (N) interviennent dans le calcul des pouvoirs calorifiques, du pouvoir comburivore et du pouvoir fumigène. Les teneurs en soufre, en azote et en chlore ont une influence prépondérante sur les phénomènes d'encrassement et de corrosion parfois observés en chaudière ; et interviennent partiellement dans la pollution par les oxydes de soufre, les oxydes d'azote et les gaz acides (HCl, PCDD/F, etc.).

1.3.3.2 Analyse immédiate

Un combustible peut être décomposé en ses principaux constituants que sont les matières combustibles, l'eau et les cendres. Les matières combustibles sont elles-mêmes séparées en deux constituants : le carbone fixe et les matières volatiles (*Parisot, 1993*).

L'analyse immédiate permet d'évaluer les proportions de chaque constituant de la biomasse. Ces constituants jouent un rôle important dans l'évaluation de certains paramètres de fonctionnement de la chaudière tels que la cinétique de la combustion, le temps de séjour du combustible ou des gaz de combustion dans le foyer, les besoins relatifs en air de combustion, la température de l'air de combustion, etc. En effet, le taux d'humidité qui représente la quantité d'eau dans la biomasse, intervient dans le séchage de la biomasse et la quantité de fumées produites pendant la combustion. Aussi, la présence de cendres dans le combustible peut causer des problèmes d'allumage et de combustion. La fusion de ces cendres peut provoquer des problèmes d'encrassement et de corrosion

dans la chaudière. Enfin, les matières combustibles (carbone fixe et matières volatiles) interviennent dans la facilité d'allumage ou de combustion de la biomasse et directement dans le temps nécessaire à la combustion. Elles influent aussi sur l'excès d'air nécessaire à la combustion (Cai *et al.*, 2017 ; Saidur *et al.*, 2011 ; Parisot, 1993).

1.3.3.3 Analyse des cendres

Il est important de connaître les teneurs des différents composants des cendres. L'analyse des cendres est un complément utile pour connaître et évaluer des risques tels que les tendances à la corrosion, ou à l'encrassement et à l'émission de particules dangereuses lié à l'utilisation de la biomasse. Les composants les plus fréquemment rencontrés dans une analyse des cendres sont : SiO_2 , Al_2O_3 , FeO , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , V_2O_5 , TiO_2 et des constituants en quantité plus marginale tels que les métaux lourds : Zn, Pb, Hg, Cd (Cai *et al.*, 2017; Haider et Seguin, 2012). Certains de ces constituants ont une influence sur la température de fusibilité des cendres. En effet, une teneur élevée en potassium abaisse la température de fusion des cendres, tandis qu'une teneur élevée en silicium l'augmente (Khan *et al.*, 2009).

1.3.3.4 Pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique est une caractéristique essentielle des combustibles. Il définit la quantité théorique d'énergie récupérable sous forme de chaleur à partir de la combustion complète du combustible. En effet, le pouvoir calorifique est la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète de 1 kg de combustible solide ou liquide ou de 1 m³ de combustible gazeux, le combustible et le comburant (en général l'air) étant pris à une température et une pression de référence, et les produits de la combustion ramenés à la même température (Sawerysyn, 1993).

Il existe deux types de pouvoir calorifique : le pouvoir calorifique supérieur (PCS) et le pouvoir calorifique inférieur (PCI) (Cai *et al.*, 2017). Le pouvoir calorifique supérieur (PCS) est la quantité d'énergie dégagée par la combustion complète d'une unité de combustible, la vapeur d'eau étant supposée condensée et la chaleur récupérée.

Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) est calculé en soustrayant l'énergie nécessaire à l'évaporation de l'humidité du combustible.

Les combustibles issus de la biomasse ont un pouvoir calorifique inférieur à celui du charbon. Le carbone (C) et l'hydrogène (H) ont tendance à augmenter le pouvoir calorifique tandis que l'oxygène le diminue (*Khan et al, 2009*).

1.4 Procédés de conversion de la biomasse en électricité

La biomasse est susceptible de fournir de l'électricité au travers de deux principales technologies de conversion : la conversion thermochimique et la conversion biochimique. La Figure 1-6 présente les principaux procédés de conversion de la biomasse en électricité (*Suresh et al, 2019*).

La conversion thermochimique utilise des procédés thermiques et chimiques tels que la combustion et la gazéification pour extraire l'énergie de la biomasse. Alors que La conversion biochimique utilise la digestion anaérobie pour décomposer la biomasse en combustibles gazeux (biogaz) (*Cai et al, 2017 ; Saidur et al., 2011*).

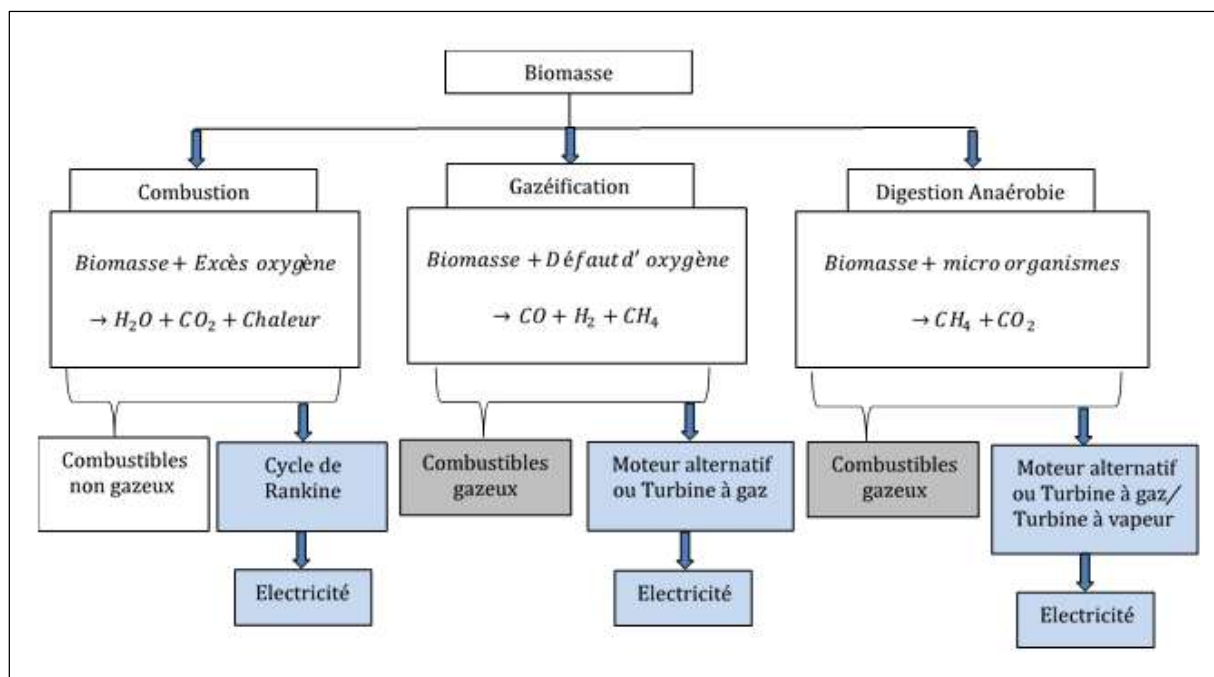


Figure 1-6. Principaux procédés de conversion de la biomasse en électricité

1.4.1 Combustion

La production d'électricité à partir de la combustion de la biomasse est une technologie éprouvée, mature et développée à travers le monde. Une installation de combustion de biomasse est généralement constituée de trois principaux éléments : une chaudière, une turbine et un générateur électrique. Dans la chaudière, la biomasse est brûlée avec plus qu'une quantité stœchiométrique d'air. La chaleur produite est transférée à un fluide dysphasique (généralement l'eau/vapeur d'eau) pour la production de vapeur à des débits, températures et pressions précisément définies, et contrôlées en fonction de la conception de l'installation. La turbine produit une énergie mécanique par la détente de la vapeur d'eau qui actionne des pales. Cette énergie mécanique est transmise au générateur électrique pour produire de l'électricité (*Suresh et al, 2019*).

1.4.2 Gazéification

La gazéification de la biomasse permet de générer un gaz de synthèse, appelé syngaz, sous l'effet de réactions thermochimiques. En effet, la biomasse subit une série de réactions chimiques (séchage, pyrolyse, oxydation, réduction) en présence d'un agent gazéifiant (air, vapeur, oxygène, dioxyde de carbone ou un mélange de ceux-ci). Elle est ainsi convertie en un gaz combustible. Ce gaz se compose principalement de H_2 , CO , CH_4 et d'autres impuretés telles que le CO_2 , l'azote, le soufre, les composés alcalins et les goudrons (*Mckendry, 2002b ; Suresh et al., 2019*).

Des technologies comme les moteurs alternatifs, les turbines à gaz et les piles à combustible utilisent ce gaz combustible pour produire de l'électricité. Les différents modules constitutifs d'un procédé de production d'électricité par gazéification de la biomasse sont : le réacteur de gazéification (ou gazogène), l'épurateur de gaz et le moteur à combustion interne ou la turbine à gaz/la pile à combustible (*Mckendry, 2002b ; Ruiz et al., 2013 ; Simone et al., 2012 ; Suresh et al., 2019*).

1.4.3 Digestion anaérobie

La digestion anaérobie permet de convertir la biomasse en biogaz, un mélange de méthane (CH_4) et de dioxyde de carbone (CO_2), avec de petites quantités d'autres gaz tels que le sulfure d'hydrogène (*Mckendry, 2002b*). Dans un environnement anaérobie, la biomasse est convertie par des bactéries en quatre étapes successives : hydrolyse, acidogénèse, acétogénèse et méthanogénèse (*Salman et al., 2017*).

L'hydrolyse consiste en la dégradation de la matière organique complexe en molécules simples par des bactéries. Pendant ce processus, les lipides, les polysaccharides, les protéines et les acides nucléiques sont transformés en monosaccharides, acides aminés, acide gras et bases azotées. L'étape de l'acidogénèse permet la dégradation des composés produits pendant l'hydrolyse par l'action des bactéries acidogènes et fermentatives en alcool, acides organiques, hydrogène et dioxyde de carbone. L'acétogénèse permet la conversion des acides, issus de la phase d'acidogène, en acétate, en hydrogène et en dioxyde de carbone, par l'action des bactéries acétogènes. La méthanogénèse, la dernière étape de la digestion anaérobie, consiste à transformer l'acétate, l'hydrogène et le dioxyde de carbone en méthane (*Batstone and Jensen, 2011 ; Zhang, 2014*). Le gaz généré est composé à 50-70% de méthane (CH_4) et 30-50% de dioxyde de carbone (CO_2). Il peut être utilisé comme combustible dans les turbines à gaz, les chaudières et les moteurs à combustion interne pour produire de l'électricité (*Mckendry, 2002b ; Bernet, 2015*).

1.5 Performance des déchets agricoles

Selon plusieurs auteurs (*Mana et al., 2021 ; Mahidin et al., 2020 ; Roy et al., 2020 ; Brown et al., 2019 ; Paletto et al., 2019 ; Abdelhady et al., 2018*), il est intéressant d'un point de vue environnemental et économique de produire de l'électricité à partir de centrale thermique utilisant des déchets agricoles. En effet, l'utilisation des déchets agricoles à des fins énergétiques permet de réduire les mises en décharge et éviter la combustion à l'air libre pratiquée en milieu rural. Cette nouvelle utilisation des résidus agricoles, traditionnellement abandonnés dans les plantations, permet de lutter contre le réchauffement de la planète par la réduction des émissions des gaz à effet de serre, de particules nocives et de polluants environnementaux. Elle contribue également à la

création d'emplois locaux et de nouvelles sources de revenus en milieu rural. Au Malawi, une étude de cas a montré que dans le secteur de l'énergie, le bois de feu est l'employeur le plus important. En 1996, le plus grand nombre d'emplois créé par la production, le transport et le commerce du bois-énergie étaient en milieu rural. En 2008, environ 133 000 personnes étaient employées dans le secteur des combustibles ligneux (*Openshaw, 2010*).

L'utilisation à des fins énergétique des résidus de la biomasse, offre au secteur de l'électricité, une diversité de combustibles moins coûteux que les combustibles fossiles. Dans la plupart des cas, la biomasse est gratuite ou bon marché.

Conclusion

Au terme de ce chapitre, il ressort qu'en Côte d'Ivoire, l'électricité est produite à partir de 7 centrales hydroélectriques, 4 centrales thermiques et une quarantaine de groupes électrogènes. Cette production électrique est majoritairement dominée par l'utilisation du gaz naturel. En 2019, la contribution de ce combustible fossile, au mix énergétique, a été estimée à environ 67.04%. Aussi, environ 31% des localités du pays ne sont pas encore couvertes par l'électricité.

Le chapitre révèle également que la balle de riz, la paille de riz, la coque de café et le cortex de cacao sont les principaux résidus des cultures de riz, café et cacao en zone rurale. Sous-exploitées, ces résidus, considérés comme des déchets indésirables de la production du riz, du café et du cacao, sont laissés pour la plupart pourrir dans les plantations.

La biomasse peut être convertie en électricité au moyen de trois procédés, la combustion directe, la gazéification et la digestion anaérobie.

Toutefois, avant de l'utiliser comme combustible d'une centrale thermique, il est nécessaire de définir ses caractéristiques thermochimiques, à savoir, les compositions élémentaire et immédiate, le pouvoir calorifique et la composition des cendres : ce sera l'objet du prochain chapitre.

CHAPITRE 2 : CARACTERISATION DES RESIDUS

CHAPITRE 2 : CARACTERISATION DES RESIDUS

Introduction

A l'entame de ce deuxième chapitre du manuscrit, il est important de rappeler que la production de l'électricité en Côte d'Ivoire est dominée par l'utilisation des combustibles fossiles que sont le gaz naturel et le pétrole. Aussi, la paille de riz, la balle de riz, la coque de café et le cortex de cacao constituent les principaux résidus des cultures de riz, café et cacao disponibles en milieu rural. Ces résidus peuvent être convertis en électricité à partir de deux procédés thermo-chimiques : la combustion directe et la gazéification ; et d'un procédé biochimique : la digestion anaérobie. Cependant, la combustion directe est le procédé de conversion pratiqué dans les centrales thermiques utilisant de la biomasse. Ainsi, la composition élémentaire, la composition immédiate, la composition des cendres et le contenu énergétique sont les propriétés physico-chimiques nécessaires à la caractérisation de la biomasse devant être utilisée comme combustible d'une centrale thermique.

Considéré comme l'une des principales sources d'énergie permettant de lutter contre le changement climatique et l'épuisement des ressources naturelles, la biomasse est aujourd'hui au centre de plusieurs projets de production d'électricité tant dans les pays développés que dans les pays en développement. Cependant, pour définir le succès et la durabilité de ces projets, il est important de déterminer les ressources disponibles et les propriétés physico-chimiques de la biomasse nécessaires au bon fonctionnement des installations de production de l'électricité.

En effet, dans le cadre de la valorisation énergétique de la biomasse, de nombreuses études commencent par l'évaluation des ressources disponibles de celle-ci. C'est le cas de l'étude réalisée par *Avcioglu et al (2019)* sur les résidus de la biomasse agricole en Turquie. Les auteurs ont déterminé la quantité théorique de la biomasse disponible avant d'évaluer son potentiel énergétique à partir de ses propriétés physiques et chimiques. Dans le but d'introduire l'utilisation de la bioénergie dans le programme de développement durable du Cameroun, *Mboumboue et al. (2018)* ont également évalué les ressources de la biomasse dont dispose le pays. Aussi, avant de prendre une décision concernant le développement de l'herbe *Miscanthus* en Croatie, pour augmenter ses

ressources énergétiques, *Bilandzija et al. (2018)* ont d'abord évalué les ressources de la biomasse agricole du pays.

Aussi, la connaissance des propriétés physiques et chimiques de la biomasse permet de prédire les dommages aux équipements, les émissions de polluants dans l'atmosphère, et de calculer avec précision les paramètres qui régissent la combustion. De nombreux chercheurs (*Parascanu et al., 2016 ; Tsai et al., 2017 ; Blissett et al., 2017 ; Darmawan et al., 2017 ; Adjin-Tetteh et al., 2018 ; Abdel et al., 2018 ; De Oliveira et al., 2018 ; George et al., 2019*) ont effectué cette caractérisation et/ou se sont appuyés sur les résultats de celle-ci pour se prononcer sur la qualité de certains résidus agricoles utilisés comme biocombustibles.

Ainsi, ce chapitre se charge de déterminer les caractéristiques thermochimiques des résidus des cultures de riz, café et cacao provenant de Kodaya.

2.1 Présentation de la zone d'étude

2.1.1 Situation géographique

Kodaya est situé dans le département de Buyo, au sud-ouest de la Côte d'Ivoire à 5,59 degrés de latitude Nord et 6,58 degrés de longitude Ouest. La région est caractérisée par un climat de type subéquatorial dominé par deux saisons pluvieuses et deux saisons sèches : une grande saison de pluies comprise entre avril et juin et une petite saison pluvieuse entre septembre et novembre. Les deux saisons sèches se situent entre juillet et août et entre décembre et mars.

La pluviométrie moyenne est comprise entre 1 300 mm et 1 600 mm et les températures moyennes oscillent entre 26°C et 30°C. Le sol est fertile avec une végétation marquée par la forêt dense et humide. Il est adapté à tous types de cultures vivrières et industrielles. Cette zone est donc riche en potentialités agricoles et forestières (*LA NAWA, 2018*). La Figure 2-1 montre la Carte de la région de la Nawa présentant le département de Buyo qui comprend le village de Kodaya. Il fait partie des villages construits pour la réinstallation des déplacés du barrage de Buyo. Selon les résultats du RGPH 2014, le village compte 6543 habitants dont 3424 hommes et 3119 femmes.

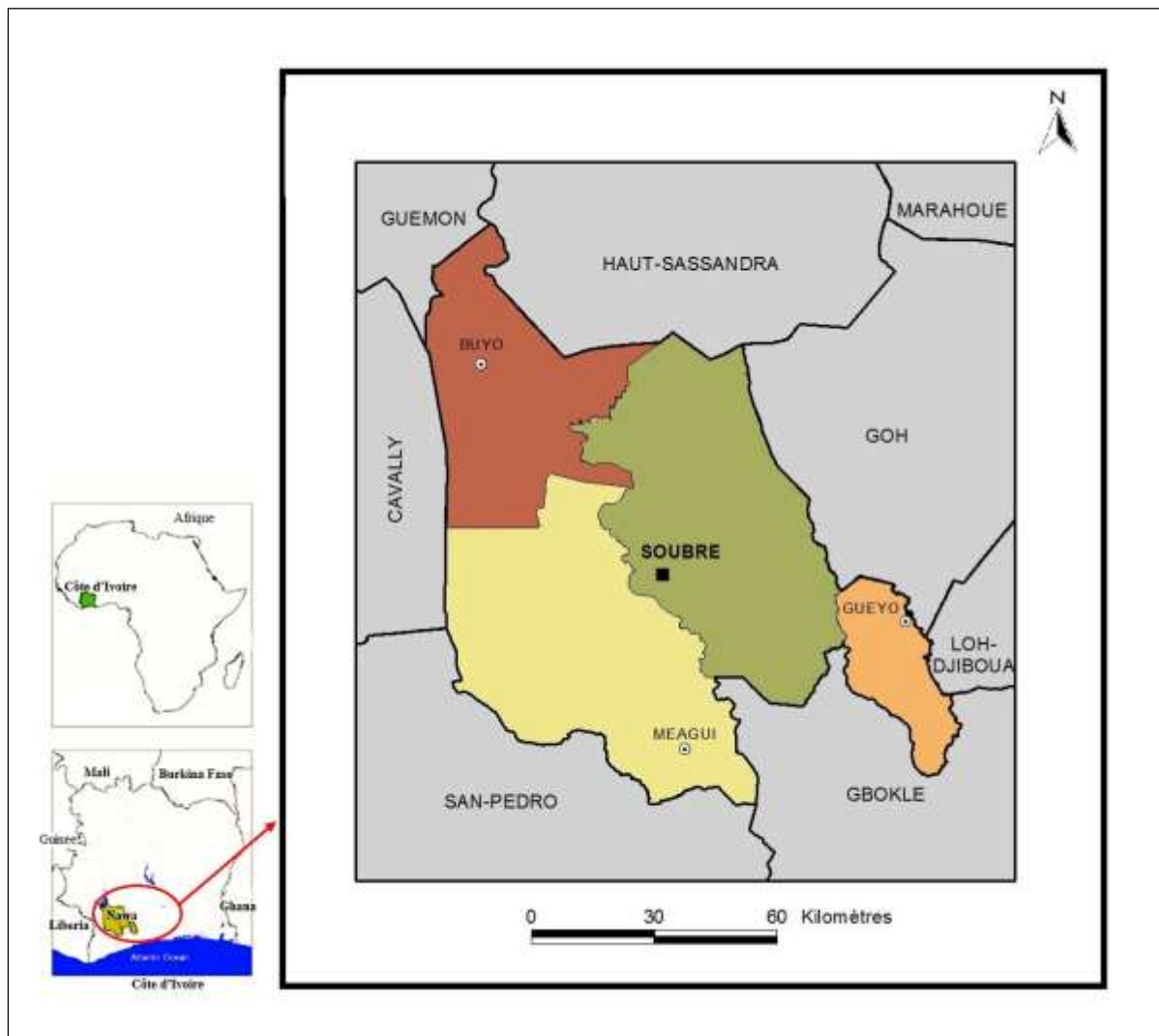


Figure 2-1. Carte de la région de la Nawa.

2.1.2 Disponibilité des résidus

Kodaya enregistre deux périodes de récolte du cacao et du riz, et une période de récolte du café par an. Concernant la culture du cacao, la principale récolte s'effectue du mois d'octobre au mois de mars, et une récolte intermédiaire appelée 'la petite traite' a lieu d'avril à août.

La récolte du cacao consiste à cueillir les cabosses mures, à les ouvrir pour en extraire les graines, les fermenter, puis les laisser sécher au soleil de préférence à l'air libre. Cette opération génère des

quantités considérables de déchets, constitués principalement de cortex de cacao. Une partie de ces enveloppes est récupérée par des associations de femmes, qui la transforment en potasse après séchage et combustion à l'air libre. Mais, la plus grande proportion de ces résidus est abandonnée dans les champs de cacao.

Quant à la culture du café, la récolte commence généralement dans le mois de septembre pour prendre fin en décembre. Pendant cette période, les cerises mures cueillies sont séchées. Après le séchage de la cerise, les coques de café sont brisées, dans un moulin, pour libérer les grains de café vert. Ainsi, les coques sèches constituent les principaux résidus issus de ce traitement de la cerise. Ce déchet agricole est utilisé comme engrais biologique dans les exploitations cacaoyères par certains planteurs.

Enfin, concernant les deux récoltes du riz, la première s'effectue dans le mois de février/mars et la seconde dans le mois d'août/septembre. Les opérations de récolte du riz paddy sont essentiellement basées sur des procédés traditionnels utilisant des faucilles ou des couteaux. Mais, la transformation du riz paddy en riz blanchi est du ressort des décortiqueuses mécaniques installées dans le village. La production du riz blanchi génère deux principaux résidus : la paille de riz et la balle de riz. La paille de riz reste dans le champ après la récolte du riz paddy, mais la balle de riz est valorisée en engrais biologique dans les exploitations cacaoyères.

La Figure 2-2 présente les périodes de disponibilité des différents résidus de culture.

Le gisement de ces résidus est directement lié au rendement des cultures lors de la production agricole. En effet, selon *Saenger et al. (2001)*, pour chaque tonne de grain de café vert produit, une tonne de coque sèche de café est produite. Aussi, plusieurs auteurs, dans leurs études, révèlent que la balle de riz représente entre 20% et 33% de la masse du riz paddy ; et pour chaque kilogramme de riz paddy récolté, entre 0,41 et 3,96 kg de paille de riz sont générés (*Lim et al., 2012*). Enfin, selon *Adzimah et Asiam (2010)*, le cortex de cacao et les fèves sèches représentent respectivement 14,71% et 10,93% de la masse de la cabosse mature de cacao. Ainsi, pour chaque kilogramme de fèves sèches produites, environ 1,35 kilogrammes de cortex de cacao sont générés comme déchets agricoles.

Résidus	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aoû	Sep	Oct	Nov	Dec
Balle de riz	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Paille de riz		■	■					■	■			
Coque de café									■	■	■	■
Cortex de cacao	■	■	■							■	■	■

Figure 2-2. Périodes de disponibilité des différents résidus de culture

2.2 Méthodologie

2.2.1 Matériels

Deux types de matériels ont été utilisés pour réaliser cette caractérisation thermochimique. Il s'agit d'une part de matériel végétal constitué des résidus de culture, à savoir la balle de riz, la paille de riz, la coque de café et le cortex de cacao ; et d'autre part du matériel technique d'analyse.

Les matériels techniques d'analyse sont repartis comme suit :

- Préparation des échantillons
 - Table de séchage ;
 - Balance : Scout pro OHAUS / SPU, précision 0.01 g ;
 - Broyeur électrique : NASCO / BL 1008 AK-CB ;
 - Empilage de tamis N° 20 (850 µm) et N° 80 (180 µm) avec couvercle et plateau inférieur.

➤ Analyse immédiate

- Lot de creuset ;
- Dessiccateur ;
- Balance : Scout pro OHAUS / SPU, précision 0.1 µg ;
- Etuve : MEMMERT / UF75 ;
- Four à moufle: NABERTHERM / L-091K2RN.

La Figure 2-3 montre le matériel d'analyse immédiate.

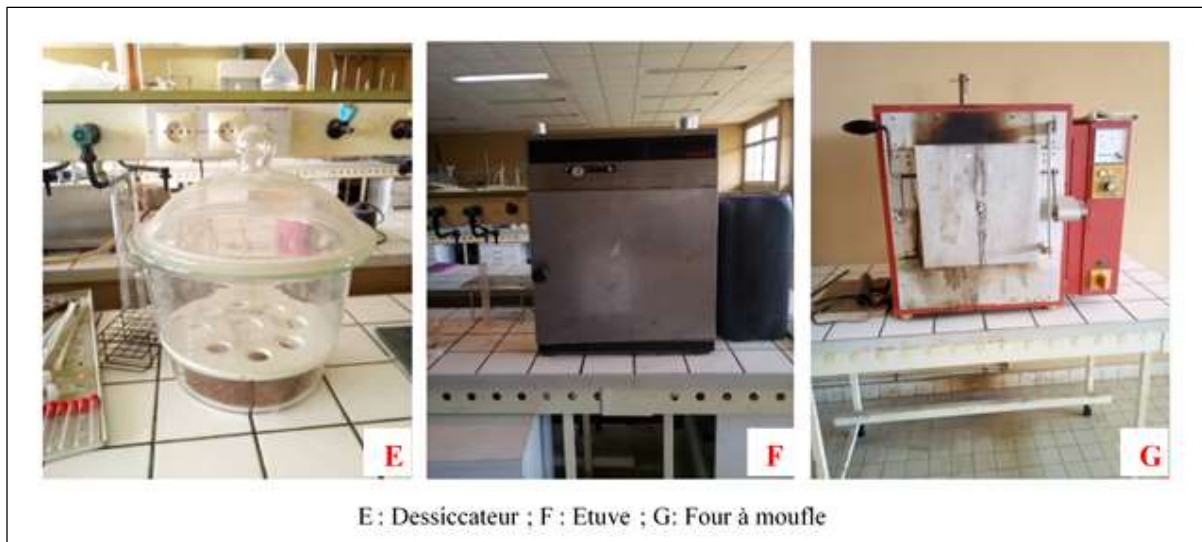


Figure 2-3. Matériel d'analyse immédiate / INP-HB

➤ Analyse élémentaire

- Analyseur élémentaire : Elementar Vario Micro Cube
- Balance : Mettler Toledo UMX5Comparator, précision 0.1µg
- Hotte de pesée : a1 safetech ST1-1200

La Figure 2-4 montre l'analyseur élémentaire.



Figure 2-4. Analyseur Elementar Vario Micro cube / Université de Montpellier

➤ Analyse des centres

- MEB - EDS à Pression Variable de la D.C.AR (MEB FEG Supra 40 VP Zeiss) équipé d'un détecteur de rayons-X (OXFORD Instruments) X-MAX SDD relié à une plateforme de microanalyseur EDS (Inca Dry Cool, sans Azote liquide).

La Figure 2-5 montre le dispositif d'analyse de cendre.



Figure 2-5. Dispositif d'analyse des cendres / PETROCI

2.2.2 Méthodes

2.2.2.1 Préparation des résidus

Les échantillons de résidus ont été préparés selon la norme américaine ASTM E 1757 - 01.

L'échantillonnage de la paille de riz a été effectué dans les rizières après la récolte du riz paddy. La balle de riz et la coque de café ont été collectées à proximité des décortiqueuses. Enfin, le cortex de cacao a été prélevé dans des plantations de cacao après la récolte des fèves.

Les échantillons ont été découpés en petits morceaux, puis étalés sur des tables pour être séchés à l'air libre. Ils ont été retournés au moins une fois par jour pour assurer un séchage uniforme et inhiber la croissance microbienne. Ils ont été considérés comme séchés lorsque la variation de masse a été inférieure à 1% en 24 heures. Les échantillons séchés ont été broyés à l'aide d'un broyeur électrique. Le broyat obtenu a été tamisé. La fraction du broyat retenue sur le tamis à mailles 20 a été retraitée jusqu'à ce qu'il n'en reste plus sur ce tamis. Celle retenue sur le tamis à maille 80 a été conservé pour les analyses élémentaire et immédiate. Enfin, la fraction retenue dans le plateau inférieur a été conservé pour l'analyse des cendres.

2.2.2.2 Analyse immédiate

Différentes analyses ont été effectuées sur les échantillons de résidus selon les normes Américaine et Européenne. Ces analyses ont permis de déterminer la composition immédiate de l'échantillon de biomasse ; à savoir : le taux d'humidité, les teneurs en matières volatiles, en cendres et en carbone fixe.

○ Taux d'humidité

Le taux d'humidité de l'échantillon a été déterminé selon la norme NF EN ISO 18134-1 (2016). Le procédé a consisté à sécher l'échantillon dans une étuve à 105°C jusqu'à masse constante. En effet, dans un creuset de masse (m_0), préalablement séché à l'étuve à 105°C, sont ajoutés 300 g de broyat. L'ensemble (creuset + matière) de masse (m_1) est séché à l'étuve pendant 12 heures puis refroidit au dessiccateur jusqu'à la température ambiante et pesé. L'ensemble est remis à l'étuve

pour une durée d'une heure, puis refroidit au dessiccateur et pesé de nouveau. L'opération est répétée jusqu'à ce que la différence de masse entre deux pesées successives soit inférieure à 0.1 g ; la dernière pesée est notée (m_2). Le taux d'humidité (w), exprimé en pourcentage, est déterminé selon la relation (2.1).

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0} \times 100 \quad (2.1)$$

m_0 : Masse du creuset (en g) ;

m_1 : Masse du creuset et de l'échantillon avant séchage (en g) ;

m_2 : Masse du creuset et de l'échantillon après séchage (en g).

○ **Teneur en cendres**

La teneur en cendre de l'échantillon a été déterminée selon la norme ASTM E 1755-01. Le procédé a consisté à l'incinération d'un échantillon déshydraté dans un four à moufle à 550°C et maintenu à cette température jusqu'à l'obtention d'une masse constante. En effet, dans un creuset préalablement séché à l'étuve à 105°C, de masse (m_0), sont ajoutés 5g de broyat déshydraté. L'ensemble (creuset + matière) de masse (m_3) est mis au four à 550°C pendant trois heures puis refroidit dans un dessiccateur jusqu'à la température ambiante et pesé. L'ensemble est remis au four pour une durée d'une heure, puis refroidit au dessiccateur et pesé de nouveau. L'opération est répétée jusqu'à ce que la différence de masse entre deux pesées successives soit inférieure à 0.3 mg ; la dernière pesée est notée (m_4). Le taux de cendre (A), exprimé en pourcentage, est déterminé selon la relation (2.2).

$$A = \frac{m_4 - m_0}{m_3 - m_0} \times 100 \quad (2.2)$$

m_0 : Masse du creuset (en g) ;

m_3 : Masse du creuset et de l'échantillon déshydraté avant incinération (en g) ;

m_4 : Masse du creuset et de la cendre (en g).

○ **Teneur en matières volatiles**

La teneur en matières volatiles de l'échantillon a été déterminé selon la norme ASTM E 872 -82. Le procédé a consisté à un séchage de l'échantillon déshydraté dans un four à moufle à 950°C et maintenu à cette température. En effet, dans un creuset à couvert préalablement séché à l'étuve à 105°C, de masse (m'_0), sont ajoutés 5g de broyat déshydraté. L'ensemble (creuset + matière) couvert, de masse (m_5), est mis au four à 950°C pendant sept minutes puis refroidit dans un dessiccateur jusqu'à la température ambiante et pesé (m_6). Le taux de matières volatiles (m_v), exprimé en pourcentage, est déterminé selon la relation (2.3).

$$m_v = \frac{m_5 - m_6}{m_5 - m'_0} \times 100 \quad (2.3)$$

m'_0 : Masse du creuset couvert (en g) ;

m_5 : Masse de l'ensemble (creuset et échantillon déshydraté) couvert avant séchage (en g) ;

m_6 : Masse de l'ensemble (creuset et échantillon carbonisé) couvert après séchage (en g).

○ **Teneur en carbone fixe**

La teneur en carbone fixe (c_f) est calculée par différence selon la relation (2.4).

$$c_f = 100 - (w + m_v + A) \quad (2.4)$$

c_f , m_v , A et w représentent respectivement la teneur en carbone fixe, la teneur en matières volatiles, la teneur en cendre et le taux d'humidité de l'échantillon analysé.

2.2.2.3 Analyse élémentaire

L'analyseur Elementar Vario Micro cube a été utilisé pour déterminer les compositions élémentaires de l'échantillon. Au cours de cette analyse, la combustion catalytique de l'échantillon a été effectuée à une température de 1150°C dans un premier four. Puis dans un deuxième four à 850°C, sur du cuivre chaud, les gaz de combustion ont été réduits en N_2 , CO_2 , H_2O , et SO_2 dans un courant de gaz porteur He. Le mélange gazeux a été ensuite séparé dans une colonne TPD (Brevet Elementar) « colonne de désorption à température programmable ». Enfin, le signal a été détecté par un catharomètre TCD « détecteur à conductivité thermique ». La Figure 2-6 montre le dispositif de microanalyse avec détection chromatographique. Cette analyse a permis de déterminer les proportions en carbone (C), hydrogène (H), azote (N), et soufre (S) de l'échantillon. Cependant, la teneur en oxygène a été calculée par différence selon la relation suivante (2.5):

$$O = 100 - (C + H + N + S) \quad (2.5)$$

C, H, N, et S sont respectivement les compositions massiques de carbone, d'hydrogène, d'azote, et de soufre de l'échantillon sec analysé.

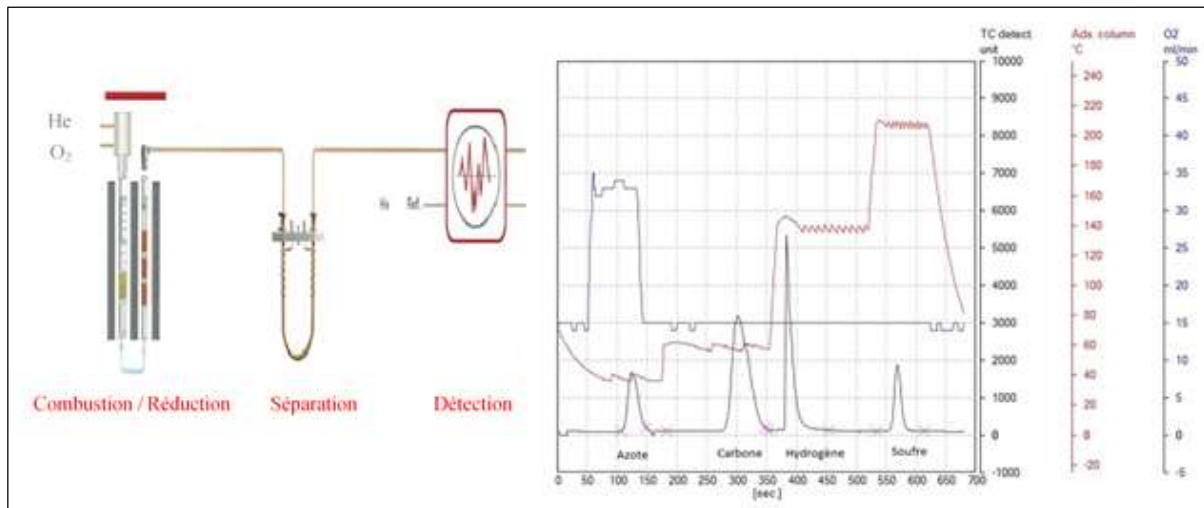


Figure 2-6. Dispositif de microanalyse avec détection chromatographique

2.2.2.4 Pouvoir calorifique supérieur

L'équation utilisée pour déterminer les pouvoirs calorifiques supérieurs des échantillons est basée sur les données des analyses élémentaires et immédiates. La formule proposée est la suivante (Titiloye *et al.*, 2013) :

$$PCS_{\text{sec}} = 0,3491 C + 1,1787 H + 0,1005 S - 0,1034 O - 0,0151 N - 0,0211 A \quad (2.6)$$

C, H, N, S et O sont respectivement les compositions massiques de carbone, d'hydrogène, d'azote, de soufre et d'oxygène de l'échantillon sec analysé.

2.2.2.5 Analyse des cendres

L'analyse des cendres de l'échantillon a été effectuée à l'aide d'un MEB - EDS à Pression Variable de la D.C.AR. (MEB FEG Supra 40 VP Zeiss), équipé d'un détecteur de rayons-X (OXFORD Instruments) X-MAX SDD relié à une plateforme de microanalyseur EDS (Inca Dry Cool, sans Azote liquide). L'identification de la composition chimique des cendres a été réalisée selon la méthode de la Spectrométrie à Diffusion d'Énergies (EDS). Cette méthode consiste à mesurer l'énergie de transition des électrons au niveau des nuages électroniques des séries K, L et M des atomes de l'échantillon. Ainsi, l'acquisition de la composition chimique élémentaire s'est effectuée en quatre étapes : acquisition de l'image (SE ou ASB), Calibrage de la sonde, acquisition de la composition chimique et traitement des données.

2.3 Résultats et discussion

2.3.1 Analyse immédiate

Les résultats de l'analyse immédiate des échantillons de résidus sont énumérés dans le Tableau 2.1. Les analyses immédiates révèlent que les résidus ont des teneurs en humidité comprises entre 7 et 13 %. Ils sont donc adaptés aux procédés de conversion thermique tels que la combustion directe. Aussi, les différents résidus de culture ont des teneurs élevées en matières volatiles, comprises

entre 64,02 % et 72,94 % en masse de matière sèche. Ces résidus sont plus faciles à enflammer et à brûler que le charbon. Toutefois, en raison de leurs faibles teneurs en carbone fixe, la combustion des différents résidus est plus rapide et plus difficile à contrôler que celle du charbon. En fait, les résidus de culture ont des teneurs en carbone fixe comprises entre 1,92 % et 13,2 %.

Les analyses révèlent également que les résidus de culture ont des teneurs en cendres comprises entre 8 et 23,7 %. Cette forte teneur en cendres ou en matières inorganiques peut révéler une tendance à la scorification et à l'agglomération de celles-ci, aussi à l'encrassement et à la corrosion des échangeurs de chaleur lorsqu'ils sont brûlés dans une chaudière.

L'encrassement est associé à l'accumulation de dépôts sur les parois des équipements de transfert de chaleur, ce qui entraîne une diminution de l'efficacité de l'échange de chaleur (*Han et al, 2014*). L'agglomération des scories et des cendres est caractérisée par des dépôts sur les parois de la chambre de combustion où le transfert de chaleur radiative est dominant. Ces dépôts se forment en raison de la faible température de fusion des cendres et de la présence de sable (*Aho et Taipale, 2013*). La corrosion est la détérioration des parois des équipements. Elle est causée par l'interaction entre les éléments corrosifs et les surfaces métalliques des échangeurs de chaleur.

L'apparition de l'un de ces problèmes affecte le bon fonctionnement des systèmes de combustion, réduisant la durée de vie des équipements et augmentant les coûts de maintenance (*Mcilveen-Wright et al, 2012*).

Tableau 2.1. Analyse immédiate (% en masse) des résidus agricoles

Résidus	Humidité	Matières volatiles	Cendre	Carbone Fixe	Référence
Balle de riz	7,82	64,02	14,96	13,2	
Paille de riz	9,52	64,86	23,7	1,92	
Coque de café	11,3	72,94	8	7,76	
Cortex de cacao	12,33	66,32	10,77	10,61	
Charbon	7,5	34,0	4,9	53,6	(<i>Kumar et al, 2017</i>)

2.3.2 Analyse des cendres

Les résultats de l'analyse des cendres des échantillons de résidus sont énumérés dans le Tableau 2.2. Les principaux constituants des cendres de la balle de riz et de la paille de riz sont le silicium (64,5 % - 74,8 %), le tungstène (8,70 %), le potassium (6,98 % - 13 %), le phosphore (4,95 %) et le calcium (4,33 %). Cependant, les cendres de la coque de café et du cortex de cacao sont principalement composées de potassium (72,1% -77,5%), de calcium (6,82% - 9,76%) et de magnésium (3,02% - 5,5%).

La présence de métaux alcalins (Na et K) et de phosphore dans le combustible a un effet négatif sur les propriétés de fusion des cendres. Ces éléments abaissent la température de fusion des cendres, ce qui entraîne l'agglomération et la scorification des cendres sur les parois de la chambre de combustion ainsi que l'encrassement et la corrosion des surfaces métalliques des échangeurs de chaleur (*Nielsen et al, 2000*). Ces phénomènes seront plus observés pendant la combustion de la coque de café et du cortex de cacao, où les températures de fusion des cendres seront très basses en raison de leur forte teneur en potassium.

Bien que le silicium ait un point de fusion extrêmement élevé (1700°C), en présence de K, il peut former des silicates alcalins à très faible température de fusion (environ 750°C) (*Carlsson et al, 2014*) et constituer des dépôts sur les parois du matériau (*Du et al., 2013*). Ces phénomènes d'agglomération et de scorification des cendres, d'encrassement et de corrosion des surfaces métalliques des échangeurs de chaleur peuvent être observés pendant la combustion en chaudière des différents résidus des cultures. Les températures de fusion des principaux oxydes résultant de la combustion de la biomasse agricole sont indiquées dans le Tableau 2.3 (*Bardeau, 2009*).

La présence de traces de métaux, tels que le fer (Fe), le cuivre (Cu), le zinc (Zn), le nickel (Ni), le cobalt (Co), le manganèse (Mn) et le plomb (Pb), est observée dans les cendres des différents résidus des cultures. Ainsi, la combustion de ces résidus dans une chaudière peut être une source d'émissions de métaux lourds dans l'environnement. Cependant, ces métaux lourds, présents dans les fumées, peuvent être capturés à l'aide de filtres à manches et de filtres électrostatiques (*Khan et al., 2009*). La Figure 2-7 présente le spectre EDS des cendres de la paille de riz et de la balle de riz, et leurs compositions élémentaires. La Figure 2-8 présente le spectre EDS des cendres de la coque de café et du cortex de cacao, et leurs compositions élémentaires.

Tableau 2.2. Composition élémentaire (% en masse) des cendres des résidus agricoles

Résidus	K ₂ O	CaO	MgO	P ₂ O ₅	SO ₃	SiO ₂	CuO	Cl	PbO	CoO	Fe ₂ O ₃	MnO	Na ₂ O	WO ₃	ZnO	NiO	Al ₂ O ₃
Balle de riz	6,98	0,67	2,25	4,95	0,15	74,78	0,35	0,15	--	0,22	0,3	0,2	0,1	8,68	0,1	0,12	--
Paille de riz	13	4,33	1,95	1,48	0,95	64,45	0,72	1,27	--	0,16	0,9	0,6	0,67	8,74	0,32	--	0,46
Coque de café	72,05	9,76	3,02	2,55	3,54	1,65	0,59	3,35	1,67	0,17	0,73	0,14	0,26	--	0,12	0,4	--
Cortex de cacao	77,53	6,82	5,5	2,81	2,56	1,35	1,18	0,65	0,6	0,35	0,3	0,23	0,12	--	--	--	--

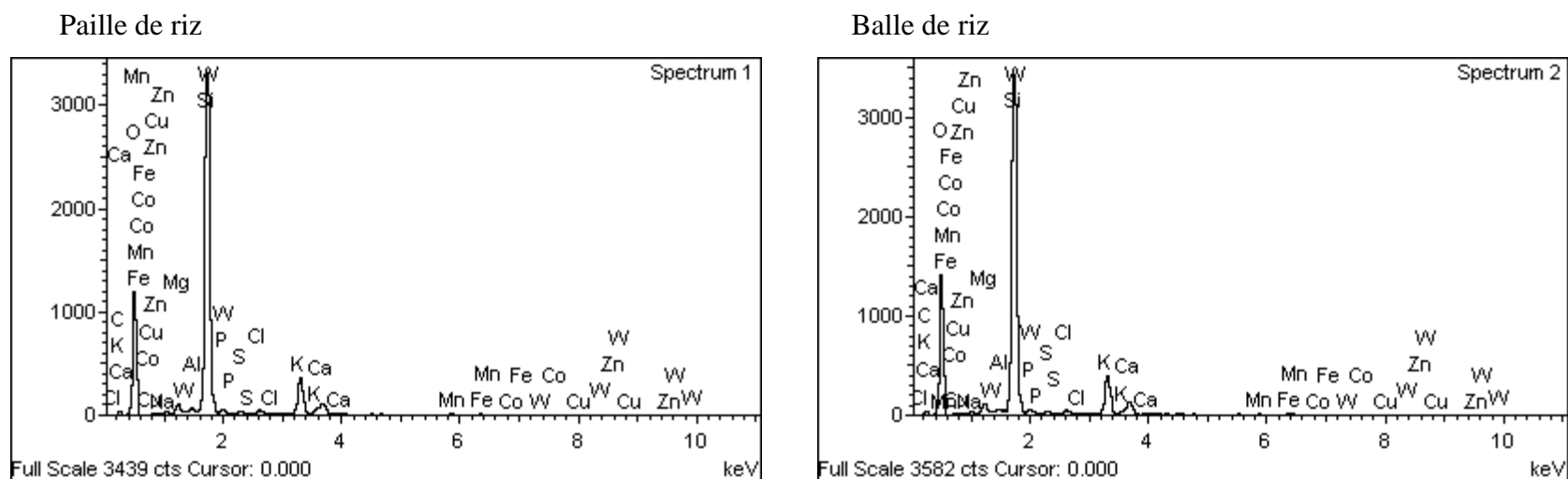


Figure 2-7. Spectres EDS des cendres de la paille de riz et de la balle de riz, et leurs compositions élémentaires

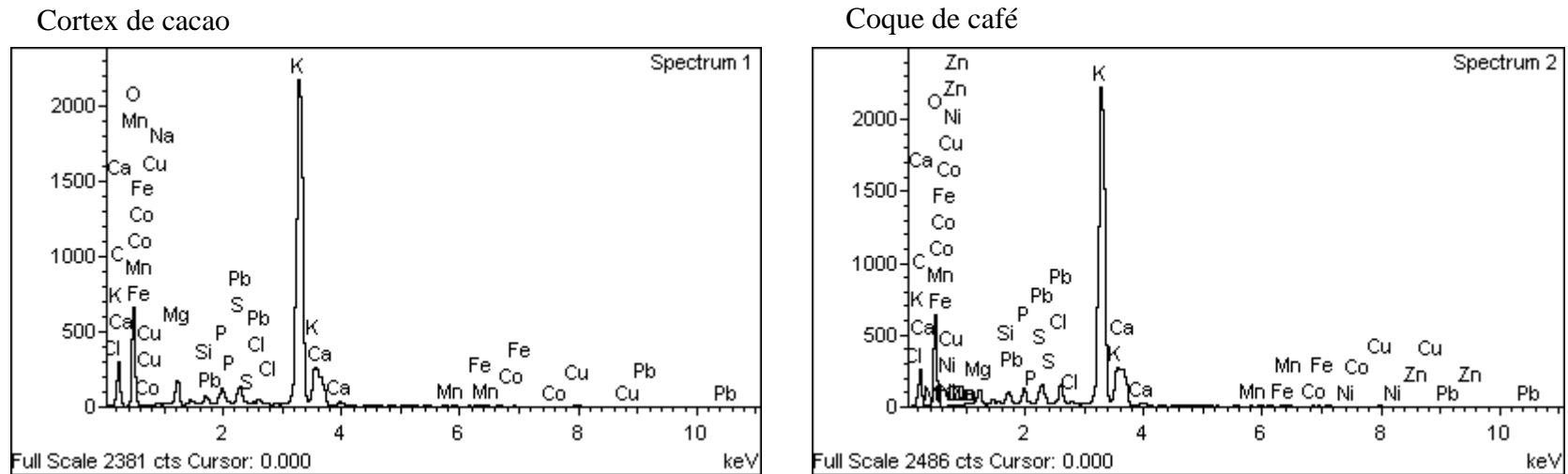


Figure 2-8. Spectres EDS des cendres du cortex de cacao et de la coque de café, et leurs compositions élémentaires

Tableau 2.3. Température de fusion des principaux oxydes de la biomasse agricole

Oxydes	SiO ₂	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	MgO
Température (°C)	1715	350	2521	1565	2040	563	2800

2.3.3 Analyse élémentaire et pouvoir calorifique supérieur

Le Tableau 2.4 présente les résultats de l'analyse élémentaire et les pouvoirs calorifiques supérieurs des échantillons de résidus de culture. Selon les résultats de l'analyse élémentaire, l'azote, le soufre et le chlore sont présents dans les échantillons à des concentrations significatives. Les concentrations d'azote se situent entre 0,5 % et 3,01 %. Celles du soufre et du chlore varient entre 0,02% et 0,32%. En outre, les teneurs en carbone, en hydrogène et en oxygène sont respectivement, C : 33,51 -39,68%, H : 4,73-5,60% et O : 51,58-61%. Sur une base sèche, les valeurs typiques pour la teneur en biomasse sont les suivantes : C : 30-60%, H : 5-6% et O : 30-45% (Akram et al, 2013). Enfin, les résidus ont des pouvoirs calorifiques compris entre 10,49 MJ/kg et 14,71 MJ/kg.

Tableau 2.4. Analyse élémentaire (% en masse) et PCS (MJ/kg) des résidus agricoles

Résidus	C	H	N	S	O	Cl	PCS	O/C	H/C
Balle de riz	37,02	5,56	0,95	0,21	56,26	0,02	13,35	1,52	0,15
Paille de riz	33,51	4,73	0,50	0,26	61,00	0,30	10,49	1,82	0,14
Coque de café	39,68	5,41	3,01	0,32	51,58	0,27	14,71	1,30	0,14
Cortex de cacao	37,36	5,60	1,59	0,22	55,23	0,07	13,70	1,48	0,15

La combustion de ces résidus pourrait conduire à la formation de polluants gazeux tels que les oxydes de soufre (SO_x) et les oxydes d'azote (NO_x) ; à la formation de polluants acides tels que l'acide chlorhydrique (HCl), les dioxines (PCDD) et les furannes (PCDF). Aussi, elle pourrait être une source importante d'émissions de particules affectant la qualité de l'air (Oberberger et al, 2004). En effet, selon les conditions de combustion, l'azote présent dans le combustible peut être oxydé en NO_x. Le soufre peut former du SO_x (principalement du dioxyde de soufre). Le Cl peut être rejeté sous forme de HCl, mais peut également contribuer à la formation de dibenzodioxines chlorées (PCDD) et de dibenzofuranes polychlorés (PCDF). Le Na, le K, le Ca et le Mg peuvent réagir avec le Cl ou le S, entraînant la formation de dépôts ou d'aérosols contenant des chlorures et des sulfates (Hertel et al, 2012).

Le S et le Cl jouent tous deux un rôle dans la corrosion des équipements. En raison des températures élevées dans les systèmes de combustion, des éléments tels que le S et le Cl se volatilisent lors de la combustion, formant des particules de sel par condensation (Nzihou et Stanmore, 2015). Ces

particules de sel peuvent se déposer sur les parois des échangeurs de chaleur, provoquant la corrosion des pièces métalliques à l'intérieur de la chaudière (*Vassilev et al, 2011*). Une partie du S reste également dans les cendres sous forme de sulfate (40-90 %) (*Zhang et al, 2015*).

Plusieurs techniques peuvent être utilisées pour réduire les émissions des oxydes d'azote et des oxydes de soufre lors de la combustion de la biomasse en chaudière (*Obernberger et al, 2006 ; Khan et al., 2009*) :

Les possibilités technologiques de réduction des émissions de NO_x comprennent les mesures primaires et les mesures secondaires. Les mesures primaires consistent à réaliser une combustion étagée avec de l'air ou avec le combustible. La combustion étagée avec l'air consiste à faire entrer dans la chambre de combustion, à une température comprise entre 900°C et 1100°C, de l'air secondaire en combinaison avec un excès d'air primaire et un temps de rétention des gaz de combustion de 0,5 seconde. Avec cette méthode, une réduction de 30% à 50% des émissions de NO_x par rapport à la combustion conventionnelle est possible. Cependant, la combustion étagée avec le combustible consiste à introduire de façon progressive le combustible dans la chambre de combustion. Cette méthode montre un potentiel de réduction légèrement supérieur à la combustion étagée avec l'air. Mais elle est limitée aux biocombustibles ayant des particules fines.

Les mesures secondaires comprennent : la réduction sélective non catalytique (RSNC) et la réduction sélective catalytique (RSC). Dans les deux techniques, l'ammoniac (NH₃) ou l'urée (CO(NH₂)₂) est injecté pour réduire les NO_x en N₂, respectivement sans ou avec un catalyseur.

Dans le cas de la RSNC, l'agent réducteur est injecté dans une chambre de réduction du four à des températures de fonctionnement comprises entre 850°C et 950°C. Le temps de séjour des gaz de combustion dans le four après l'injection d'ammoniaque/urée doit être compris entre 0,3s et 0,5 s. En moyenne, une réduction de 60% à 70% des NO_x peut être réalisée avec RSNC. Lorsque l'urée est utilisée comme agent réducteur, on peut s'attendre à une augmentation des émissions de CO d'environ 10 à 20 ppm. En outre, dans le cas de la RSC, l'ammoniac ou l'urée est injecté dans le gaz de combustion (en aval de la chaudière). Cette technique a besoin d'un catalyseur à base d'oxyde de platine, ou d'oxyde de titane ou d'oxyde de vanadium pour amorcer les réactions de réduction. La RSC fonctionne de façon optimale à des températures comprises entre 220°C et 270°C en utilisant l'ammoniac et ; entre 400°C et 450°C à l'aide d'urée. Une réduction moyenne des NO_x entre 80% et 95% peut être obtenue par RSC. Mais le problème majeur de la RSC est la

probabilité d'une désactivation du catalyseur par les métaux alcalins contenus dans les gaz de combustion des systèmes de combustion de la biomasse.

Les oxydes de soufre (SO_x) peuvent être capturés dans les gaz de combustion de la biomasse par le calcaire (CaCO₃) ou la dolomite (CaMg(CO₃)) à des températures de combustion comprises entre 800°C et 900°C. Généralement à ces températures le CaCO₃ se décompose en CaO et en CO₂. Le CaO réagit alors avec le SO₂ et l'O₂, ou avec le SO₃, pour former le CaSO₄. Théoriquement, la formation de CaSO₄ nécessite 1 mole de Ca pour chaque mole de S libérée lors de la combustion du combustible.

Le carbone (C), l'hydrogène (H) et l'oxygène (O) sont considérés comme les principaux composants de tout biocarburant solide et ont une influence directe sur le pouvoir calorifique. En effet, lors de la combustion, le C et le H sont oxydés par des réactions exothermiques, formant du CO₂ et du H₂O et libérant leur contenu énergétique (*Haji., 2013*). L'analyse élémentaire révèle une forte proportion d'oxygène par rapport au carbone dans les échantillons. Alors qu'un ratio oxygène/carbone élevé est un indicateur d'une faible valeur du pouvoir calorifique (*McKendry, 2002a*). Le pouvoir calorifique diminue également avec l'augmentation de la teneur en cendres de la biomasse (*Syamsiro. et al, 2012*). Ainsi, la paille de riz a le pouvoir calorifique supérieur (PCS) le plus faible (10,49 MJ/kg). Cela est probablement dû à sa forte teneur en cendres. Le cortex de cacao a un PCS plus élevé que la balle de riz et la paille de riz. Mais c'est la coque de café qui a le pouvoir calorifique le plus élevé de la liste.

Le pouvoir calorifique est un paramètre important pour le processus de combustion directe. Ainsi, la biomasse ayant un pouvoir calorifique élevé convient aux processus de combustion directe (*Parascanu et al, 2017*). Les pouvoirs calorifiques des résidus sont plus faibles que celui du charbon. Mais leur combustion produit moins de CO₂, un gaz à effet de serre, que celle du charbon. Le Tableau 2.5 montre la composition élémentaire (% en masse) et le PCS (MJ/kg) du charbon (*Shafie et al, 2012 ; Kumar, et al, 2015*). Il est assez remarquable, à travers ce tableau, que le charbon a une teneur en carbone élevée par rapport aux différents résidus de culture.

Tableau 2.5. Analyse élémentaire (% en masse) et PCS (MJ/kg) du charbon.

	C	H	N	S	O	PCS	O/C	H/C
Charbon	88	6	1,2	0,8	4	27,4435	0,045	0,068

Conclusion

Les propriétés thermochimiques de la biomasse sont importantes pour le choix du procédé de conversion thermique. C'est pourquoi, avant d'utiliser la paille de riz, la balle de riz, la coque de café et le cortex de cacao comme combustibles dans une centrale thermique à biomasse, une analyse de ces propriétés a été réalisée. Les résultats de l'analyse révèlent que ces résidus ont des teneurs élevées en matières volatiles (64,02-72,94 %) et en cendres (8-23,7%) ; leurs pouvoirs calorifiques supérieurs sont compris entre 10,49 MJ/kg et 14,71 MJ/kg et leurs teneurs en humidité sont comprises entre 7,82% à 12,33%.

Il a été observé que les cendres des résidus de culture de riz sont riches en silicium avec des teneurs comprises entre 64,45 % et 74,78 %. Alors que les cendres des résidus des cultures de café et cacao sont riches en potassium avec des teneurs respectives de 72,05% et 77,53 %.

Ces cendres peuvent provoquer l'encrassement et la corrosion des parois métalliques de la chaudière. En outre, la combustion de ces résidus peut également être une source d'émission de polluants gazeux tels que les oxydes de soufre, les oxydes d'azote, les polluants acides (HCl, PCDD et PCDF), et de particules nocives dans l'environnement en raison de la présence d'azote (0,95-3,01%), de chlore (0,02-0,30%) et de soufre (0,21-0,32%).

Toutefois, plusieurs techniques peuvent être utilisées pour réduire les émissions des oxydes d'azote, des oxydes de soufre, et des particules nocives issus de la combustion des résidus dans une centrale thermique. Les possibilités technologiques de réduction des émissions de NOx comprennent les mesures primaires et les mesures secondaires. Les oxydes de soufre (SOx) peuvent être capturés dans les gaz de combustion par le calcaire (CaCO₃) ou la dolomite (CaMg(CO₃)). Enfin, les particules (PM) et les métaux lourds présents dans les fumées peuvent également être capturés à l'aide de filtres à manches ou de filtres électrostatiques.

CHAPITRE 3 : CARACTERISATION DES MELANGES UTILISABLES

CHAPITRE 3 : CARACTERISATION DES MELANGES UTILISABLES

Introduction

Selon les résultats de la caractérisation thermochimique des résidus, les combustions respectives de la balle de riz, de la paille de riz, de la coque de café et du cortex de cacao, dans une centrale thermique à biomasse, peuvent être à l'origine de l'émission de polluants acides et de plusieurs dégâts sur le matériel.

En effet, la paille de riz et la coque de café ont des teneurs en chlore supérieures à la limite environnementale. Selon Obernberger et al. (2006), il faut s'attendre à l'émission d'acide chlorhydrique pendant la combustion de la biomasse en chaudière, lorsque la teneur en chlore de celle-ci est supérieure à 0,1%. Les polluants acides, produits par le chlore, seront évacués dans les fumées. Cependant, si le point de rosée acide de ces fumées est atteint lors de l'échange de chaleur ou dans le conduit d'évacuation des fumées, la condensation de ces acides provoquera la corrosion des échangeurs de chaleur (Ghysel et al., 2010).

Aussi, les cendres de la coque de café et du cortex de cacao sont riches en potassium. Du fait de la température de fusion faible du potassium, ces cendres peuvent s'accumuler dans le foyer de la chaudière et être à l'origine de l'encrassement et de la corrosion des échangeurs de chaleurs.

Toutefois, la mise au point de meilleurs mélanges pourrait aboutir à un mix combustible plus respectueux de l'environnement et efficace énergétiquement. Dans la littérature, les analyses énergétiques et exergétiques des centrales thermiques ont été utilisées par plusieurs auteurs pour évaluer les performances énergétiques de la biomasse. En effet, à partir des rendements énergétiques et exergétiques des centrales de cogénération, Braimakis et al. (2020) ont évalué les performances énergétiques de la biomasse pour la production d'électricité et le chauffage urbain. Ces analyses ont également été utilisées par Aliyu et al. (2020) pour déterminer les gradients de températures et l'exergie détruite à travers les composants d'une centrale thermique à cycle combiné.

Ce chapitre utilise les analyses énergétiques et exergétiques d'un modèle de centrale thermique à biomasse de 5 MW, et les caractéristiques thermochimiques de la balle de riz, de la paille de riz,

de la coque de café et du cortex de cacao pour caractériser leurs différents mélanges pouvant être utilisés dans la chaudière pour une production propre et efficace d'électricité.

3.1 Méthodologie

3.1.1 Matériels

Les analyses énergétiques et exergétiques ont été effectuées à partir des propriétés thermodynamiques de la vapeur d'eau de l'installation motrice à vapeur de la centrale thermique. Ces propriétés ont été déterminées à partir de la simulation du modèle de l'installation sous la version gratuite du logiciel Thermoptim version 2.82 et vérifiées manuellement à partir des tables thermodynamiques de la vapeur d'eau.

Le modèle de la centrale thermique à biomasse se compose de six principaux éléments : une chaudière à biomasse, une turbine à vapeur à deux étages, un condenseur, deux pompes d'alimentation en eau (BP et HP), une bêche alimentaire équipée d'un dégazeur, et un générateur électrique. La Figure 3-1 présente le modèle de l'installation motrice à vapeur.

L'installation fonctionne selon le cycle à vapeur de Hirn. Ce cycle thermodynamique est caractérisé par une surchauffe de la vapeur, à pression constante, à la sortie de la chaudière, à travers une série de tubes portés à plus haute température.

Pour le modèle de l'installation thermique considéré dans la présente étude, de la vapeur surchauffée, à une pression de 60 bars et une température de 420°C par la chaudière, est fournie à la turbine à un débit massique de 6,5 kg/s. Une partie de cette vapeur est purgée et détendue jusqu'à 5 bars au point intermédiaire "6". La vapeur restante est détendue jusqu'à une pression de 0,1 bar au point intermédiaire "7". Elle est condensée à pression constante jusqu'au point 1. A partir de ce point, l'eau condensée est pompée à une pression de 5 bars et mélangée à la vapeur de purge dans la bêche alimentaire. L'eau chaude issue de ce mélange est pompée vers la chaudière à biomasse pour une reprise du cycle.

La Figure 3-2 montre la représentation du modèle de l'installation motrice à vapeur sous Thermoptim. Le Tableau 3.1 présente les propriétés thermodynamiques du fluide de travail de l'installation.

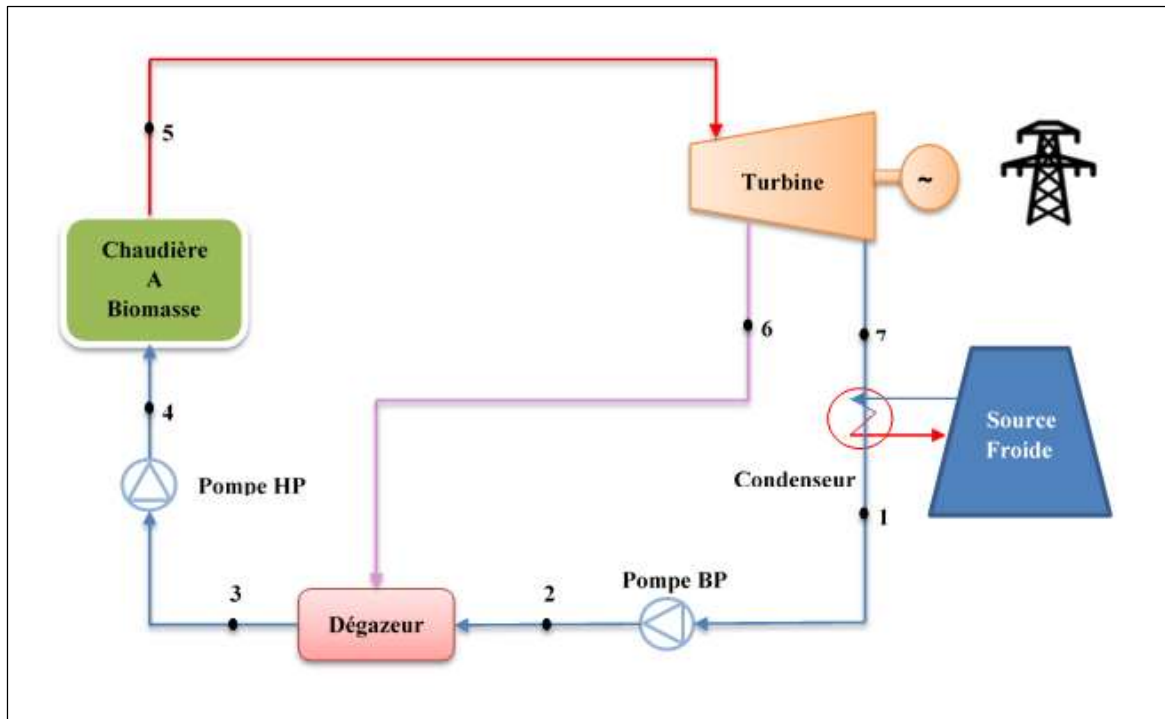


Figure 3-1. Modèle de l'installation motrice à vapeur

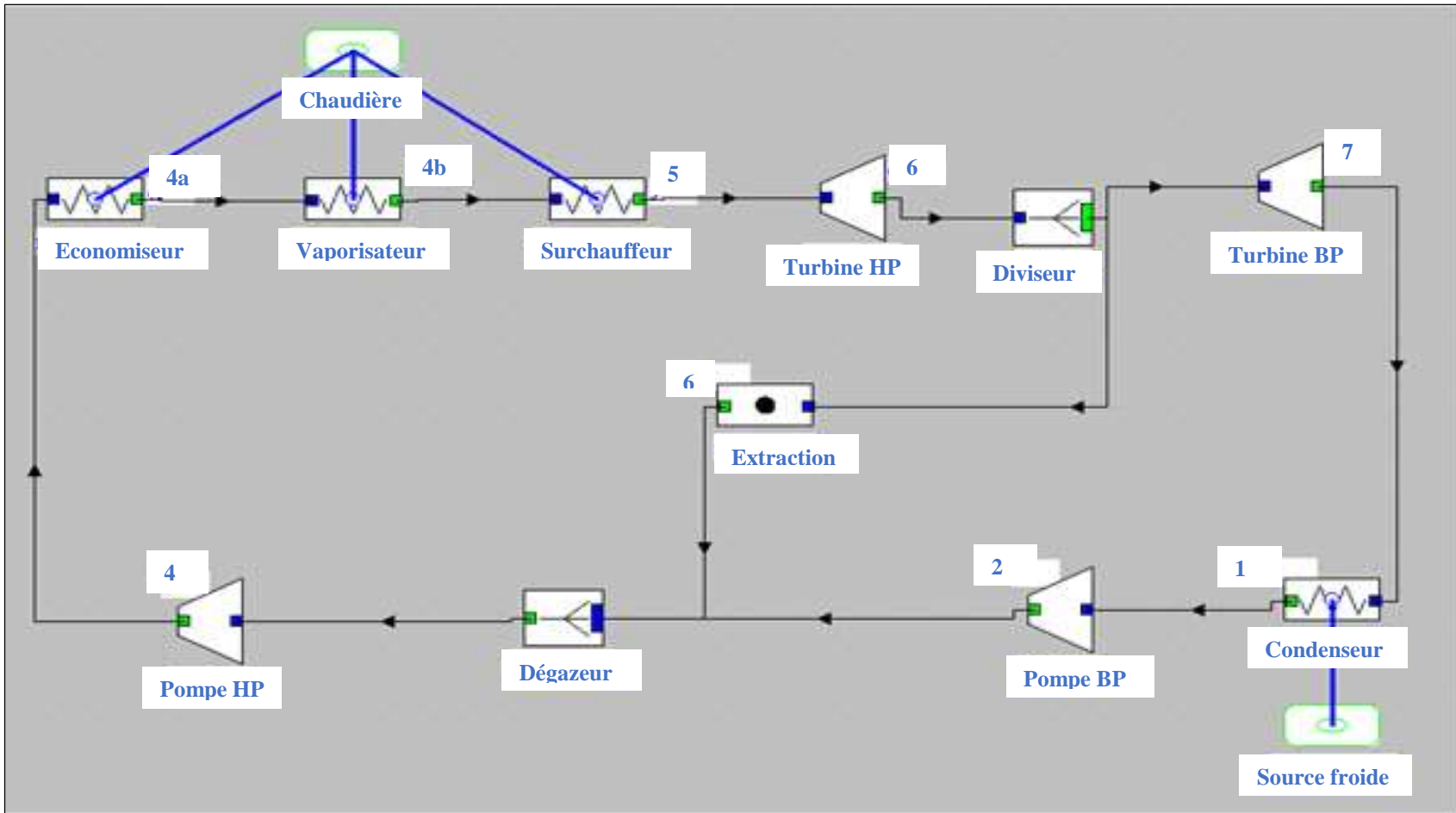


Figure 3-2. Modèle de l'installation motrice à vapeur sous le logiciel Thermoptim

Tableau 3.1. Propriétés thermodynamiques de la vapeur d'eau de l'installation

Point	Pression (bar)	Température (°C)	Enthalpie spécifique (kJ/kg)	Entropie spécifique (kJ/kg/K)	Débit massique (kg/s)
1	0,1	45,833	191,867	0,649	5,525
2	5	45,855	192,388	0,649	5,525
3	5	139,034	585,076	1,729	6,5
4	60	139,652	591,315	1,730	6,5
5	60	420	3230,283	6,620	6,5
6	5	179,505	2810,312	6,962	0,975
7	0,1	45,833	2362,834	7,455	5,525

3.1.2 Méthodes

3.1.2.1 Caractéristiques thermochimiques des mélanges

Pour déterminer les caractéristiques thermochimiques des mélanges, l'étude néglige les effets d'interaction entre les différents composants des mélanges. En effet, les effets d'interaction entre deux ou plusieurs matériaux se produisent lorsque l'effet total produit par le mélange de ces matériaux est supérieur (synergie) ou inférieur (antagonisme) à la somme des effets produit par les matériaux respectifs (*Farrow et al., 2013*). Au cours d'expériences d'analyse thermogravimétrique, il a été constaté par plusieurs auteurs (*Cozzani et al., 1995 ; Danias et al., 2018 ; Heikkinen et al., 2004 ; Skodras et al., 2009*) que les effets d'interaction entre les composants des déchets agricoles étaient négligeables. D'autres chercheurs (*Cao et al., 2019 ; Raveendran et Khilar, 1996*) ont également constaté que l'interaction entre les composantes de la biomasse était insignifiante. Enfin, Heikkinen et al. (2004) ont pu établir que le comportement thermique d'un mélange de résidus peut être décrit à partir de la méthode de la somme pondérée. Selon cette méthode, la courbe de dégradation thermique d'un mélange est égale à la somme des contributions de ses composants respectifs. Dans cette étude, les caractéristiques thermochimiques des mélanges de résidus, sont déterminés à partir de la somme pondérée des caractéristiques thermochimiques de leurs constituants respectifs, définie par la relation (3.1) (*Heikkinen et al., 2004*) :

$$\psi_{Mél} = x\psi_A + y\psi_B \quad (3.1)$$

x : Proportion du résidu A dans le mélange ;

y : Proportion du résidu B dans le mélange ;

ψ_A : Caractéristique thermochimique du résidu A ;

ψ_B : Caractéristique thermochimique du résidu B ;

$\psi_{Mél}$: Caractéristique thermochimique du mélange.

3.1.2.2 Analyse énergétique du modèle de la centrale thermique

Le premier principe de la thermodynamique a été utilisé par plusieurs auteurs (*Beerbaum et al., 2000 ; Morin et al., 2012 ; Sahoo et al., 2016*) pour analyser les performances énergétiques des centrales thermiques. Selon ce principe, le bilan énergétique d'un système ouvert est donné par la relation (3.2) (*Kaushik et al., 2011*) :

$$\sum \dot{Q}_k + \dot{m} \left(h_i + \frac{c_i^2}{2} + gZ_i \right) = \dot{m} \left(h_0 + \frac{c_0^2}{2} + gZ_0 \right) + \dot{W} \quad (3.2)$$

\dot{Q}_k : Chaleur transférée vers le système à partir de la source à la température T_k (W) ;

\dot{W} : Puissance développée par le système (W) ;

\dot{m} : Débit massique de matière (kg/s) ;

c : Vitesse du fluide de travail (m/s) ;

z : Altitude du courant au-dessus du niveau de la mer (m) ;

g : Accélération gravitationnelle (m/s^2) ;

h : Enthalpie spécifique du flux (J/kg) à une température donnée ;

0 : État de référence ;

i : État final.

○ **Bilan énergétique**

En ignorant la vitesse et l'énergie potentielle du fluide de travail dans l'équation (3.2), le bilan énergétique détaillé des principaux composants de la centrale thermique à biomasse s'établit comme suit :

Chaudière

Dans la chaudière, les apports de chaleur se font à pression constante, aucune puissance mécanique n'est fournie au fluide de travail.

La puissance thermique \dot{Q}_{ch} fournie par la chaudière au fluide de travail s'exprime comme suit (Sahoo et al., 2016) :

$$\dot{Q}_{ch} = \dot{m}_w(h_5 - h_4) \quad (3.3)$$

L'énergie thermique issue de la combustion de la biomasse ne peut être transmise au fluide de travail que lorsque la température de ce dernier est plus faible. La puissance thermique produite par la combustion de la biomasse est obtenue à partir de la relation suivante (Sahoo et al., 2016):

$$\dot{Q}_{biom} = \dot{m}_{biom} \times PCI \quad (3.4)$$

Avec

$$PCI = PCS - (226.04 \times H) - 25.82 \times w \quad (3.5)$$

\dot{m}_{biom} : Débit massique de la biomasse alimentant la chaudière (kg/s);

H : Teneur en hydrogène de la biomasse (%);

w : Humidité de la biomasse (%),

PCI : Pouvoir calorifique inférieur de la biomasse (J/kg);

PCS : Pouvoir calorifique supérieur de la biomasse (J/kg).

La puissance thermique produite par la combustion de la biomasse peut également être déterminée à partir de la relation (3.6):

$$\dot{Q}_{biom} = \frac{\dot{Q}_{ch}}{\eta_{ch}} \quad (3.6)$$

η_{ch} : Rendement de la chaudière à biomasse.

Le rendement de la chaudière est un paramètre important qui permet de déterminer le débit d'alimentation en biomasse requis dans diverses conditions d'exploitation.

Dans leurs travaux, sur la modélisation et le dimensionnement d'une centrale thermique hybride solaire-biomasse, Suresh, et al. (2019) montrent que le rendement de la combustion d'une chaudière ne peut être de 100%. En effet, la chaudière offre un rendement maximale de combustion lorsque le combustible et l'oxydant réagissent dans des conditions stœchiométriques. Mais, l'écart par rapport à la quantité stœchiométrique entraîne une baisse du rendement (Basu, 2015 ; Strzalka et al., 2013). Alors, le rendement de combustion de la chaudière retenu dans cette étude est 80%. Il est identique à celui de l'étude de Sahoo et al. (2016).

Turbine à vapeur

La turbine assure la détente de la vapeur de façon adiabatique. La puissance nette \dot{W}_{net} fournie par la turbine pendant la détente de la vapeur s'exprime par (Sahoo et al., 2016):

$$\dot{W}_{net} = \dot{m}_w [(h_5 - h_6) + (1 - \alpha)(h_6 - h_7)] \quad (3.7)$$

Où " α " est la fraction de la vapeur soutirée à la turbine.

Condenseur

Le condenseur a la charge de refroidir la vapeur à pression et température constantes jusqu'à l'obtention de l'eau liquide. Cette condensation ne nécessite pas de pièce mobile. La puissance \dot{Q}_{cond} perdue par la vapeur dans le condenseur s'exprime comme suit (Sahoo et al., 2016):

$$\dot{Q}_{cond} = \dot{m}_w (1 - \alpha)(h_7 - h_1) \quad (3.8)$$

Pompes

La compression de l'eau se fait sans transfert de chaleur en régime continu. Les puissances requises pour comprimer l'eau sont déterminées par les relations suivantes (*Sahoo et al., 2016*):

$$\text{Pompe BP :} \quad \dot{W}_{P_{BP}} = \dot{m}_w(1 - \alpha)(h_2 - h_1) \quad (3.9)$$

$$\text{Pompe HP :} \quad \dot{W}_{P_{HP}} = \dot{m}_w(h_4 - h_3) \quad (3.10)$$

○ **Rendement énergétique**

Le rendement énergétique (η_{en}) de la centrale thermique est déterminé par l'équation (*Kaushik et al., 2011*):

$$\eta_{en} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{biom}} \quad (3.11)$$

○ **Débit de combustible**

Le débit massique de la biomasse alimentant la chaudière déduit des équations (3.4) et (3.11) s'exprime comme suit :

$$\dot{m}_{biom} = \frac{1}{\eta_{en}} \frac{\dot{W}_{net}}{PCI} \quad (3.12)$$

3.1.2.3 Analyse exergetique du modèle de la centrale thermique

Dans un système ouvert opérant en régime permanent, en combinant la loi de conservation pour l'énergie et la loi de non conservation pour l'entropie, le bilan exergetique s'établit comme suit (*Dincer et al., 2013*) :

$$\sum_e \dot{m}_e e_{X_e} - \sum_s \dot{m}_s e_{X_s} + \sum_k \left[1 - \frac{T_0}{T_k} \right] \dot{Q}_k + \sum_k \dot{W}_k - E_{XD} = 0 \quad (3.13)$$

\dot{m} : Débit massique de matière (kg/s)

e_X : Exergie spécifique associée à la matière (J/kg) ;

T_0 : Température de l'environnement (K) ;

T_k : Température (K) ;

\dot{Q}_k : Puissance thermique échangée par le système à une température T_k (W) ;

\dot{W}_k : Puissance non thermique (mécanique, électrique...) reçue par le système (W) ;

E_{XD} : Exergie détruite (W) ;

e : entrée et s : sortie.

L'exergie (E_X) en chaque point d'un flux de matière en écoulement s'écrit (*Dincer et al., 2013*):

$$E_X = \dot{m} [(h - h_0) - T_0(s - s_0)] \quad (3.14)$$

s_0 : Entropie spécifique du flux à la température T_0 et à la pression P_0 (J/kg.K) ;

s : entropie spécifique du flux (J/kg.K) à une température et pression données.

○ **Rendement exergetique**

Pour la centrale thermique à biomasse, le rendement exergetique est défini par la relation suivante (Sahoo et al., 2016):

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{W}_{net}}{E_{X,biom}} \quad (3.15)$$

$E_{X,biom}$: Exergie liée au flux de la biomasse (W).

L'exergie liée au flux de la biomasse est égale à la somme de son exergie physique et de son exergie chimique. L'exergie physique de la biomasse est négligée car son état initial est identique à l'état de l'environnement de référence. Cependant son exergie chimique s'exprime comme suit (Sahoo et al., 2016):

$$E_{X,biom} = \dot{m}_{biom} \times \phi \times PCI \quad (3.16)$$

Où ϕ est un facteur multiplicateur calculé comme suit (Szargut, 2005) :

$$\phi = 1,0401 + 0,1728 \frac{H}{C} + 0,0432 \frac{N}{C} + 0,2169 \frac{O}{C} \times \left(1 - 0,2062 \frac{H}{C} \right) \quad (3.17)$$

Où C, H, N et O représentent respectivement les compositions massiques (%) de carbone, d'hydrogène, d'azote et d'oxygène de la biomasse sèche.

$T_0 = 298,15K$, Température de référence ; et

$P_0 = 1atm$, Pression de référence

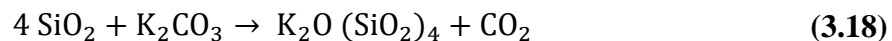
3.2 Résultats et discussion

Les résultats des analyses révèlent que le rendement énergétique du modèle de l'installation thermique est de 24,26%. Selon l'étude de Yoshida et al. (2003), le rendement énergétique des centrales thermiques à biomasse est compris entre 19% et 26%.

Aussi, les rendements exergetiques de l'installation thermique oscillent entre 16,75% et 18,09% et les débits de combustibles de la chaudière varient entre 1,62 kg/s et 2,34 kg/s. Les teneurs en chlore des différents mélanges de résidus se situent entre 0,02% et 0,3%. Enfin, les cendres des mélanges sont principalement composées de matériaux réfractaires : silicium (en SiO_2), calcium (en CaO), tungstène (en WO_3) ; et de métaux alcalins : potassium (en K_2O).

En fonction de leurs teneurs en potassium, ces cendres peuvent s'agglomérer sur les parois froides des échangeurs ou encore réagir avec ces parois et créer des phénomènes de corrosion à l'intérieur de la chaudière. Le potassium (K) est considéré comme le principal catalyseur de ces phénomènes. Ainsi, il faut s'attendre aux phénomènes de fusion des cendres et de corrosion lorsque la teneur de potassium dans les cendres est supérieure à 7% (Oberberger et al., 2006).

En effet, du fait de la température de fusion très basse du potassium, les oxydes ou les sels alcalins peuvent réagir avec les composés silicates du lit selon la formule (3.18) pour former des mélanges eutectiques qui fondent à des températures plus basses que leurs constituants respectifs. Selon Armesto et al. (2002), ces mélanges eutectiques ont des points de fusion d'environ 764°C. De nombreux auteurs (Mikkanen et colb, 1999 ; Nielsen et al., 2000) ont également relevé l'existence de différents composés eutectiques avec des températures de fusion de 740°C. Composé de blocs de silice et de minéraux compacts, ces mâchefers étouffent la combustion et bouchent l'évacuation des cendres aggravant le phénomène de corrosion des parois.



Cinq catégories de combustibles issus des mélanges des résidus de cultures ont des teneurs en chlore inférieures à 0,1%. Il s'agit des combustibles de la catégorie 1 à la catégorie 5.

La combustion en chaudière de ces combustibles ne sera ni source d'émission d'acide chlorhydrique, ni à l'origine de la corrosion des échangeurs de chaleur induites au chlore.

Cependant, les combustibles de la catégorie 6 ont des teneurs en chlore supérieures à 0,1%. Leur combustion en chaudière est susceptible d'être à l'origine de l'émission d'acide chlorhydrique dans l'environnement et de la corrosion des parois métalliques de l'équipement.

La Figure 3-3 montre une photographie de la corrosion dans la chaudière lors de la combustion de la biomasse à haute teneur en chlore (*Khan et al., 2009*).



Figure 3-3. Corrosion dans la chaudière lors de la combustion de la biomasse.

- **Catégorie 1** : Mélanges de paille de riz avec des proportions massiques de balle de riz supérieures à 70%.

La Figure 3-4 montre d'une part l'évolution des teneurs des principaux composants des cendres des mélanges de la paille de riz avec la balle de riz et d'autre part l'évolution des teneurs en chlore de ces mélanges. Les mélanges sont constitués à partir de résidus dont les cendres sont riches en silicium mais pauvres en potassium. Les teneurs en silicium des résidus étant comprises entre 64,45% et 74,78% ; celles des combustibles issus de leurs mélanges seront supérieures à 64,45%. La température de fusion de l'oxyde de silicium étant de 1715°C (*Bardeau, 2009*), les cendres de ces combustibles fondront à des températures élevées. Alors, les phénomènes d'agglomération des cendres, d'encrassement et de corrosion des échangeurs de chaleur seront limités pendant leur combustion dans la chaudière.

Les teneurs en chlore de résidus des cultures de riz sont comprises entre 0,02% et 0,3%. La teneur en chlore la plus élevée étant celle de la paille de riz, alors la concentration en chlore des

combustibles issus des mélanges des résidus de la culture du riz dépendra des proportions massiques de la paille de riz. Ainsi, les combustibles pauvres en chlore (teneur inférieure à 0,1%) issus des mélanges des résidus de la culture du riz devront également être pauvres en paille de riz. Cette catégorie de combustibles confère à l'installation thermique des rendements exergetiques supérieurs à 17,30% pour des débits de combustibles inférieurs à 1,90 kg/s. La Figure 3-5 présente l'évolution des rendements exergetiques et des débits de combustibles obtenus à partir de l'utilisation des mélanges de la balle de riz avec la paille de riz. Le débit de combustible le plus élevé de la chaudière est obtenu avec l'utilisation de la paille de riz. Ce résidu confère à l'installation thermique le rendement exergetique le plus faible. En effet, pour un débit de 2,34 kg/s de paille de riz entrant dans la chaudière, seulement 16,75% de l'énergie thermique produite est convertie en énergie mécanique au niveau de la turbine. Cependant avec la balle de riz, environ 17,5% de l'énergie thermique produite à partir de 1,80 kg/s de combustible est convertie en énergie mécanique au niveau de la turbine. Ainsi, lorsque les proportions massiques de la paille de riz diminuent dans les mélanges, les débits de combustibles alimentant la chaudière diminuent également, mais les rendements exergetiques de l'installation thermique croissent. Ainsi, les combustibles efficaces énergétiquement issus des mélanges des résidus de la culture du riz doivent être riches en balle de riz, mais pauvres en paille de riz.

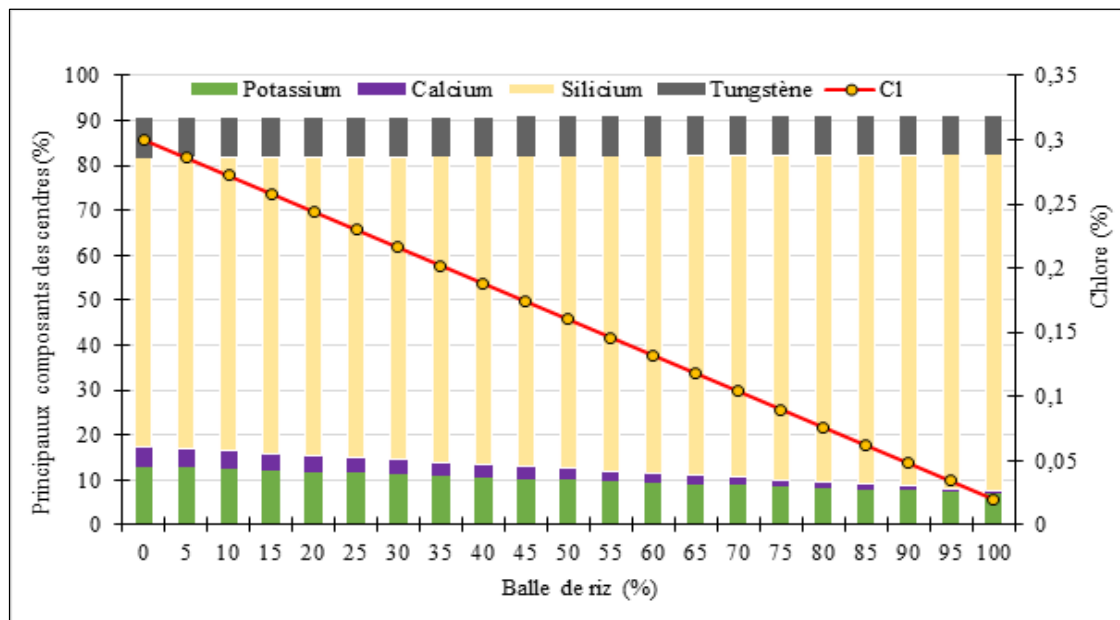


Figure 3-4. Mélanges de la balle de riz avec la paille de riz : Evolutions des teneurs des principaux composants des cendres et des teneurs en chlore

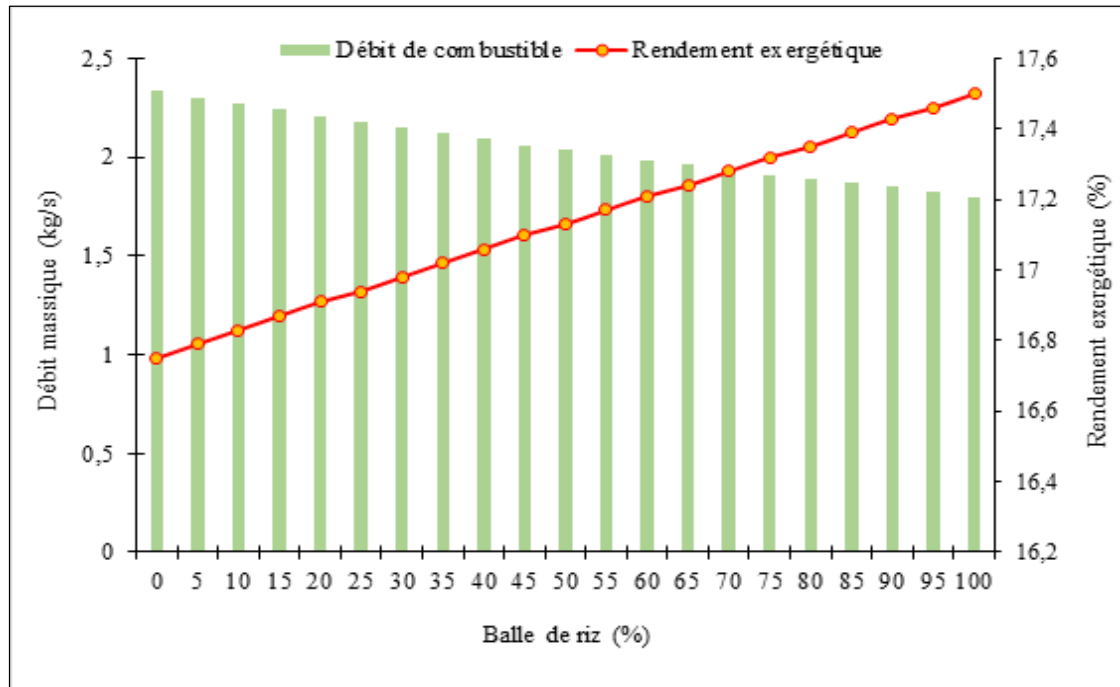


Figure 3-5. Mélanges de la balle de riz avec la paille de riz : Evolutions des débits de combustibles et des rendements exergetiques

- **Catégorie 2 :** Mélanges de cortex de cacao avec des proportions massiques de coque de café inférieures à 15%.

La Figure 3.6 montre d'une part l'évolution des teneurs des principaux composants des cendres des mélanges du cortex de cacao avec la coque de café et d'autre part l'évolution des teneurs en chlore de ces mélanges. Les résidus constituant les mélanges sont tous deux riches en potassium, avec des teneurs comprises entre 72,53% et 77,53%. Leurs teneurs en silicium sont inférieures à 1,70%. Alors les cendres des combustibles issus de ces mélanges fondront à des températures très basses. Cela est dû au fait que les oxydes de potassium fondent à des températures basses voisines de 350°C (Bardeau, 2009). Ainsi, les phénomènes d'agglomération des cendres, d'encrassement et de corrosion des échangeurs de chaleur seront observés pendant la combustion en chaudière de ces combustibles.

La coque de café et le cortex de cacao ont respectivement des teneurs en chlore de 0,27% et 0,07%. Ainsi, la coque de café a la teneur en chlore la plus élevée tandis que celle du cortex de cacao est inférieure à 0,1%. Alors la teneur en chlore des combustibles issus des mélanges des deux résidus

dépend des proportions massiques du cortex de café. En effet, la concentration en chlore des mélanges évolue de manière linéaire et croissante avec les proportions massiques de coque de café. Les combustibles, dont les teneurs en chlore sont inférieures à 0,1%, ont des proportions massiques en coque de café inférieure à 15%. Ces combustibles confèrent à l'installation thermique des rendements exergetiques inférieurs à 17,65% pour des débits de combustibles supérieurs à 1,75 kg/s. La Figure 3-7 présente l'évolution des rendements exergetiques et des débits de combustibles obtenus à partir de l'utilisation des mélanges du cortex de cacao avec la coque de café. Les graphiques montrent que les rendements exergetiques élevés sont obtenus pour des débits de combustibles faibles. Le rendement exergetique le plus élevé est attribué à la combustion de la coque de café dans la chaudière. Pour un débit de combustible de 1,62 kg/s, ce résidu confère à l'installation thermique un rendement exergetique de 18,09%. Ainsi, 18,09% de l'énergie thermique produite par la combustion de ce résidu est convertie en énergie mécanique au niveau de la turbine. Cependant, le rendement exergetique le plus faible et le débit de combustible le plus élevé sont attribués à l'utilisation du cortex de cacao. L'utilisation de ce résidu confère à l'installation thermique un rendement exergetique de 17,60% pour un débit de combustible de 1,77 kg/s. Par conséquent, la courbe des rendements exergetiques de l'installation thermique croit lorsque la proportion massique de coque de café augmente dans le mélange ; et celle des débits de combustibles de la chaudière décroît lorsque les proportions massiques du cortex de cacao diminuent dans les mélanges.

La combustion des combustibles issus des mélanges du cortex de cacao avec des proportions massiques de coque de café inférieures à 15% confèrent à l'installation thermique de bons rendements exergetiques, mais les cendres issues de cette combustion auront tendance à détériorer rapidement les parois et les échangeurs de chaleur de la chaudière.

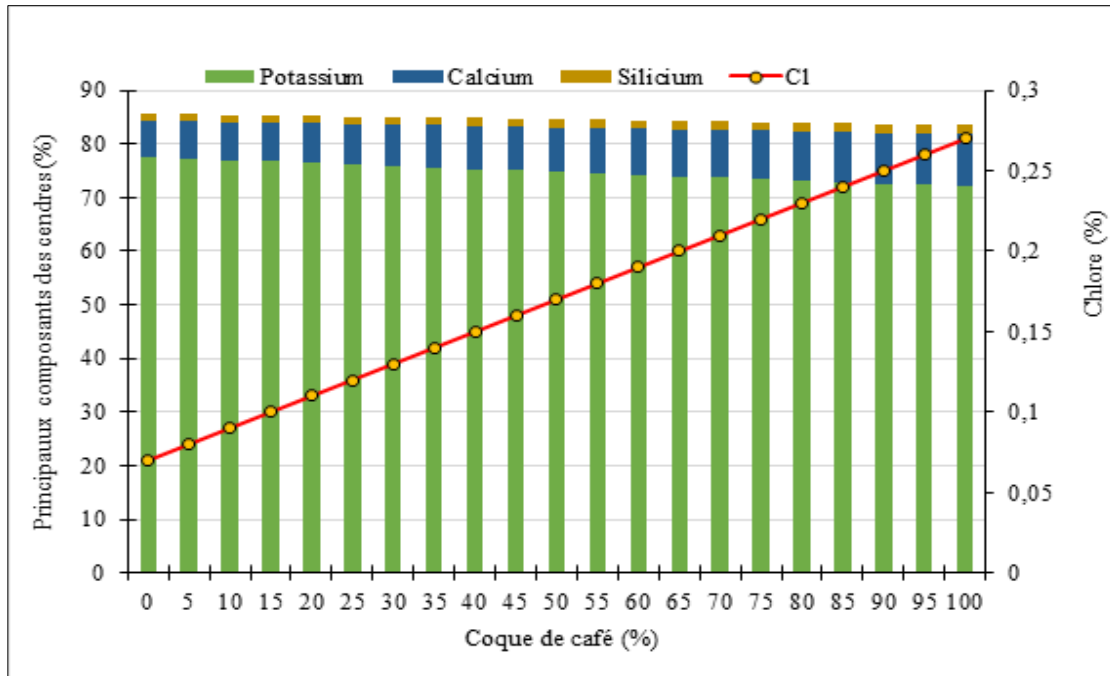


Figure 3-6. Mélanges de la coque de café avec le cortex de cacao : Evolutions des teneurs des principaux composants des cendres et des teneurs en chlore

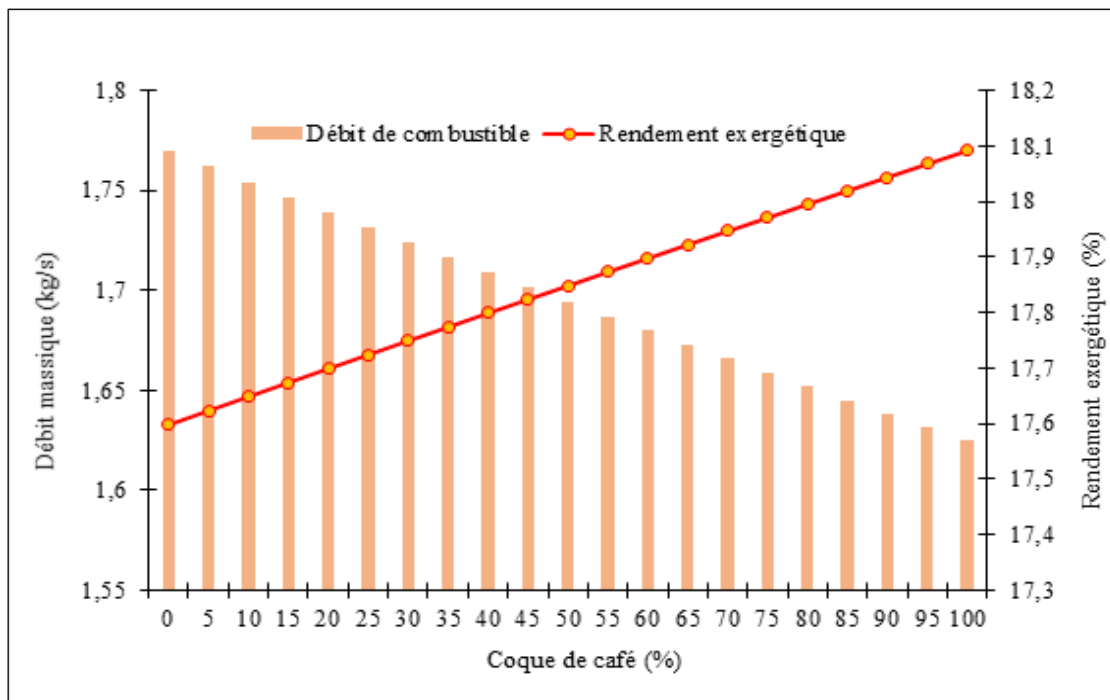


Figure 3-7. Mélanges de la coque de café avec le cortex de cacao : Evolutions des débits de combustibles et des rendements exergétiques

- **Catégorie 3** : Mélanges de cortex de cacao avec des proportions massiques de paille de riz inférieures à 15%.

La Figure 3-8 montre d'une part l'évolution des teneurs des principaux composants des cendres des mélanges de la paille de riz avec le cortex de cacao et d'autre part l'évolution des teneurs en chlore de ces mélanges. Les combustibles sont issus des mélanges de résidus respectivement riches en potassium et en silicium. La teneur en potassium et en silicium des cendres des mélanges dépendra de proportions massiques de chaque résidu. En effet, les cendres de la paille de riz sont riches en silicium, tandis que celle du cortex de cacao sont riches en potassium. Cependant, les combustibles ayant une teneur en chlore inférieure à 0,1%, issus de ces mélanges, ont des cendres riches en potassium. Il s'agit des combustibles issus des mélanges du cortex de cacao avec des proportions de paille de riz inférieures à 15%. Ces combustibles confèrent à l'installation thermique des rendements exergetiques supérieurs à 17,47% pour des débits de combustibles inférieurs à 1,84 kg/s. La Figure 3-9 présente l'évolution des rendements exergetiques et des débits de combustibles obtenus à partir de l'utilisation des mélanges de la paille de riz avec le cortex de cacao. Les graphiques montrent que les rendements exergetiques élevés sont obtenus pour des débits de combustibles faibles. Le rendement exergetique le plus élevé est obtenu à partir de la combustion du cortex de cacao pour un débit de combustible de la chaudière le plus faible. Ainsi, les combustibles issus des mélanges de la paille de riz avec le cortex de cacao confèrent à l'installation thermique des rendements exergetiques élevés lorsque les proportions massiques du cortex de cacao diminuent dans les mélanges. Il est vrai que les combustibles issus des mélanges du cortex de cacao avec des proportions massiques de paille de riz inférieures à 15% confèrent à l'installation thermique de bons rendements exergetiques, mais leurs cendres auront tendance à détériorer les composantes de la chaudière.

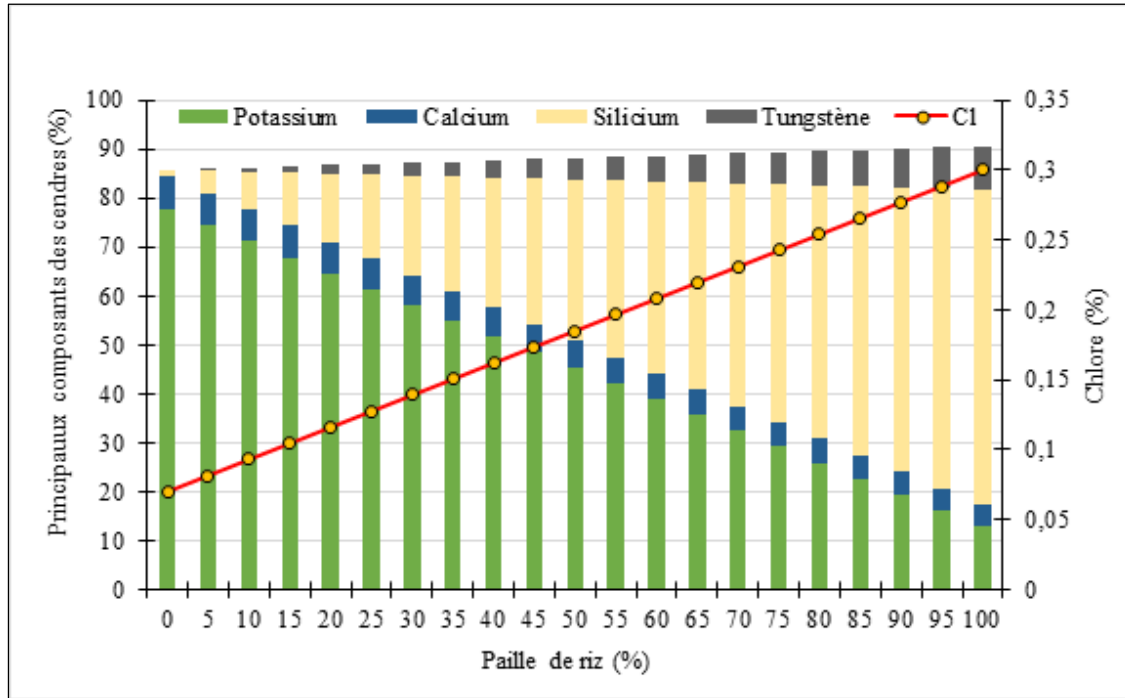


Figure 3-8. Mélanges de la paille de riz avec le cortex de cacao : Evolutions des teneurs des principaux composants des cendres et des teneurs en chlore

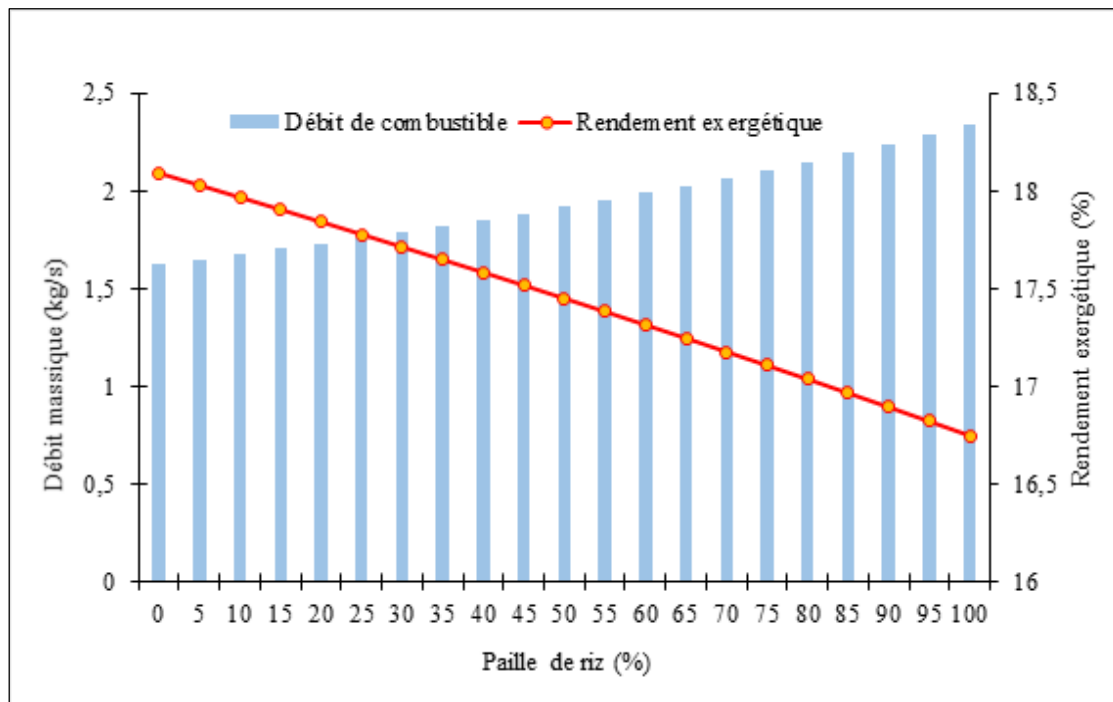


Figure 3-9. Mélanges de la paille de riz avec la coque de café : Evolutions des débits de combustibles et des rendements exergétiques

- **Catégorie 4** : Tous les mélanges de la balle de riz avec le cortex de cacao.

La Figure 3-10 montre d'une part l'évolution des teneurs des principaux composants des cendres des mélanges de la balle de riz avec le cortex de cacao et d'autre part l'évolution des teneurs en chlore de ces mélanges. Les cendres de la balle de riz étant riches en silicium et celles du cortex de cacao en potassium, les cendres des combustibles issus des mélanges des différents résidus seront riches en silicium ou en potassium. Mais, les combustibles ayant des proportions massiques de balle de riz supérieures à 85%, ont des cendres pauvres en potassium. Leurs teneurs en potassium sont inférieures à 20%. Pendant la combustion de ces combustibles en chaudière, les phénomènes d'agglomération des cendres, d'encrassement et de corrosion des parois et des échangeurs seront limités.

Ces combustibles confèrent à l'installation thermique des rendements exergetiques inférieurs à 17,51% pour des débits de combustibles supérieurs à 1,80 kg/s. La Figure 3.11 présente l'évolution des rendements exergetiques et des débits de combustibles obtenus à partir de l'utilisation des mélanges de la balle de riz avec le cortex de cacao. Les graphiques montrent que les rendements exergetiques élevés sont obtenus pour des débits de combustibles faibles. Les rendements exergetiques de l'installation sont compris entre 17,50% et 17,60%. Le rendement exergetique le plus faible est attribué à la combustion en chaudière de la balle de riz pour un débit de combustible de 1,80 kg/s ; tandis que la valeur la plus élevée du rendement exergetique est obtenue à partir de la combustion du cortex de cacao pour un débit de combustible de 1,77 kg/s.

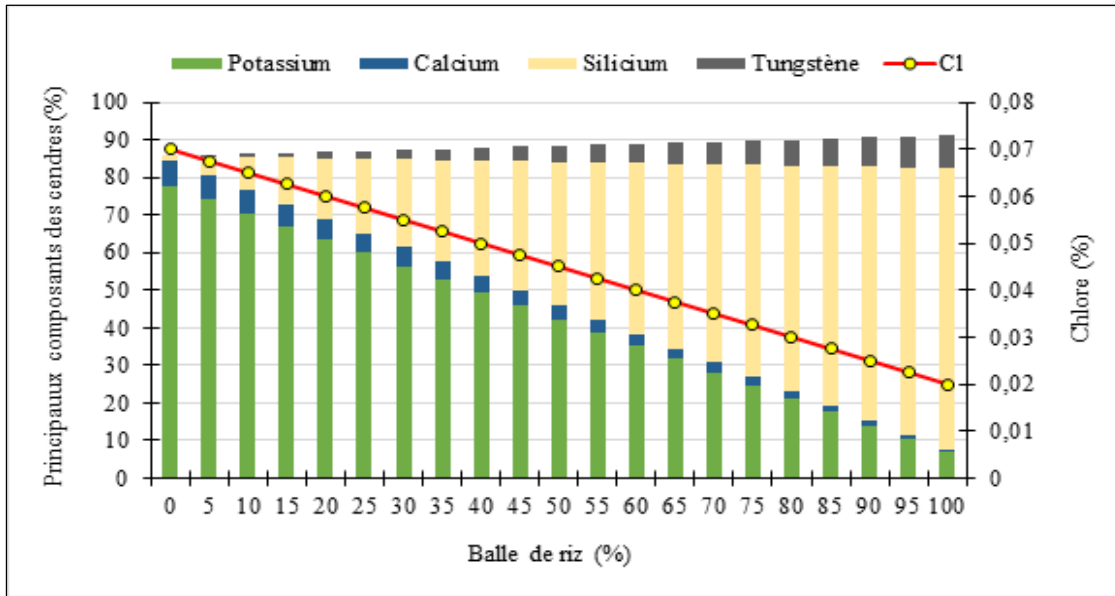


Figure 3-10. Mélanges de la balle de riz avec le cortex de cacao : Evolutions des teneurs des principaux composants des cendres et des teneurs en chlore

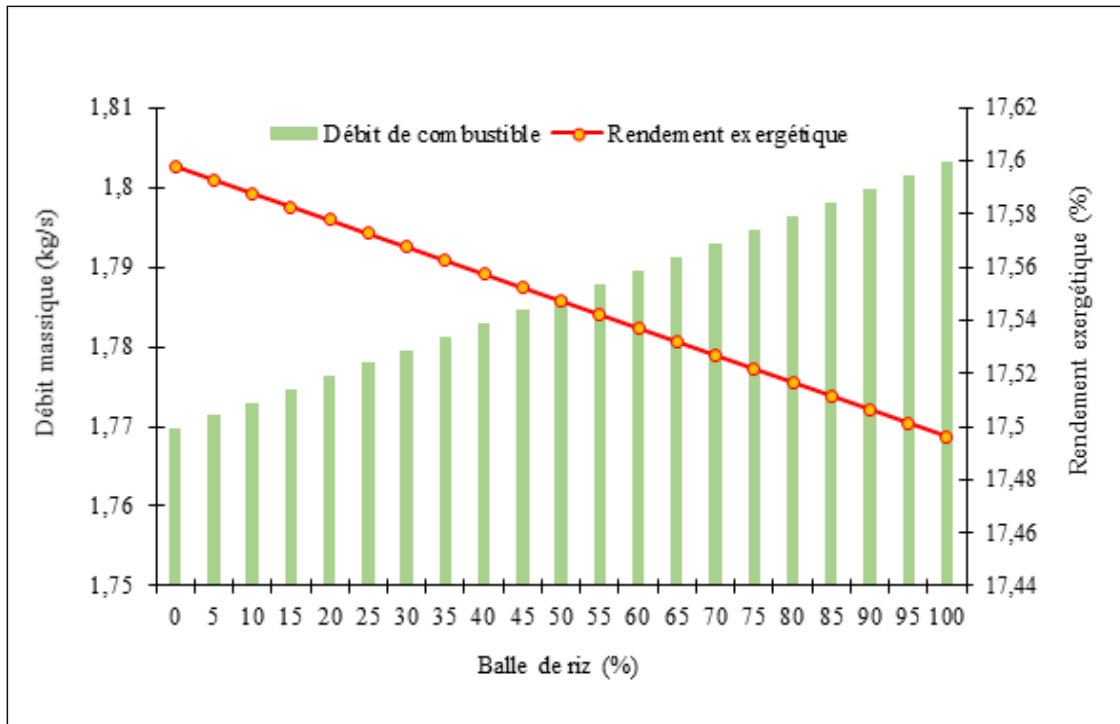


Figure 3-11. Mélanges de la balle de riz avec le cortex de cacao : Evolutions des débits de combustibles et des rendements exergétiques

- **Catégorie 5** : Mélanges de coque de café avec des proportions massiques de balle de riz supérieures à 80%.

La Figure 3.12 montre d'une part l'évolution des teneurs des principaux composants des cendres des mélanges de la balle de riz avec la coque de café et d'autre part l'évolution des teneurs en chlore de ces mélanges. La balle de riz et la coque de café ont des cendres riches respectivement en silicium et en potassium. Alors les combustibles issus de leurs mélanges seront riches en silicium ou en potassium en fonction des proportions massiques de chaque résidu. Cependant, la teneur en chlore de ces combustibles dépendra considérablement de la contribution de la coque de café au mélange. Ce résidu possède une teneur en chlore supérieure à 0,1%. Ainsi, les combustibles ayant une teneur en chlore inférieure à 0,1% sont issus des mélanges de balle de riz avec des proportions massiques de coque de café inférieures à 30%. Toutefois, les combustibles issus des mélanges de coque de café avec des proportions massiques de balle de riz supérieures à 85%, ont des cendres plus pauvres en potassium, avec des teneurs inférieures à 16,74%. Les phénomènes d'agglomération des cendres, d'encrassement et de corrosion des parois de la chaudière seront limités pendant la combustion de ces combustibles. Ils confèrent à l'installation thermique des rendements exergetiques inférieurs à 17,59% pour des débits de combustibles supérieurs à 1,78 kg/s. La Figure 3.13 présente l'évolution des rendements exergetiques et des débits de combustibles obtenus à partir de l'utilisation des mélanges de la balle de riz avec la coque de café. Les graphiques montrent que les rendements exergetiques élevés sont obtenus pour des débits de combustibles faibles. Le rendement exergetique le plus élevé et le débit de combustible le plus faible de l'installation sont attribués à la combustion de la coque de café. Ainsi, lorsque les proportions massiques de ce résidu diminuent dans les mélanges, la courbe des rendements exergetiques décroît tandis que les débits de combustibles augmentent.

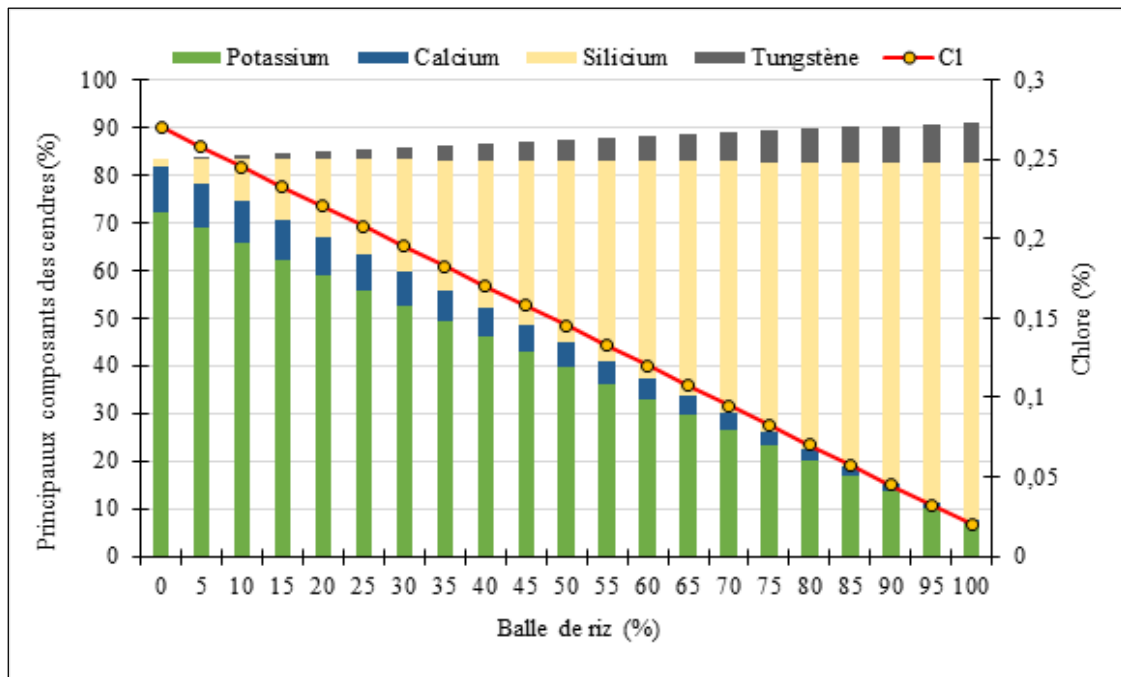


Figure 3-12. Mélanges de la balle de riz avec la coque de café : Evolutions des teneurs des principaux composants des cendres et des teneurs en chlore

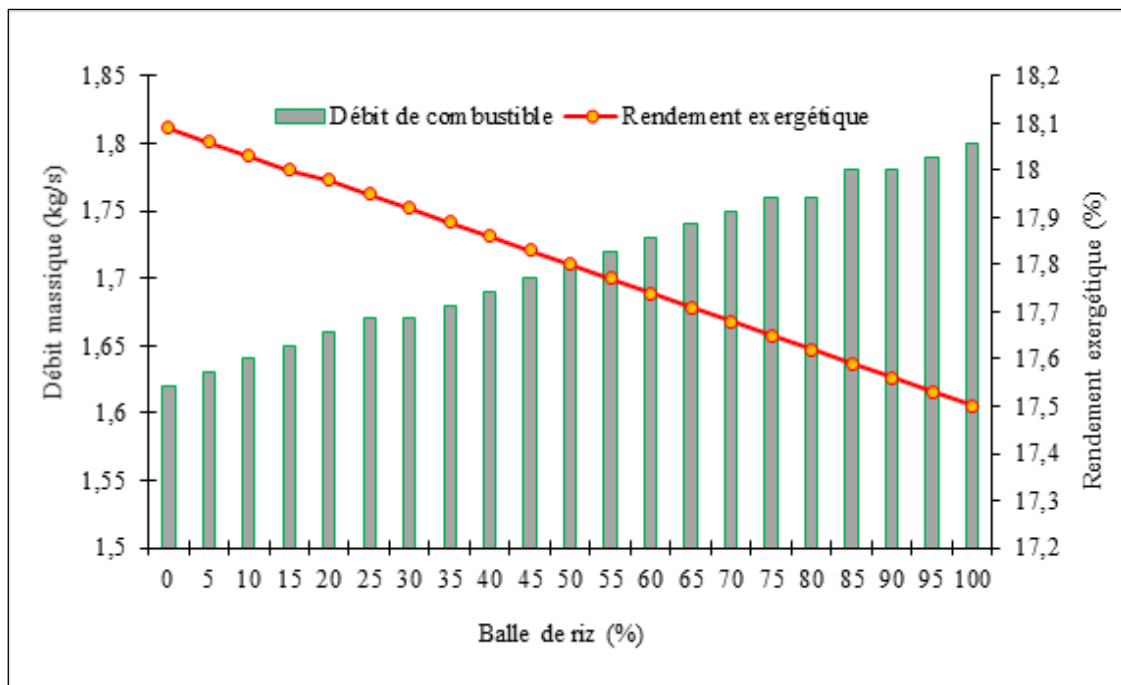


Figure 3-13. Mélanges de la balle de riz avec la coque de café : Evolutions des débits de combustibles et des rendements exergétiques

○ **Catégorie 6** : Mélanges de la coque de café avec la paille de riz

La Figure 3.14 montre d'une part l'évolution des teneurs des principaux composants des cendres des mélanges de la paille de riz avec la coque de café et d'autre part l'évolution des teneurs en chlore de ces mélanges. La paille de riz et la coque de café ont respectivement des teneurs en chlore de 0,30% et 0,27%. Alors, les combustibles issus de leurs mélanges auront des teneurs en chlore supérieures à 0,1%. Leur combustion sera source d'émission d'acide chlorhydrique qui agressera l'environnement et sera à l'origine de la détérioration de la chaudière par le phénomène de corrosion. Même si ces mélanges confèrent à l'installation de bons rendements exergetiques, ils ne peuvent être utilisés comme combustibles de la centrale thermique. La Figure 3-15 présente l'évolution des rendements exergetiques et des débits de combustibles obtenus à partir de l'utilisation des mélanges de la paille de riz avec la coque de café. . Les graphiques montrent que les rendements exergetiques élevés sont obtenus pour des débits de combustibles faibles.

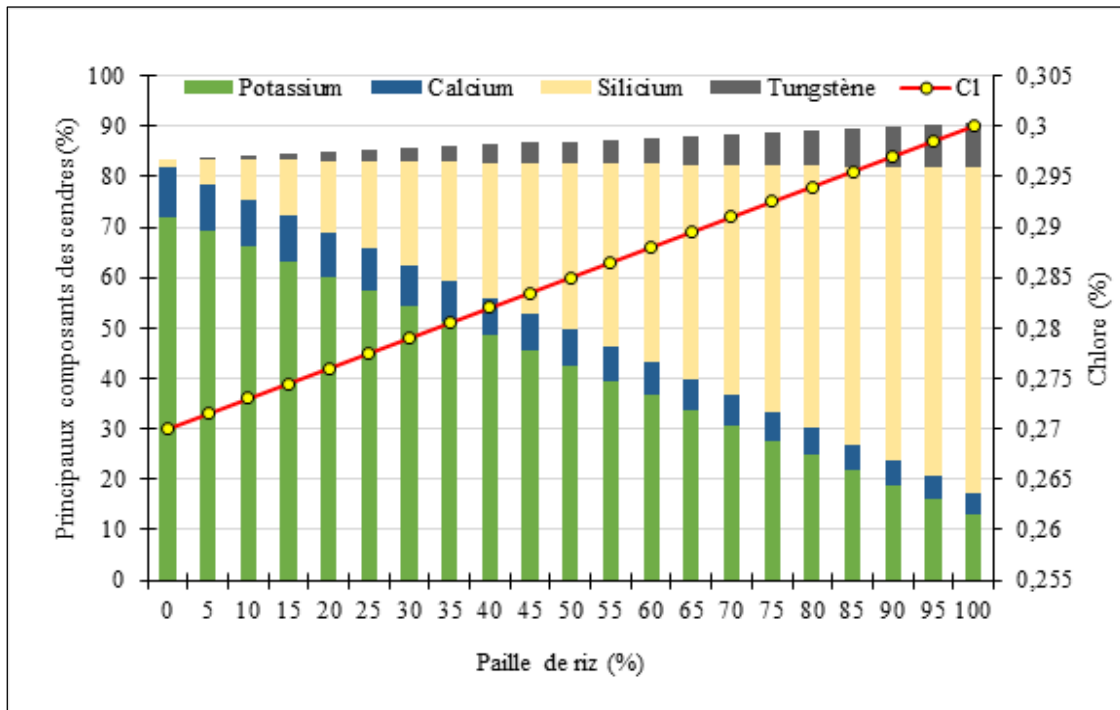


Figure 3-14. Mélanges de la paille de riz avec la coque de café : Evolutions des teneurs des principaux composants des cendres et des teneurs en chlore

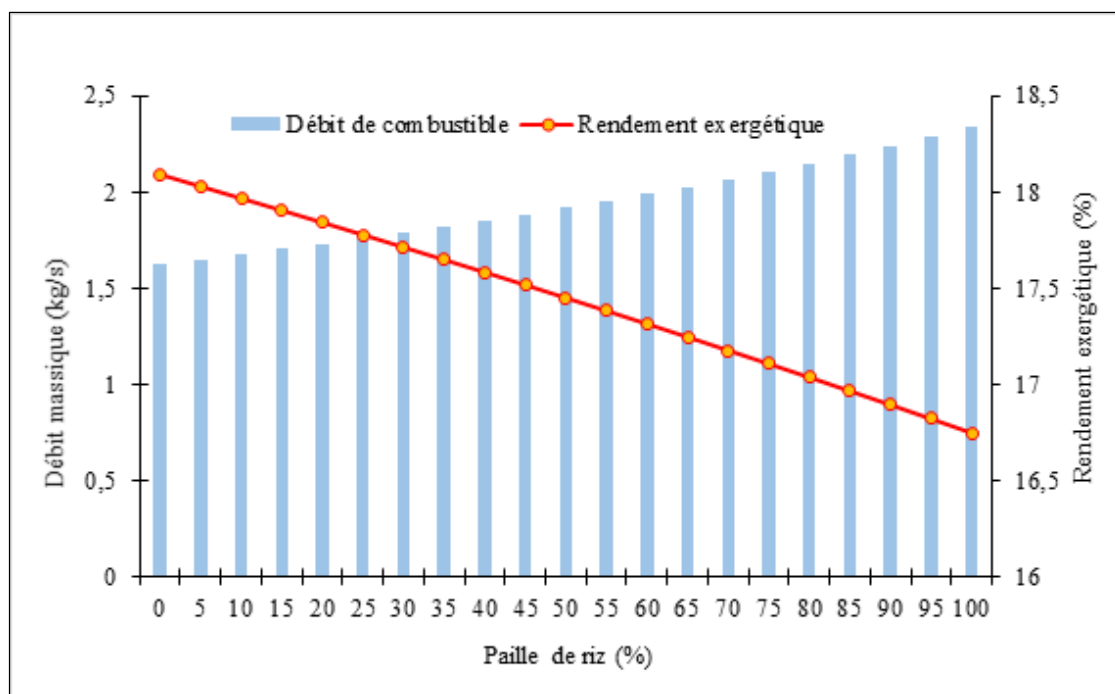


Figure 3-15. Mélanges de la paille de riz avec la coque de café : Evolutions des débits de combustibles et des rendements exergetiques

Conclusion

Cette étude a utilisé les analyses énergétiques et exergetiques d'un modèle de centrale thermique à biomasse de 5 MW, et les caractéristiques thermochimiques des différents résidus de culture pour caractériser les mélanges utilisables.

Les analyses ont permis de calculer le rendement énergétique et d'évaluer les rendements exergetiques et les débits de combustibles de l'installation thermique pour divers mélanges de résidus. Il a été révélé que les rendements exergetiques sont élevés pour des débits de combustibles faibles. Ces deux paramètres étant fonction du pouvoir calorifique du combustible, ils évoluent donc en fonction de cette caractéristique thermochimique. En effet, le débit de combustible est défini à partir d'une fonction inverse du pouvoir calorifique, tandis que le rendement exergetique varie linéairement avec le pouvoir calorifique. Ainsi, lorsque le pouvoir calorifique du combustible est élevé, le rendement exergetique de l'installation thermique est élevé et le débit de combustible de la chaudière est faible.

Aussi, plusieurs combustibles issus des mélanges des résidus des cultures de riz, café et cacao confèrent à l'installation thermique des performances énergétiques et environnementales acceptables pour la production d'électricité. Ces combustibles peuvent être subdivisés en trois grandes familles en fonction de la composition de leurs cendres. Il s'agit des combustibles issus des :

- Mélanges de paille de riz avec des proportions massiques de balle de riz supérieures à 70% ;
- Mélanges de cortex de cacao avec des proportions massiques de balle de riz supérieures à 85% ;
- Mélanges de coque de café avec des proportions massiques de balle de riz supérieures à 80% .

Ces différents combustibles sont pauvres en chlore, avec des teneurs inférieures à 0.1%. Leur combustion dans la chaudière de la centrale thermique ne sera ni une source d'émission de polluants acides tels que, l'acide chlorhydrique (HCl), les polychloro-dibenzo dioxines (PCDD) et les polychloro-dibenzo furanes (PCDF) ; ni à l'origine de la corrosion des parois de chaudière due au chlore.

Toutefois, ils contiennent des teneurs non négligeables de soufre et d'azote. Ainsi, leur combustion dans le foyer d'une chaudière peut-être à l'origine des émissions d'oxydes de soufre et d'oxyde d'azote et provoquer la corrosion des parois de la chaudière dû à la condensation des gaz acides produits par le soufre. Mais, il est possible de contrôler ces phénomènes dans les centrales thermiques à biomasse.

CHAPITRE 4 : ANALYSE ENVIRONNEMENTALE

CHAPITRE 4 : ANALYSE ENVIRONNEMENTALE

Introduction

Suite aux conclusions des chapitres précédents de ce manuscrit, le procédé de production d'électricité qui utilisera les résidus des cultures de riz, café et cacao produira inévitablement des polluants environnementaux. L'évaluation de l'impact environnemental de ce procédé permettra d'identifier les catégories de polluants qui seront émis. Ainsi, il sera plus aisé d'appliquer des techniques adéquates pour leur réduction.

Dans la littérature, plusieurs auteurs ont évalué l'impact environnemental de divers résidus de culture avant d'envisager leurs utilisations comme combustibles dans des procédés de production d'électricité. En effet, Shafie et al. (2014) ont évalué l'impact environnemental d'un procédé de production d'électricité utilisant la paille de riz en Malaisie. Des études similaires ont été menées par Mohammadi et al. (2020) pour ce qui concerne l'utilisation énergétique de la bagasse dans l'industrie sucrière Iranienne. Ce sujet a également fait l'objet d'une étude pour une utilisation durable des résidus de culture pour la production d'énergie (Prasad et al., 2020). Dans leurs différents travaux, ces auteurs ont utilisé la méthode d'analyse du cycle de vie (ACV). Selon leurs études, l'analyse du cycle de vie (ACV) est une méthode complète pour évaluer la performance environnementale d'un biocombustible. Elle permet d'identifier les étapes d'un procédé entraînant le plus grand impact environnemental, de guider le choix des sources d'énergie, des matières premières, des filières de traitement des rejets, et de réaliser des études comparatives entre des systèmes ayant la même fonction. Pour Chauhan et al. (2011), l'analyse du cycle de vie (ACV) est utile pour analyser et aider à réduire les effets environnementaux liés à l'utilisation de la biomasse. Elle évalue l'impact environnemental de la biomasse sur tout son cycle de vie.

En effet, l'ACV est une méthode standardisée qui permet d'étudier les aspects et impacts environnementaux d'un «produit» (qu'il s'agisse d'un bien, d'un service voire d'un procédé), depuis l'extraction des matières premières qui le composent jusqu'à son élimination en fin de vie, en passant par les phases de distribution et d'utilisation, soit « du berceau à la tombe ». Elle est définie par les normes ISO 14040 et ISO 14044. La norme ISO 14040 définit les principes et le cadre de l'ACV, tandis que la norme ISO 14044 regroupe le contenu technique nécessaire au bon déroulement d'une ACV (ISO 14044, 2006).

Afin de proposer des techniques efficaces pour la réduction des polluants environnementaux, ce chapitre utilise l'ACV pour évaluer l'impact environnemental du procédé de production d'électricité utilisant les résidus des cultures de riz, café et cacao. Dans ce procédé, la paille de riz, la balle de riz, la coque de café et le cortex de cacao sont utilisés comme combustible de la centrale thermique à biomasse. Comme, cette production d'électricité est susceptible d'avoir un impact sur le climat global et l'environnement local, alors, les catégories d'impacts évalués concernent essentiellement le réchauffement climatique, l'acidification, l'eutrophisation et la toxicité humaine.

4.1 Méthodologie

Cette étude est menée en quatre étapes. En effet, le cadre méthodologique de la mise en œuvre d'une ACV comprend quatre étapes. C'est une méthode itérative structurée autour d'une unité fonctionnelle. Les différentes étapes utilisent les résultats des autres étapes et l'unité fonctionnelle définit ce qui est étudié. L'approche itérative au sein des étapes et entre les étapes contribue à l'exhaustivité et à la cohérence de l'étude et des résultats rapportés.

La Figure 4-1 montre les étapes d'une ACV (*ISO 14040, 2006*).

Elle commence par la définition des objectifs et du champ d'étude. Puis, l'analyse de l'inventaire se charge de recueillir toutes les données nécessaires à chaque processus de la production d'électricité afin d'atteindre l'objectif définit. Cela consiste à quantifier les ressources consommées et les polluants environnementaux émis par chaque processus. Pour cela, les flux de produits entrants et sortants sont quantifiés pour chaque processus identifié.

Ensuite, la méthode CML (Baseline) intégrée au logiciel libre, OpenLCA version 1.10.3, est utilisée pour l'évaluation des impacts environnementaux et l'identification des différents polluants environnementaux émis. Enfin, la dernière étape se charge de l'interprétation des résultats et de proposer des méthodes de réduction des polluants environnementaux émis.

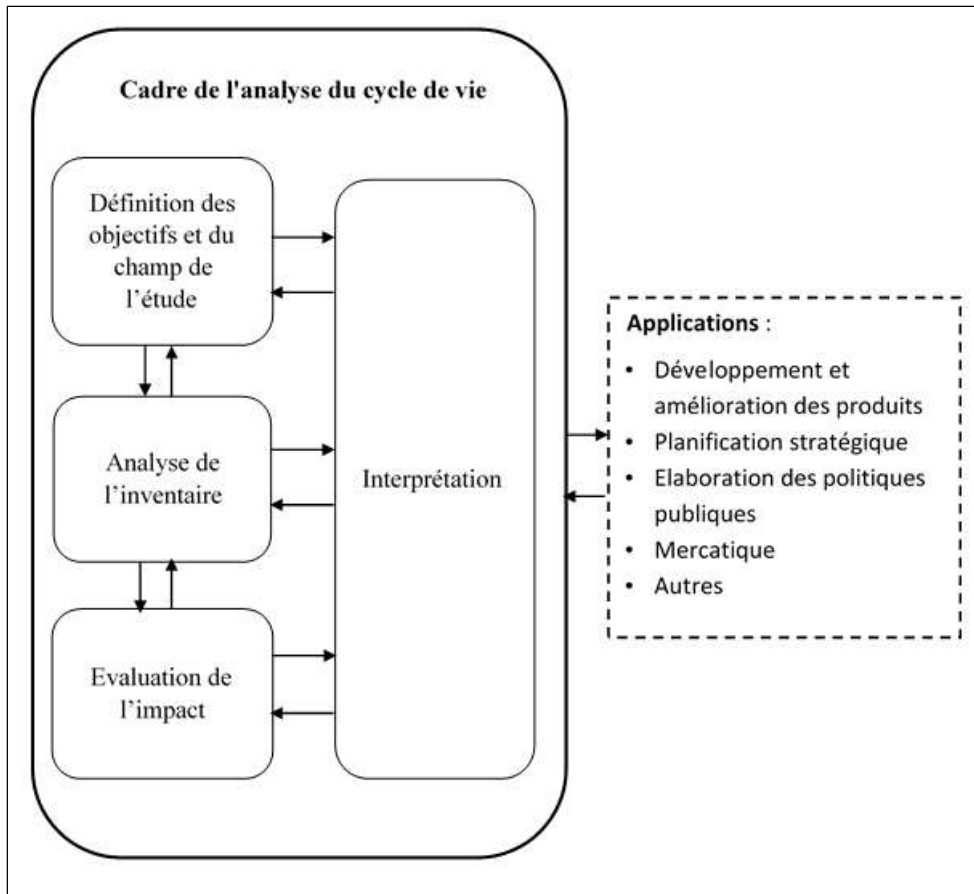


Figure 4-1. Étapes d'une Analyse du Cycle de Vie

4.1.1 Définition des objectifs et du champ d'étude

4.1.1.1 Objectif de l'étude

L'objectif de cette étude est d'évaluer les impacts environnementaux de la production de l'électricité utilisant les résidus des cultures de riz, café et cacao ; et de proposer des techniques de réduction des polluants émis. Par conséquent, l'étude calcule les impacts environnementaux ; identifie les zones d'imperfections environnementales de la production d'électricité ; et propose des méthodes de réduction des polluants environnementaux.

L'unité fonctionnelle utilisée dans cette étude est 1 kWh d'électricité produite par l'utilisation des résidus de culture. Cette unité fonctionnelle est utilisée dans la plupart des études d'ACV de la production d'électricité.

4.1.1.2 Frontière du système

La plupart des chercheurs définissent les frontières de l'ACV de la bioénergie à partir de la production de la culture et la terminent par la production de l'énergie (*Suramaythangkoor et Gheewala, 2010 ; Ramjeawon, 2008 ; Davis et al., 2009*). En ce qui concerne la biomasse, sa production est incluse dans la plupart des ACV de la bioénergie (*Muench et Guenther, 2013*). Ainsi, les frontières du procédé de cette étude partent du processus de production des cultures depuis les plantations pour aboutir au processus de combustion des résidus des cultures dans la chaudière à biomasse de la centrale électrique. Les frontières du procédé de production d'électricité comprennent alors : la production des cultures, la collecte des résidus, le transport des résidus et de combustion des résidus. La Figure 4-2 montre les frontières du procédé de production de l'électricité utilisant les résidus de culture.

L'impact sur l'environnement est pris en compte pour chaque processus. Si les frontières sont fixées de façon trop étroites, certains impacts importants pourraient ne pas être détectés ; inversement, si elles sont fixées de façon trop larges, d'autres impacts que ceux d'intérêt pourraient être inclus.

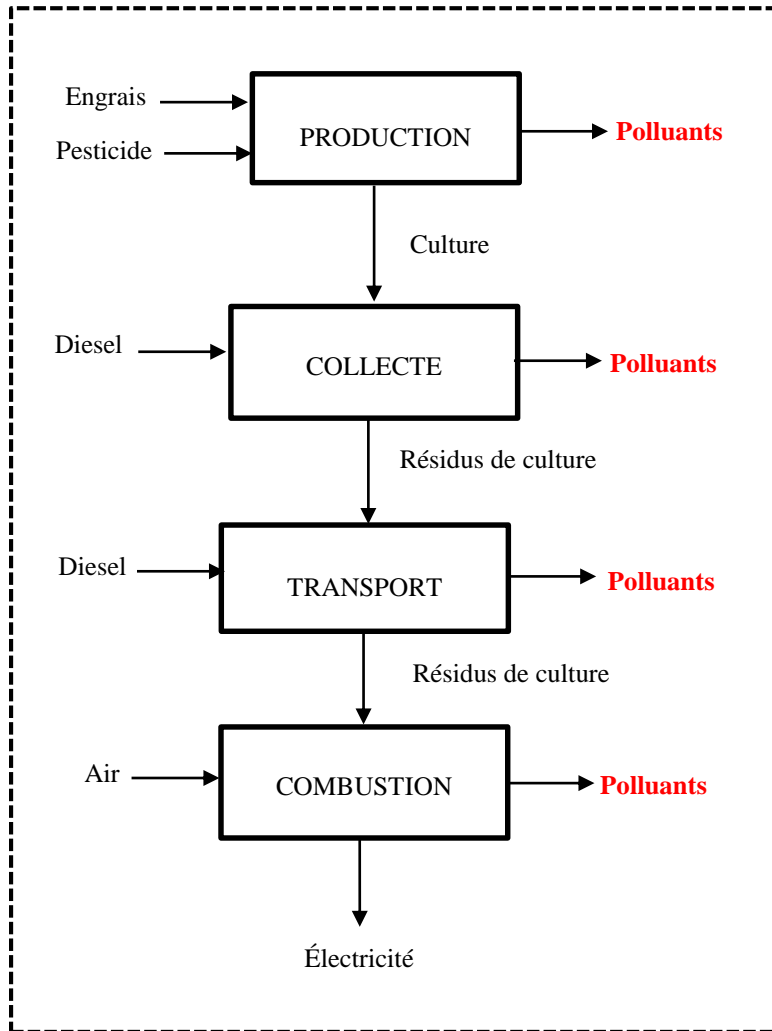


Figure 4-2. Frontières du système de production de l'électricité

4.1.2 Analyse de l'inventaire

Les données nécessaires à cette analyse sont tirées de la littérature et des questionnaires envoyés à des agriculteurs à Kodaya. Les agriculteurs ont été sélectionnés sur la base de la superficie de leurs exploitations agricoles ou de leurs productions agricoles.

L'inventaire des ressources consommées et des impacts environnementaux de ce procédé ne se limite qu'à la production de l'électricité. En conséquence, elle ne prend pas en compte les ressources et impacts liés aux opérations d'installation, de maintenance et de démontage de la

centrale thermique en fin de vie. L'inventaire ne prend pas aussi en compte les ressources et impacts liés aux opérations de mise en place des plantations de café et cacao.

4.1.2.1 Production des cultures

La production des cultures nécessite l'utilisation d'engrais et de pesticides.

○ Culture du cacao

Pour favoriser la croissance et la production du cacaoyer, dans la zone ouest de la Côte d'Ivoire, 400 grammes d'engrais de formule 00 – 23 – 19 + 10 Cao + 5 MgO sont utilisés par pied de cacaoyer par an. Aussi, pour assurer la protection du cacaoyer contre les insectes, les planteurs utilisent 2,5 litres de pesticide par hectare. Le pesticide est appliqué 3 fois par an, généralement en février, août et décembre. Le rendement moyen d'une plantation de cacaoyer hybride bien entretenu oscille entre 2 et 2,4 tonnes de fèves sèches pour 1333 pieds par hectare (*Kébé et al., 2009*). Cependant, compte tenu de la diversité des variétés de cacaoyer du village, le rendement de 500 kg obtenu auprès des planteurs est utilisé pour déterminer les ressources d'engrais et de pesticides.

La quantité de chaque constituant de l'engrais est déterminé à par partir de l'équation (4.1) :

$$QE = \frac{RE \times NP \times QC \times T}{100 \times QR} \quad (4.1)$$

$$QR = RP \times CF \quad (4.2)$$

QE : Quantité du constituant de l'engrais nécessaire pour la production de 1kWh d'électricité (g);

RE : Quantité d'engrais utilisée par pied de cacaoyer (g) ;

NP : Nombre de pieds de cacaoyers par hectare ;

QC : Quantité de cortex sec de cacao utilisée pour la production de 1 kWh d'électricité (kg);

T : Proposition massique du constituant dans l'engrais (%);

RP : Rendement de la plantation de cacao dans la zone d'étude (kg);

CF : Ratio cortex sec de cacao/ fèves sèches de cacao;

QR : Quantité de cortex sec de cacao générée par hectare (kg).

La quantité pesticide est déterminée à par partir de l'équation (4.3) :

$$QP = \frac{PE \times QC}{QR} \quad (4.3)$$

QP : Quantité de pesticide utilisée pour la production de 1 kWh d'électricité (g);

PE : Quantité annuelle de pesticides utilisée dans l'exploitation cacaoyère.

Le Tableau 4.1 présente le récapitulatif de l'inventaire des engrais et pesticides utilisés dans les exploitations pour la production d'1 kWh d'électricité.

Tableau 4.1. Inventaire des engrais et pesticides du cacaoyer pour 1kWh.

Eléments	Quantité (g)
Engrais P	232,55
Engrais K	192,28
Engrais CaO	101,20
Engrais MgO	50,60
Pesticides	14,22

○ **Culture du riz**

La culture du riz est réalisée dans des bas-fonds aménagés. Elle nécessite l'utilisation de 250 kg d'engrais minéral NPK (10-18-18) et de 100 kg d'urée par hectare. Le rendement moyen de la culture, pratiquée sur des terres propices, trouvé dans la littérature oscille entre 4,5 et 6 tonnes de riz paddy par hectare selon la variété de riz (*Bouet et al., 2005*). Cependant, selon la majorité des riziculteurs du village, le rendement de la culture oscille entre 1,5 tonnes et 2 tonnes de riz paddy par hectare.

La quantité de chaque constituant de l'engrais pour chaque résidu de la culture du riz est déterminée comme suit :

✓ Pour la paille de riz :

$$QE = \frac{QH \times KP \times T}{100 \times RR \times PP} \quad (4.4)$$

QE : Quantité du constituant de l'engrais utilisée pour la production de 1 kWh d'électricité (g);

QH : Quantité d'engrais utilisée par hectare (en g) ;

KP : Quantité de paille de riz utilisée pour la production de 1 kWh d'électricité (kg);

RR : Rendement de la rizière dans la zone d'étude (kg) ;

PP : Ratio riz paddy/paille de riz ;

T : Proposition massique du constituant dans l'engrais (%);

✓ Pour la balle de riz :

$$QE = \frac{QH \times KB \times T}{100 \times RR \times PB} \quad (4.5)$$

QE : Quantité du constituant de l'engrais utilisée pour la production de 1 kWh d'électricité (g);

QH : Quantité d'engrais utilisée par hectare (en g) ;

KB : Quantité de balle de riz utilisée pour la production de 1 kWh d'électricité (kg);

RR : Rendement de la rizière dans la zone d'étude (kg) ;

PB : Ratio riz paddy/balle de riz ;

T : Proposition massique du constituant dans l'engrais (%);

La quantité d'urée pour chaque résidu de la culture du riz est déterminée comme suit :

✓ Pour la paille de riz :

$$QU = \frac{UH \times KP}{RR \times PP} \quad (4.6)$$

QU : Quantité d'urée utilisée pour la production de 1 kWh d'électricité (g);
 UH : Quantité d'urée utilisée par hectare (en g) ;
 KP : Quantité de paille de riz utilisée pour la production de 1 kWh d'électricité (kg);
 RR : Rendement de la rizière dans la zone d'étude (kg) ;
 PP : Ratio riz paddy/paille de riz ;

✓ Pour la balle de riz :

$$QU = \frac{UH \times KB}{RR \times PB} \quad (4.7)$$

QE : Quantité du constituant de l'engrais utilisée pour la production de 1 kWh d'électricité (g);
 QH : Quantité d'engrais utilisée par hectare (en g) ;
 KB : Quantité de balle de riz utilisée pour la production de 1 kWh d'électricité (kg);
 RR : Rendement de la rizière dans la zone d'étude (kg) ;
 PB : Ratio riz paddy/balle de riz ;
 T : Proposition massique du constituant dans l'engrais (%);

Le .Tableau 4.2 présente le récapitulatif de l'inventaire des engrais et pesticides utilisé dans la rizière pour la production de 1 kWh d'électricité.

.Tableau 4.2. Inventaire des engrais et pesticides de la rizière pour 1 kWh.

Eléments émis	Quantité (g)	
	Paille	Balle
Engrais N	68	140
Engrais P	123	253,40
Engrais K	123	253,4
Urée	274,80	563,33

○ **Culture du café**

Pour la fertilisation du caféier, les planteurs utilisent par an 400 g d'engrais complet de formule NPKMg0 (12-6-20-4) par pied. La lutte curative contre les insectes est assurée par l'utilisation de 700 grammes de pesticides par hectare par application. Ce pesticide est appliqué généralement en avril et en Août. Une exploitation caféière dispose en moyenne de 1333 pieds de caféiers par hectare. Le rendement moyen de la culture du café oscille entre 2,5 et 3 tonnes de grain de café vert par hectare (*Kébé et al., 2005*). Mais, selon les planteurs, le rendement de la culture est fonction de l'âge de l'exploitation et oscille entre 500 kg et 650 kg.

La quantité de chaque constituant de l'engrais pour la coque de café est déterminée comme suit :

$$QE = \frac{EP \times NP \times QK \times T}{100 \times RR \times PP} \quad (4.8)$$

QE : Quantité du constituant de l'engrais utilisée pour la production de 1 kWh d'électricité (g);

EP : Quantité d'engrais utilisée par pied de caféier (g) ;

NP : Nombre de pieds de caféiers à l'hectare;

QK : Quantité de coque de café utilisée pour la production de 1 kWh d'électricité (kg);

RP : Rendement de la plantation de café dans la zone d'étude (kg) ;

T : Proposition massique du constituant dans l'engrais (%);

Le Tableau 4.3 présente le récapitulatif de l'inventaire des engrais et pesticides utilisé dans les exploitations caféières pour la production de 1 kWh d'électricité.

Tableau 4.3. Inventaire des engrais et pesticides du caféier pour 1 kWh.

Eléments émis	Quantité (g)
Engrais N	149,72
Engrais P	74,86
Engrais K	249,91
Engrais MgO	49,91
Pesticide	3,28

4.1.2.2 Collecte des résidus de culture

La collecte des résidus consiste à les convoier des plantations jusqu'au centre de collecte local. Dans ce procédé de production d'électricité, le village dispose de centres de collecte qui serviront à stocker les résidus en provenance des plantations. Les centres de collecte sont situés à proximité du village. Alors, ce processus de collecte nécessite l'utilisation de véhicules légers. En général, à Kodaya, les véhicules utilisés pour convoier les produits agricoles des plantations au village, ont une capacité de 3 tonnes par chargement. Le même type de véhicule est utilisé dans cette étude. Ainsi, le véhicule utilisé pour la collecte des résidus, est de type tracteur avec remorque d'une capacité de 3 tonnes par chargement. Ce type de véhicules a une consommation moyenne de 18,2 litres pour une distance de 100 km (*Shafie et al., 2014*). La distance maximale entre le centre de collecte et les plantations est estimée à 10 km. En effet, les plantations les plus éloignées sont situées à environ 10 km du village.

Après la récolte du riz paddy et des fèves sèches de cacao ; la paille de riz et le cortex de cacao sont séchés à l'air libre dans les plantations avant d'être convoyés au centre de collecte. Cependant, le riz paddy et les cerises sèches de café sont convoyés au centre de collecte pour y être décortiqués. Après le décortiquage, le paysan récupère sa récolte ; mais la balle de riz et la coque de café sont stockées au centre de collecte. L'opération de décortiquage nécessite l'utilisation d'une décortiqueuse industrielle. Actuellement, à Kodaya, le décortiquage du riz paddy ou de la cerise sèche de café est assuré par des décortiqueuses industrielles entraînées par des moteurs diesel. Le moteur d'entraînement a une puissance de 16,2 kW. Alimenté au carburant, il consomme en moyenne 239 ml/kWh. La capacité d'usinage de chaque décortiqueuse est de 1,5 tonne par heure. Ce type de décortiqueuse est utilisé dans cette analyse pour l'usinage du riz paddy et de la cerise sèche de café.

Selon l'étude de Shafie et al. (2014), l'énergie utilisée par le véhicule pour la collecte peut être calculée à partir de l'unité énergétique du diesel (43,1 MJ/l), de la consommation spécifique de carburant, de la distance parcourue et de la quantité de résidus. Aussi, l'énergie utilisée pour le décortiquage est calculée à partir de l'unité énergétique du diesel et de la consommation de carburant de la machine. Le Tableau 4.4 montre l'énergie consommée par la collecte des résidus pour la production de 1 kWh d'électricité.

Tableau 4.4. Énergie consommée par la collecte des résidus pour la production de 1 kWh

Résidus	Balle de riz	Coque de café	Paille de riz	Cortex de cacao
Véhicule (MJ/kWh)	0,0085	0,0155	0,044	0,0335
Décortiqueuse (MJ/kWh)	0,578	0,26	-	-

4.1.2.3 Transport des résidus de culture

Les résidus de culture sont transportés du centre de collecte local à la centrale thermique. Le camion assurant le transport a une capacité de 20 tonnes par chargement.

Selon l'étude de Shafie et al. (2014), l'énergie utilisée par le véhicule pour le transport peut-être calculée à partir de l'unité énergétique du diesel (43,1 MJ/l), la consommation spécifique de carburant, la distance parcourue et de la quantité de résidus.

Toutefois, la consommation de carburant d'un véhicule varie considérablement en fonction du type de trafic, des routes, du comportement de conduite, etc. Il est donc conseillé de baser les calculs sur la consommation réelle de carburant pour un certain type de transport (Martensson, 2003). Cependant, certains auteurs suggèrent l'utilisation de valeurs indicatives, si aucune donnée n'est disponible, comme consommation moyenne de carburant pour les véhicules. Ainsi, le véhicule destiné au transport a une consommation moyenne de 25 litres pour une distance de 100 km (Shafie et al., 2014). Le Tableau 4.5 montre l'énergie consommée par le transport des résidus pour la production de 1kWh d'électricité.

Tableau 4.5. Énergie consommée par le transport des résidus pour la production de 1kWh

Résidus	Balle de riz	Coque de café	Paille de riz	Cortex de cacao
Véhicule (MJ/kWh)	0,070	0,063	0,091	0,069

4.1.2.4 Combustion des résidus de culture

Pendant ce processus, les résidus de culture sont brûlés avec une quantité stœchiométrique d'air dans la chaudière de la centrale thermique. Cette combustion est susceptible de produire une panoplie de polluants environnementaux. Selon Khan et al. (2009), ces polluants proviennent des imbrûlés gazeux, des produits de la combustion et des cendres.

La première catégorie de polluants constituée de gaz imbrûlés est généralement due à une température de combustion basse ou à un mélange insuffisant de combustible/comburant. Elle est constituée de monoxyde de carbone (CO) et de composés organiques volatils (COV).

Les produits de la combustion sont étroitement liés aux propriétés de la biomasse. Ils sont les produits de la combustion du carbone (C), de l'hydrogène (H), de l'azote (N), du soufre (S) et du chlore (Cl). Il s'agit du dioxyde de carbone (CO₂), de l'eau (H₂O), des oxydes d'azote (NO_x), des oxydes de soufre (SO_x) et des gaz acides (PCDD, PCDF, HCl, Cl₂, etc.).

Pendant la combustion de la biomasse, les émissions d'oxydes d'azote (NO_x) sont à prévoir lorsque la concentration en azote (N) est supérieure à 0,6%. Il faut aussi s'attendre aux émissions d'oxydes de soufre (SO_x) lorsque la concentration en soufre (S) est supérieure à 0,2%. Enfin, les émissions des gaz acides sont à prévoir lorsque la concentration en chlore (Cl) est supérieure à 0,1% (Oberberger et al., 2006). Mais, la quantité de CO₂ produite est égale à la quantité prélevée dans l'atmosphère par la plante pendant sa phase de croissance. Il n'y a donc pas d'ajout net de CO₂ et la biomasse peut être considérée comme un puits de carbone. C'est le cycle du carbone ou zéro émission de carbone, comme l'illustre la Figure 4-3 (Saidur et al., 2011).

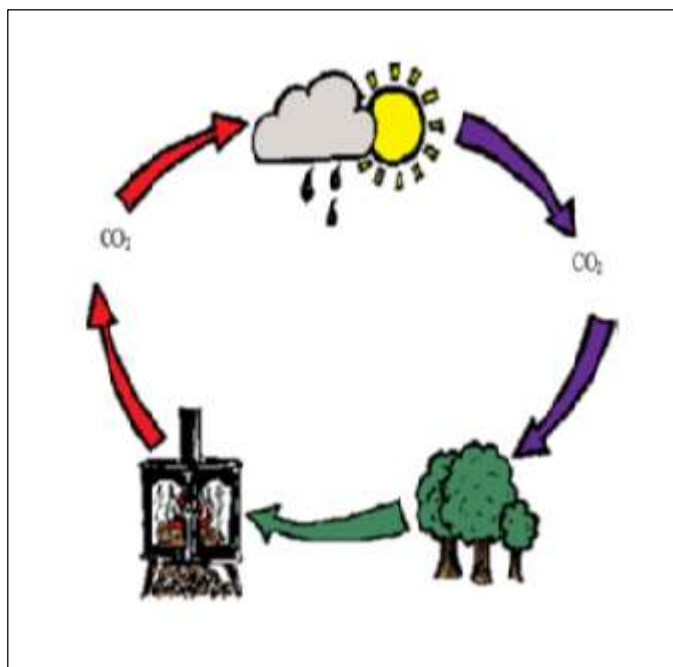


Figure 4-3. Cycle du carbone

La dernière catégorie de polluants est celle liée aux cendres et à leurs compositions. Les cendres peuvent être source d'émission de micros particules (PM), ou de métaux lourds. La majorité des particules émises sont plus petites que $10\mu\text{m}$ (PM10), avec une forte proportion de particules submicroniques (PM1) (Saidur et al., 2011)..

Actuellement, la Côte d'Ivoire ne dispose pas de centrale thermique à biomasse utilisant les résidus des cultures de riz, café et cacao comme combustible. Cela signifie que les sources de données sont limitées. Alors les données sur les émissions de la chaudière proviennent du rapport de l'USEPA (Boilers, 2001). Les facteurs d'émission pris dans cette référence sont ceux du bois sec en combustion dans une chaudière à biomasse. Cette hypothèse a également été faite par Shafie et al. (2014). Ces auteurs ont utilisé ces facteurs d'émission dans le cadre d'une étude d'ACV sur la paille de riz utilisé comme combustible d'une centrale thermique à biomasse pour la production d'électricité en Malaisie. Le Tableau 4.6 donne les facteurs d'émission des différents polluants issus de la combustion des résidus des cultures dans la chaudière.

Tableau 4.6. Quantité des différents polluants émis par kWh.

Polluants émis	Quantité (g/kWh)
Oxydes d'azote	0,76
Monoxyde de carbone	0,93
Dioxyde de soufre	0,039
Composé organique volatil	0,062
Potassium	0,06
Phosphore	$4,25 \cdot 10^{-5}$
Cuivre	$7,52 \cdot 10^{-5}$
Plomb	$7,39 \cdot 10^{-5}$
Cobalt	$10,08 \cdot 10^{-6}$
Fer	0,00154
Manganèse (Mn)	0,00240
Nickel	$5,16 \cdot 10^{-5}$
Sodium	0,000563
Zinc	$6,51 \cdot 10^{-4}$
Particules (PM)	0,62

La quantité de résidu de culture nécessaire à la production de 1 kWh d'électricité est calculée à partir de l'équation (4.9)(Delivand et al., 2011). Le Tableau 4.7 montre les caractéristiques énergétiques des résidus des cultures pour un générateur électrique dont le rendement vaut 96%.

$$P_{\text{él}} = (m \times \eta_{\text{él}} \times \text{PCI}) / (3,6 \times t) \quad (4.9)$$

m : Quantité du résidu de culture utilisé pour produire 1 kWh d'électricité en kg ;

$P_{\text{él}}$: Puissance électrique produite par la centrale thermique à biomasse en MW ;

t : Temps d'exploitation de la centrale thermique en heure ;

$\eta_{\text{él}}$: Rendement électrique de la centrale thermique à biomasse ;

PCI : Pouvoir calorifique inférieur du résidu de culture en MJ/kg.

Tableau 4.7. Caractéristiques énergétiques des résidus des cultures

Résidus	PCI (MJ/kg)	$\eta_{él}(\%)$	m (kg/kWh)	$P_{él}$ (MW)
Balle de riz	11,89	23,34	1,30	
Paille de riz	9,18	23,25	1,69	1
Coque de café	13,20	23,36	1,17	
Cortex de cacao	12,12	23,28	1,28	

La quantité de dioxyde de carbone produite par la combustion des résidus de culture est calculée à partir de l'équation (4.10) (Boilers, 2001). Le Tableau 4.8 montre la quantité de dioxyde de carbone produite par la combustion des résidus de culture.

$$E_{ch,CO_2} = m \times (C - C_O) \times \frac{M_{CO_2}}{M_C} \quad (4.10)$$

E_{ch,CO_2} : Quantité de dioxyde de carbone produite par la combustion (kg);

C : Teneur en carbone de la biomasse en (%);

C_O : Proportion de carbone de la biomasse oxydé en monoxyde de carbone (%);

M_{CO_2} : Masse molaire du dioxyde de carbone (g/mol);

M_C : Masse molaire du carbone (g/mol).

Tableau 4.8. Quantité de CO_2 produite par la combustion des résidus pour 1 kWh.

Résidus	Balle de riz	Paille de riz	Coque de café	Cortex de cacao
CO_2 produite (g)	1761,21	2073,10	1698,88	1750,03

4.1.3 Évaluation des impacts environnementaux

4.1.3.1 Procédure

L'évaluation des impacts environnementaux consiste à transformer un inventaire de flux de substances émises et de ressources consommées en une série d'impacts clairement identifiables. Des facteurs de caractérisation exprimant l'importance relative des émissions d'une substance sont définis. Les masses émises sont multipliées par ces facteurs et sommées pour donner un résultat d'impact, exprimé en kilogramme d'une substance de référence (*Jolliet et al, 2010*). Afin de faciliter l'utilisation de la méthode ACV, différentes méthodes d'évaluation d'impact ont été développées au fil des années. Les méthodes couramment utilisées sont : Impact 2002+, ReCiPe 2008, CML 2001 et Eco-Indicator 99. Des logiciels, exploitant différentes bases de données, intègrent ces méthodes pour évaluer les impacts environnementaux. Ils aident à construire le modèle de cycle de vie du produit et à y associer les processus élémentaires correspondants. Pendant la modélisation de l'ACV sous le logiciel, la base de données doit être sélectionnée pour la construction du modèle, tandis que la méthode est sélectionnée pour le calcul des impacts. Les logiciels les plus connus sont: SimaPro, Gabi et OpenLCA (*Larratte, 2013*). Pour l'évaluation des impacts environnementaux de la production d'électricité, la méthode CML (Baseline) est utilisée. Elle est intégrée au logiciel libre OpenLCA version 1.10.3. Considérée comme la méthode la plus complète, la méthode CML (Baseline) est utilisée par la majorité des études ACV sur les bioénergies.

4.1.3.2 Définitions des impacts

- **Réchauffement climatique**

Le réchauffement climatique peut être défini comme une augmentation de la température moyenne à la surface de la Terre, causée par l'émission de gaz à effet de serre. L'effet de serre piège dans une couche de gaz située à basse atmosphère une partie de la réverbération des rayons du soleil sur la terre, en évitant ainsi que ces rayonnements infrarouges soient renvoyés vers l'espace. Les différents gaz à effet de serre émis par les activités humaines sont: le gaz carbonique (CO₂), le

méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (N₂O), et les gaz fluorés. Dans l'atmosphère, le temps qu'ils mettent à disparaître varie énormément. Cependant, le modèle de caractérisation des profils environnementaux est basé sur des facteurs exprimés en potentiel de réchauffement global sur l'horizon temporel de différentes années, soit les 100 années les plus courantes (PRG100), mesurées dans l'unité de référence, le kg équivalent CO₂ (*Acero et al., 2017*).

○ **Acidification**

L'acidification est une augmentation de l'acidité d'un sol, d'un cours d'eau ou de l'air en raison des activités humaines. Cette augmentation est principalement due aux émissions de SO_x, NO_x, NH₃ et HCl. Ces gaz peuvent se transformer au contact de l'eau en acide sulfurique (H₂SO₄) et en acide nitrique (HNO₃) qui constituent les pluies acides (*Bliefert, 2001*).

Le potentiel d'acidification est exprimé à l'aide de l'unité de référence, le kg équivalent SO₂ (*Acero et al., 2017*).

○ **Eutrophisation**

L'eutrophisation est l'accumulation d'une concentration de nutriments chimiques dans un écosystème qui conduit à une productivité anormale. Cela provoque une croissance excessive des plantes, comme les algues dans les rivières, qui entraîne de graves réductions de la qualité de l'eau et des populations animales. Ce phénomène peut être divisé en deux sous-catégories : l'eutrophisation des écosystèmes terrestres et l'eutrophisation des écosystèmes aquatiques.

Les émissions d'ammoniac, de nitrates, d'oxydes d'azote et de phosphore dans l'air ou l'eau ont toutes un impact sur l'eutrophisation. Cette catégorie est basée sur les travaux de Heijungs (*Acero et al., 2017*), et est exprimée en utilisant l'unité de référence, le kg équivalent PO₄³⁻.

- **Toxicité humaine**

Le potentiel de toxicité pour l'homme est un indice calculé qui reflète la nocivité potentielle d'une unité de substance chimique rejetée dans l'environnement. Il est basé à la fois sur la toxicité inhérente d'un composé et sur sa dose potentielle. Il s'agit en général des produits chimiques potentiellement dangereux pour l'homme par inhalation, ingestion et même par contact. Le pouvoir cancérigène, par exemple, est un problème ici. Cette catégorie d'impact est mesurée en kg équivalent de 1,4-dichlorobenzène (*Acero et al., 2017*).

4.2 Résultats et discussion

4.2.1 Impacts environnementaux

Les impacts environnementaux du procédé de production d'électricité utilisant les résidus des cultures de riz, café et cacao ont été calculés pour les étapes de la production, de la collecte, du transport, et de la combustion des résidus pour la production d'1 kWh d'électricité. Les résultats révèlent que le procédé de production d'électricité utilisant les résidus s'accompagne d'émissions impliquant l'acidification, l'eutrophisation, le réchauffement climatique et la toxicité humaine.

Le Tableau 4.9 montre les résultats de l'évaluation des différentes catégories d'impacts environnementaux. Ainsi, le procédé émet 0,2 à 0,37 g éq. PO_4^{3-} , 270,55 à 432,30 g éq. CO_2 , 8,33 à 10,29 g éq. 1, 4 DB et 0,76 à 1,47 g éq. SO_2 . La paille de riz a la contribution la plus élevée aux différentes catégories d'impacts. La contribution la plus faible à l'eutrophisation est attribuée à l'utilisation de la balle de riz et de la coque de café. La coque de café a la plus faible contribution au réchauffement climatique et à la toxicité humaine. La contribution la plus élevée à l'acidification est attribuée à l'utilisation de la paille de riz. Cependant, la contribution la plus faible à cet impact est attribuée à l'utilisation de la balle de riz.

Tableau 4.9. Résultats des impacts environnementaux pour 1 kWh d'électricité

Catégories d'impacts	Cortex de cacao	Balle de riz	Coque de café	Paille de riz
Eutrophisation (g éq. PO_4^{3-})	0,28	0,20	0,20	0,37
Réchauffement climatique (g éq. CO_2)	328,22	293,62	270,55	432,30
Toxicité humaine (g éq. 1, 4 DB)	9,91	8,45	8,33	10,29
Acidification (g éq. SO_2)	1,120	0,76	0,77	1,47

4.2.1.1 Eutrophisation

La production de l'électricité utilisant les résidus des cultures de riz, café et cacao s'accompagne d'émission de substances entraînant un déséquilibre des écosystèmes à travers un apport excessif de nutriments. Les émissions impliquées dans cette catégorie d'impact sont: le phosphore, les oxydes d'azote, l'ammoniac et le protoxyde d'azote. Ces particules sont émises pendant la collecte, le transport, et la combustion des résidus de culture. Ces polluants proviennent de la combustion du diesel par les véhicules et des cendres provenant de la cheminée de la chaudière.

La Figure 4-4 montre la contribution des différentes étapes du procédé de production d'électricité à l'eutrophisation. La contribution de la collecte des résidus à cet impact est comprise entre 50% et 65%. Cependant celle de la combustion des résidus est inférieure à 1%. Toutefois, la production des cultures ne contribue guère à l'eutrophisation.

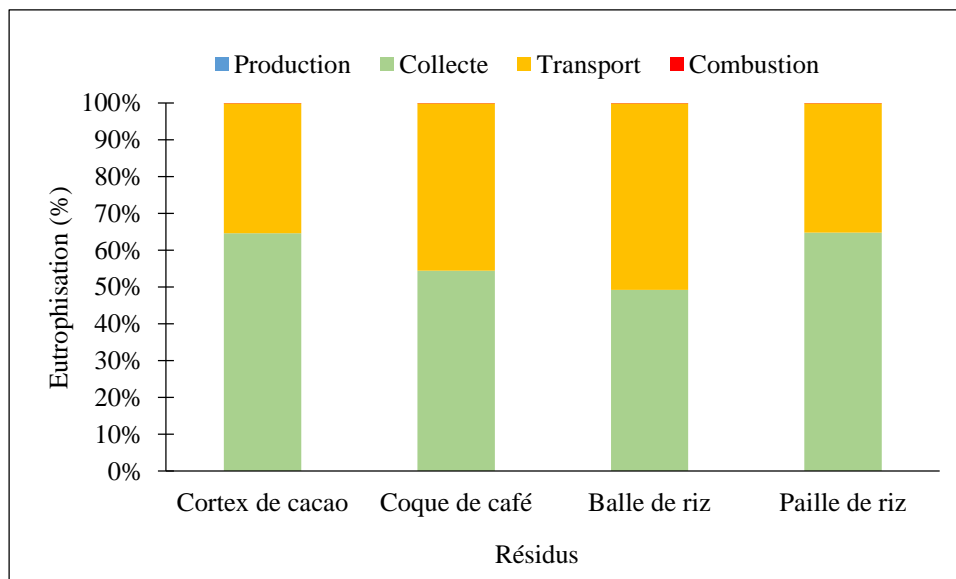


Figure 4-4. Contribution des étapes du procédé à l'eutrophisation

4.2.1.2 Toxicité humaine

Le procédé de production d'électricité émet des particules nocives pour l'homme. Ces particules sont émises pendant les étapes de collecte, transport et combustion des résidus de culture. Les polluants émis sont constitués de microparticules, cuivre, cobalt, plomb, oxydes d'azote, oxydes de soufre, nickel, zinc, et ammoniac.

La Figure 4-5 montre la contribution de chaque étape du procédé à la toxicité humaine. Le transport des résidus contribue entre 45% et 55% à la toxicité humaine. La contribution du processus de collecte est inférieure à 33%. Celle de la combustion des résidus est comprise entre 10% et 35%.

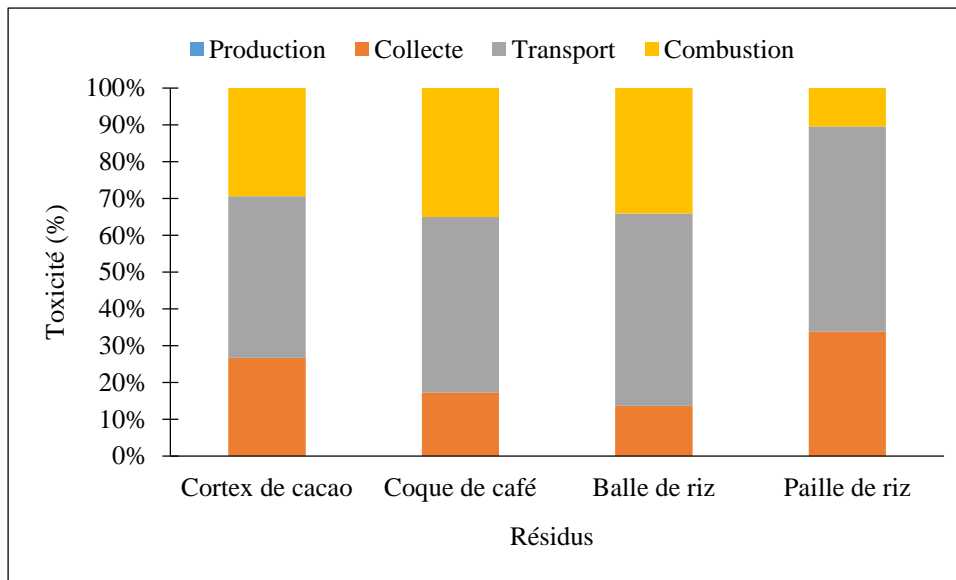


Figure 4-5. Contribution des étapes du procédé à la toxicité humaine

4.2.1.3 Acidification

Les émissions impliquées dans cette catégorie d'impact pendant le procédé de production d'électricité sont : les oxydes d'azote, les oxydes de soufre, et l'ammoniac. Ces particules sont émises pendant la collecte et le transport des résidus de culture. Ainsi, les émissions impliquant l'acidification sont liées à la combustion du diesel par les véhicules.

La Figure 4-6 montre la contribution de chaque étape du procédé à l'acidification. La contribution du transport à cet impact est comprise entre 35% et 50%. La collecte du cortex de cacao et de la paille de riz a la contribution la plus élevée à l'acidification. Cette contribution est d'environ 65%.

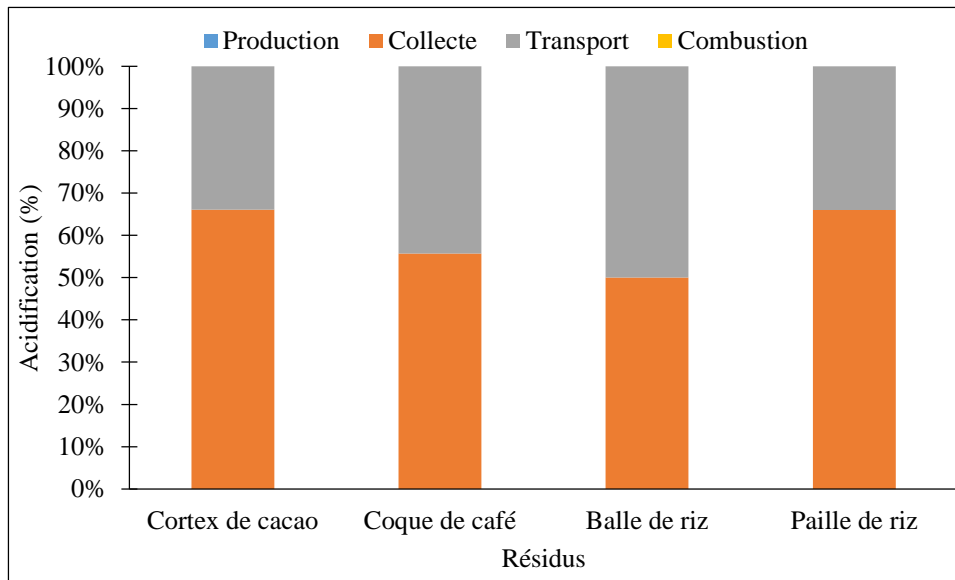


Figure 4-6. Contribution des étapes du procédé à l'acidification

4.2.1.4 Réchauffement climatique

Le procédé de production de l'électricité est source d'émission de gaz à effet de serre contribuant au réchauffement climatique. Les principaux gaz à effet de serre émis sont : le dioxyde de carbone, le méthane, et le protoxyde d'azote. Ces polluants sont attribués à la combustion du diesel par les véhicules pendant les processus de collecte et de transport des résidus. Toutefois la contribution la plus élevée est attribuée au processus de transport des résidus. En effet, le transport contribue à

plus de 68% au réchauffement climatique. La Figure 4-7 montre la contribution des étapes au réchauffement climatique.

Les émissions de gaz à effet de serre de ce procédé de production d'électricité utilisant les résidus des cultures de riz, café et cacao sont supérieures à celles de certains procédés utilisant d'autres résidus agricoles. C'est le cas de la production d'électricité utilisant la tige de maïs et la bagasse. Les procédés utilisant ces résidus émettent respectivement 187.6 g équivalent CO₂/kWh (*Kaliyan et al., 2013*) et 200 g équivalent CO₂ /kWh (*Mohammadi et al., 2020*). Néanmoins, ces émissions de gaz à effet de serre sont inférieures à celles de la production d'électricité utilisant les combustibles fossiles tels que le charbon, le pétrole et le gaz naturel. La Figure 4-8 montre la comparaison des émissions de GES entre le procédé utilisant les résidus des cultures de riz, café et cacao et celles utilisant les sources conventionnelles (*Varun et al., 2009a ; Amponsah et al., 2014*). Les données utilisées représentent les valeurs d'émissions moyennes pour les sources conventionnelles. Toutefois, la production d'électricité utilisant l'énergie nucléaire génère moins d'émissions de gaz à effet de serre dans l'environnement. Mais l'élimination des matières radioactives a un impact plus important sur l'environnement (*Varun et al., 2009b*).

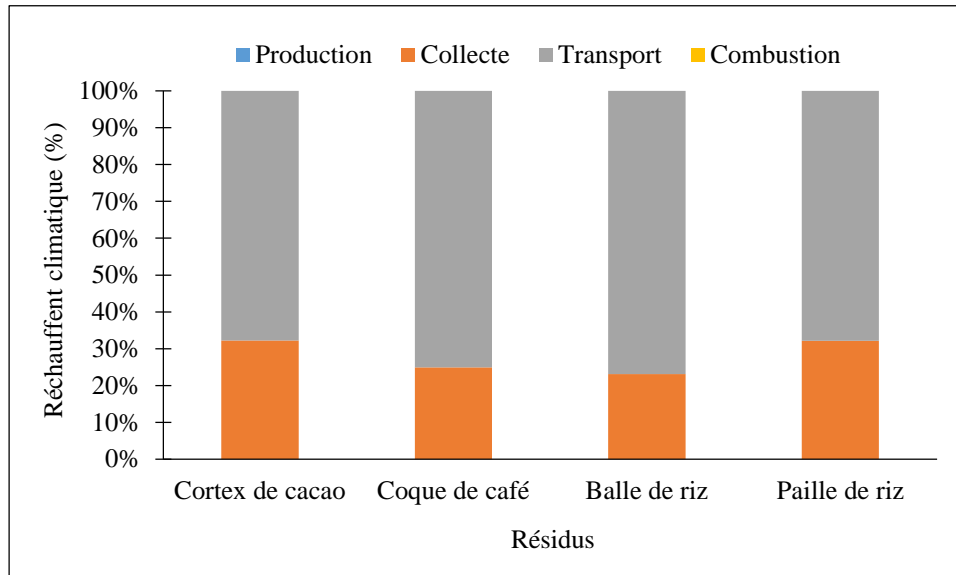


Figure 4-7. Contribution des étapes du procédé au réchauffement climatique

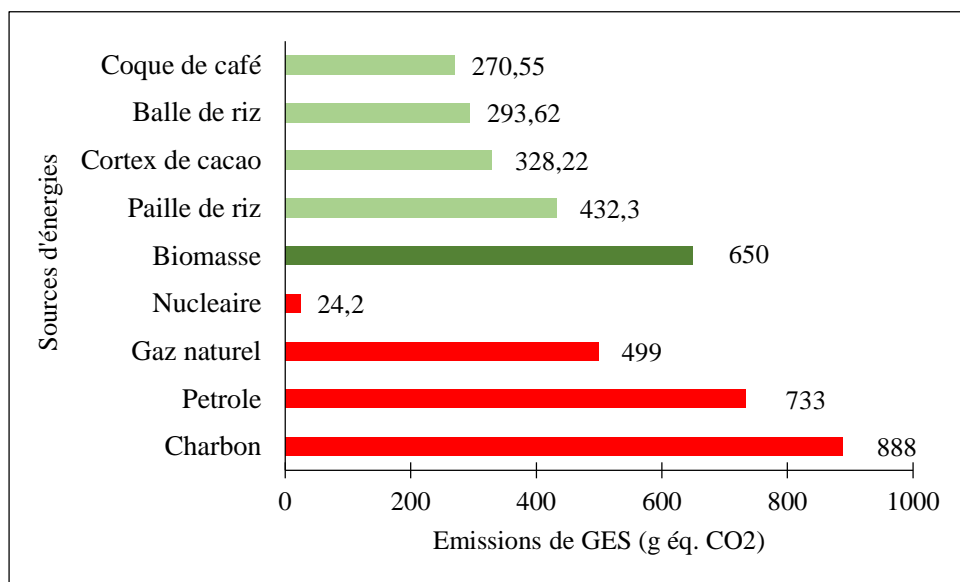


Figure 4-8. Émissions de GES par sources d'énergies

4.2.2 Analyse de sensibilité

Dans le système de référence de la production d'électricité, une distance de 100 km a été considérée pour le transport des résidus de culture du centre de collecte locale (village) à la centrale thermique. Pour tenir compte d'éventuelles modifications du circuit d'approvisionnement de l'installation thermique en combustible, l'étude se propose de faire varier les distances de transport lors de cette étude de sensibilité pour voir leurs effets sur les émissions de gaz à effet de serre de la filière. La Figure 4-9 montre l'effet de la distance de transport sur les émissions des GES du procédé de production d'électricité. Ainsi, les émissions de GES varient de façon croissante et linéaire avec la distance de transport.

Pour émettre moins de gaz à effet serre qu'une centrale thermique utilisant le gaz naturel (qui d'environ 499 g éq CO₂, cf. **figure 4-8**), la centrale thermique faisant l'objet de la présente étude ne doit pas être située à une distance supérieure à 122,68 km du village Kodaya. A cette distance, le procédé émet entre 316 g éq CO₂ et 499 g éq CO₂. La plus importante émission de GES est attribuée à l'utilisation de la paille, et la plus faible est attribuée à l'utilisation de la coque de café.

Aussi, les émissions de GES du procédé de production d'électricité peuvent également être réduites par une augmentation de capacité de chargement des véhicules utilisés pour la collecte et le transport des différents résidus de culture.

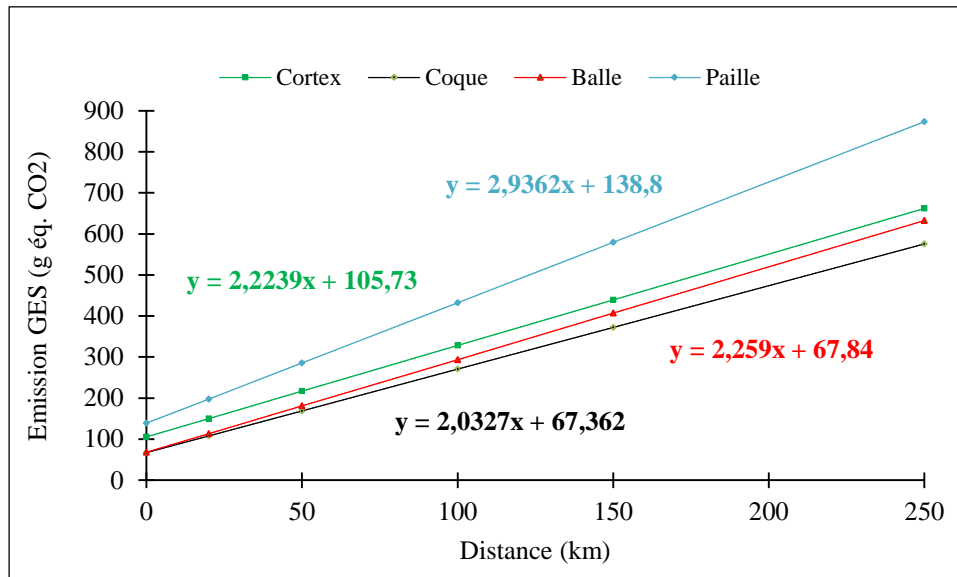


Figure 4-9. Émissions de GES en fonction de la distance parcourue

4.2.3 Réduction des polluants environnementaux

Les émissions polluantes du procédé de production d'électricité proviennent essentiellement de la combustion du diesel et des résidus de cultures. Les principaux polluants émis lors de la combustion du diesel par les véhicules sont : le dioxyde de carbone, le méthane, et le protoxyde d'azote. Ces trois polluants sont de puissants gaz à effet de serre qui contribuent gravement au réchauffement climatique. Pendant la combustion des résidus par la chaudière, les principaux polluants émis sont constitués d'oxyde d'azote, d'oxyde de soufre, de microparticules et de métaux lourds (zinc, cobalt, nickel, cuivre, et plomb).

Au niveau de la chaudière, plusieurs méthodes permettent de réduire les émissions des oxydes d'azotes, d'oxyde de soufre, des particules PM et des métaux lourds. Ainsi, les possibilités technologiques de réduction des émissions de NOx comprennent les mesures primaires et les mesures secondaires (Oberberger et al., 2006). Les oxydes de soufre (SOx) peuvent être capturés

dans les gaz de combustion par le calcaire (CaCO_3) ou la dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)$) à des températures de combustion comprises entre 800°C et 900°C (*Khan et al., 2009*). Enfin, les particules (PM) et les métaux lourds présents dans les fumées peuvent également être capturés à l'aides de filtres à manches et de filtres électrostatiques (*Obernberger et al., 2006 ; Khan et al., 2009*).

Quant aux gaz à effet de serre, leurs émissions peuvent être réduites par l'utilisation d'engins non motorisés pour la collecte des résidus, et/ou une augmentation des capacités des véhicules. Il est aussi possible de réduire la distance de transport des résidus du centre de collecte à la centrale thermique.

Conclusion

Afin de proposer des techniques efficaces permettant la réduction des polluants environnementaux émis lors de la production d'électricité, ce dernier chapitre du manuscrit a utilisé l'analyse du cycle de vie (ACV) pour évaluer les impacts environnementaux du procédé. L'étude a consisté à calculer les impacts environnementaux pour la production de 1 kWh d'électricité. Pour cela, le cycle de vie des résidus, pendant cette production d'électricité, a été divisé en processus élémentaires : la production des cultures, la collecte des résidus, le transport des résidus et la combustion des résidus. Les résultats de l'analyse ont révélé que la production d'électricité utilisant les différents résidus s'accompagne d'émissions impliquant l'acidification, l'eutrophisation, le réchauffement climatique, et la toxicité humaine. Les polluants, à l'origine de ces impacts environnementaux, sont majoritairement composés d'oxyde de soufre, d'oxydes d'azote, de dioxyde de carbone, de méthane, de protoxyde d'azote, de métaux lourds (zinc, cobalt, nickel, cuivre, et plomb) et de particules PM. Ils sont essentiellement émis pendant les processus de collecte, transport et combustion des résidus. Il existe plusieurs techniques permettant de réduire leurs émissions. Ainsi, Les oxydes d'azotes et les oxydes de soufre peuvent être réduites par des techniques telles que la combustion étagée, la réduction sélective non catalytique (RSNC), la réduction sélective catalytique (RSC). Les particules (PM) et les métaux lourds peuvent être capturés par l'utilisation des filtres à manches et des filtres électrostatiques. Enfin, les gaz à effet de serre, à l'origine du réchauffement climatique, émis pendant la collecte et transport, peuvent être réduits par une augmentation des capacités des véhicules, une utilisation d'engins de collecte non motorisés, ou une réduction de la distance de transport.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Cette étude s'est intéressée à la valorisation énergétique des résidus des cultures de riz, café et cacao provenant de Kodaya, un village situé dans la région de la Nawa. En effet, la paille de riz, la balle de riz, la coque de café et le cortex de cacao provenant du village sont analysés pour être utilisés comme combustibles d'une centrale thermique à biomasse de 5 MW pour la production d'électricité. L'étude a consisté d'abord à déterminer les caractéristiques thermochimiques de chaque résidu de culture. Les mélanges des résidus pouvant être utilisés pour la production d'électricité, ont également été caractérisés. L'étude a enfin évalué les performances environnementales des résidus et proposer des techniques de réduction des polluants environnementaux émis.

Les résultats de la caractérisation thermochimiques ont révélé que les résidus ont une teneur élevée en matières volatiles (64,02%-72,94%) et en cendres (8%-23,7%). Leurs pouvoirs calorifiques supérieurs sont compris entre 10,49 MJ/kg et 14,71 MJ/kg. Leurs teneurs en humidité sont comprises entre 7,82% à 12,33%. Aussi, les cendres de la paille de riz et de la balle de riz sont riches en silicium avec des teneurs comprises entre 64,45% et 74,78%. Celles de la coque de café et du cortex de cacao sont riches en potassium avec des teneurs respectives de 72,05% et 77,53%. Enfin, la présence d'azote (0,95%-3,01%), chlore (0,02%–0,30%) et soufre (0,21–0,32%) a été observée dans les différents résidus de culture.

Au cours de la caractérisation des mélanges utilisables des résidus, il a été révélé que plusieurs combustibles issus des mélanges des résidus des cultures confèrent au modèle de la centrale thermique de 5 MW, des performances énergétiques et environnementales acceptables pour la production d'électricité. Ces combustibles peuvent être subdivisés en trois grandes familles en fonction de la composition de leurs cendres. Il s'agit des combustibles issus des

- Mélanges de paille de riz avec des proportions massiques de balle de riz supérieures à 70% ;
- Mélanges de cortex de cacao avec des proportions massiques de balle de riz supérieures à 85% ;
- Mélanges de coque de café avec des proportions massiques de balle de riz supérieures à 80% .

Ces différents combustibles sont pauvres en chlore, avec des teneurs inférieures à 0.1%. Ainsi, leur combustion, dans la chaudière, ne sera ni source d'émission de polluants acides tels que, l'acide chlorhydrique (HCl), les polychloro-dibenzo dioxines (PCDD) et les polychloro-dibenzo furanes (PCDF) ; ni à l'origine de la corrosion des parois de la chaudière due au chlore.

Enfin, l'ACV du procédé a montré que la production d'électricité utilisant les résidus s'accompagne d'émissions impliquant l'acidification, l'eutrophisation, le réchauffement climatique et la toxicité humaine. Les polluants, à l'origine de ces impacts environnementaux, sont majoritairement composés d'oxydes de soufre, d'oxydes d'azote, de dioxyde de carbone, de méthane, de protoxyde d'azote, de métaux lourds (zinc, cobalt, nickel, cuivre, et plomb) et de particules PM. Ils sont essentiellement émis pendant les processus de collecte, de transport et de combustion des résidus. Plusieurs méthodes permettent de réduire l'émission de certains de ces polluants. Ainsi, les oxydes d'azotes, et les oxydes de soufre peuvent être réduits par des techniques telles que la combustion étagée, la réduction sélective non catalytique (RSNC), et la réduction sélective catalytique (RSC). Les particules PM et les métaux lourds peuvent être capturés par l'utilisation des filtres à manches et des filtres électrostatiques. Enfin, les gaz à effet de serre, à l'origine du réchauffement climatique, émis pendant la collecte et le transport peuvent être réduits par une augmentation des capacités des véhicules, la réduction de la distance du transport ou l'utilisation d'engins de collecte non motorisés.

Cette thèse ouvre d'énormes perspectives de recherche. En effet, ce travail n'est qu'une modeste contribution à l'étude de systèmes de valorisation énergétiques des résidus des cultures de riz, café et cacao. Plusieurs voies d'amélioration s'annoncent, entre autre ;

- L'expérimentation de la combustion des différents résidus de culture dans une chaudière de centrale thermique. Cette expérimentation permettrait de corroborer les résultats et analyses théoriques déduites de la caractérisation thermochimique des résidus agricoles.
- L'analyse énergétique et exergetique du modèle de l'installation thermique à vapeur utilisant les combustibles issus des mélanges de trois et quatre résidus de culture. Cette autre analyse permettrait d'élargir la gamme de mélanges utilisables.
- L'analyse du comportement des combustibles issus des mélanges des résidus de culture de riz, café et cacao avec d'autres résidus agricoles au sein de la centrale thermique. Cette

étude permettrait si possible la mise en place d'un mix combustibles plus respectueux de l'équipement de combustion et de l'environnement.

- L'évaluation économique d'un tel projet. Cette évaluation permettrait d'estimer le coût de réalisation du projet, son impact économique dans la région et dans le pays.
- La valorisation des cendres provenant de la combustion des résidus de culture. Ces cendres pourraient être utilisées comme engrais biologiques pour les fermes agricoles.
- La valorisation électrique d'autres résidus de cultures abondants en milieu rural et non exploités énergétiquement.
- La recherche d'autres voies de valorisation énergétique, telles que la production de charbon biologique, de biogaz et de gaz de synthèse.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A

Abdel Daiem M.M., Said N., Negm A.M., 2018. Potential energy from residual biomass of rice straw and sewage sludge in Egypt. *Procedia Manufacturing* 22, 818–825.

Abdelhady S., Borello D., Shaban A., 2018. Techno-economic assessment of biomass power plant fed with rice straw: Sensitivity and parametric analysis of the performance and the LCOE. *Renewable Energy* 115, 1026–1034.

Acero A. A. P., Rodríguez C., Ciroth, A., 2017. LCIA methods Impact assessment methods in Life Cycle Assessment and their impact categories, (February 2014), 1-23.

Adjin-Tetteh M., Asiedu N., Dodoo-Arhin D., Karam A., Amaniampong P.N., 2018. Thermochemical conversion and characterization of cocoa pod husks a potential agricultural waste from Ghana. *Industrial Crops and Products* 119, 304–312.

Adzimah SK, Asiam EK., 2010. Design of a cocoa pod splitting machine. *Res J Appl Sci Eng Technol* 2, 622–34.

Aho, M. Paakkinen K., Taipale R., 2013. Quality of deposits during grate combustion of corn stover and wood chip blends. *Fuel* 104, 476–487.

Akram M., Garwood R., Tan C.K. 2013. Effect of fuel characteristics and operating conditions on NO_x emissions during fluidised bed combustion of high moisture biomass with coal. *Journal of the Energy Institute* 86, 177–186.

Aliyu M., AlQudaihi A. B, Said S. A. M, et Habib M. A., 2020. Energy, exergy and parametric analysis of a combined cycle power plant. *Thermal Science and Engineering Progress*, 15, 100450.

Amponsah, N.Y., Troldborg, M., Kington, B., Aalders, I., Hough, R.L., 2014. Greenhouse gas emissions from renewable energy sources: A review of life cycle considerations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 461–475.

ANARE-CI, 2020. Rapport d'activités, 156.

Armesto L., Bahillo A., Veijonen K., Cabanillas A., Otero J., 2002. Combustion behaviour of rice husk in a bubbling fluidised bed. *Biomass and Bioenergy*, 23, 171-179.

Avcıoğlu A.O., Dayıoğlu M.A., Türker U., 2019. Assessment of the energy potential of agricultural biomass residues in Turkey. *Renewable Energy*, 138, 610–619.

B

Bardeau G., 2009. Etude de la faisabilité de produire des combustibles à partir de mélanges de coproduits agricoles. Rapport de master, ENSTIB.

Basu P., 2006. *Circulating Fluidized Bed Boilers*. Springer International Publishing, Cham.

Batstone D. J. and Jensen P. D., 2011. Anaerobic processes. *Water Science*, 615-640.

Beerbaum, S., Weinrebe, G., 2000. Solar thermal power generation in India – a techno-economic analysis. *Renewable Energy*, 21, 153–174.

Bernet N., 2015. Principes et application de la digestion anaérobie pour la production d'énergie. In Colloque International «Biodiversité et changements globaux: valorisation des effluents des industries, des résidus agro-pastoraux et forestiers». KAPSEU C., NZIE W., NSO E., SIELIECHI J., NGOMO H.

Bilandzija N., Voca N., Jelcic B., Jurisic V., Matin A., Grubor M., Kricka T., 2018. Evaluation of Croatian agricultural solid biomass energy potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93, 225–230.

Bliefert C., Perraud R., 2001. *Chimie de l'environnement-air, eau, sols, déchets*, Edition De Boeck, 477.

Blissett R., Sommerville R., Rowson N., Jones J., Laughlin B., 2017. Valorisation of rice husks using a TORBED® combustion process. *Fuel Processing Technology*, 159, 247–255.

Boilers, W. R. C. I., 2001. Background document report on revisions to 5th edition AP-42 Section 1.6.

Bouet Alphonse, N'cho Achiayé Ludovic, Kéli Zagbahi Jules, Yoboué N'Guessan, Yayha Coulibaly Manga, N'guessan Placide, 2005. Bien cultiver le riz irrigué en Côte d'Ivoire. Centre national de recherche agronomique, 4.

Braimakis K., Magiri-Skouloudi D., Grimekis D., Karellas S., 2020. Energy-exergy analysis of ultra-supercritical biomass-fuelled steam power plants for industrial CHP, district heating and cooling. *Renewable Energy*, 154, 252–269.

Brown M.A., Favero A., Thomas V.M., Banboukian A., 2019. The economic and environmental performance of biomass as an “intermediate” resource for power production. *Utilities Policy*, 58, 52–62.

C

Cai J., He Y., Yu X., Banks S.W., Yang Y., Zhang X., Yu Y., Liu R., Bridgwater A.V., 2017. Review of physicochemical properties and analytical characterization of lignocellulosic biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 309–322.

Caligiani A., Marseglia A., Palla, G., 2016. Cocoa: Production, Chemistry, and Use, in: *Encyclopedia of Food and Health*. Elsevier, 185–190.

Cao W., Li J., Martí-Rosselló T., Zhang, X., 2019. Experimental study on the ignition characteristics of cellulose, hemicellulose, lignin and their mixtures. *Journal of the Energy Institute*, 92, 1303-1312.

Carlsson P, Ma C, Molinder R, Weiland F, Wiinikka H, Ohman M, Ohrman O., 2014. Slag Formation during Oxygen-Blown Entrained-Flow Gasification of Stem Wood. *Energy Fuels*, 28, 6941–52.

Champéroux, G., 1991. Manuel du planteur de café laotien.

Chanakya H.N., De Alwis A.A.P., 2004. Environmental Issues and Management in Primary Coffee Processing. *Process Safety and Environmental Protection* 82, 291–300.

Chauhan MK, et al., 2011. Life cycle assessment of sugar industry: A review. *Renew Sustain Energy Rev*, 15, 3445-353.

Cozzani V, Petarca L and Tognotti L, 1995. Devolatilization and pyrolysis of refuse derived fuels: Characterization and kinetic modelling by a thermogravimetric and calorimetric approach. *Fuel*, 74, 903–912.

D

Danias P. and Liodakis S., 2018. Characterization of refuse derived fuel using thermogravimetric analysis and chemometric techniques. *Journal of Analytical Chemistry*, 73, 351–357.

Darmawan A., Hardi F., Yoshikawa K., Aziz M., Tokimatsu K., 2017. Enhanced Process Integration of Entrained Flow Gasification and Combined Cycle: Modeling and Simulation Using Aspen Plus. *Energy Procedia*, 105, 303–308.

Davis SC, Anderson-Teixeira KJ, Delucia EH, 2009. Life-cycle analysis and ecology of biofuels. *Trends Plant Sci*, 14, 140-146.

De Man W., Chartron S., 2015. Le riz, cette céréale méconnue. *Cahiers de Nutrition et de Diététique*. *Cahiers de Nutrition et de Diététique*, 50, 165–173.

De Oliveira J.L., da Silva J.N., Martins M.A., Pereira E.G., da Conceição Trindade Bezerra e Oliveira, M., 2018. Gasification of waste from coffee and eucalyptus production as an alternative source of bioenergy in Brazil. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 27, 159–166.

Delivand M. K., Barz M., Gheewala S. H., 2011. Logistics cost analysis of rice straw for biomass power generation in Thailand. *Energy*, 36, 1435-1441.

Demirbas M.F., Balat M., Balat H., 2009. Potential contribution of biomass to the sustainable energy development. *Energy Conversion and Management*, 50, 1746.

Diby L., Kahia J., Kouamé C., Aynekulu E., 2017. Tea, Coffee, and Cocoa, in: *Encyclopedia of Applied Plant Sciences*. Elsevier, 420–425.

Dincer I., Rosen M.A., 2013. Exergy and Energy Analyses, in: *Exergy*. Elsevier, 21–30.

Du S, Yang H, Qian K, Wang X, Chen H, 2014. Fusion and transformation properties of the inorganic components in biomass ash. *Fuel*, 117, 1281–1287.

Ducroquet, H., Tillie P., Louhichi K., Gomez-Y-Paloma S., 2017. L'agriculture de la Côte d'Ivoire à la loupe / Etat des lieux des filières de production végétales et animales et revue des politiques agricoles, jrc science for policy report, 244.

E

Esso L. J., 2009. Dynamique des recettes du café et du Cacao en Côte d'Ivoire.

F

FAO et Ministère de l'agriculture et du développement rural, Côte d'Ivoire, 2019. Recensement des Exploitants et Exploitations Agricoles, 107.

FAOSTAT, <http://www.fao.org>, Consulté le: juin 30, 2021.

Farrow T. S., Sun C. and Snape C. E., 2013. Impact of biomass char on coal char burn-out under air and oxy-fuel conditions. *Fuel*, 114, 128–134.

G

George J., Arun P., Muraleedharan C., 2019. Experimental investigation on co-gasification of coffee husk and sawdust in a bubbling fluidised bed gasifier. *Journal of the Energy Institute* 92, 1977–1986.

Ghysel F., Godin B., Flamin C., Delfosse P., Delcarte J., Stilmant, D., 2010. Valorisation énergétique des fourrages: comparaison de trois filières, enjeux et opportunités. Journées AFPF–Les usages émergents des prairies et des fourrages, 15.

Goyal H.B., Seal D., Saxena R.C., 2008. Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12, 504–517.

Guy Charnpéroux, 1991. MANUEL du Planteur de café Laotien, 75.

H

Haider M., Seguin P., 2012. Chaudières. Bilans et dimensionnement, Techniques de l'ingénieur Chaudières et fours industriels, base documentaire : TIB209DUO, no ref. article : be8730.

Haji Ibrahim R. H., 2013. Fundamentals of torrefaction of biomass and its environmental impacts. These de doctorat, University of Leeds, 326.

Han H, He Y-L, Tao W-Q, Li Y-S., 2014. A parameter study of tube bundle heat exchangers for fouling rate reduction. *Int J Heat Mass Transf*, 72, 210–221.

Heikkinen J. M., Hordijk J. D., de Jong W., Spliethoff H., 2004. Thermogravimetry as a tool to classify waste components to be used for energy generation. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 71, 883-900.

Hertel O, Skjøth CA, Reis S, Bleeker A, Harrison RM, Cape JN, Fowler D, Skiba U, 2012. Governing processes for reactive nitrogen compounds in the European atmosphere. *Biogeosciences*, 9, 4921-4954.

Hinds W.C., 1982. Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles. John Wiley & Sons.

I

ISO 14040, 2006. Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework, 26.

ISO 14044, 2006. Environmental Management-Life Cycle Assessment-Requirements and Guidelines, 52.

J

Jolliet, O., Saadé, M., Crettaz, P., 2010. Analyse du cycle de vie: comprendre et réaliser un écobilan. PPUR Presses polytechniques.

K

Kaliyan N., Morey R. V., Tiffany, D. G., Lee, W. F., 2013. Life Cycle Assessment of Corn Stover Torrefaction Plant Integrated with a Corn Ethanol Plant and a Coal Fired Power Plant. Biomass and Bioenergy, 63, 92-100

Kaushik, S.C., Reddy, V.S., Tyagi S.K., 2011. Energy and exergy analyses of thermal power plants: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 15, 1857–1872.

Kébé Boubacar Ismaël, N’guessan Kouamé François, Tahi Gnion Mathias, Assiri Assiri Alexis, Koko Louis Kan, Kohi N’goran Jeanne, Irié Bi Zahouli, Koffi N’goran,, 2009. Bien cultiver le cacaoyer en Côte d’Ivoire. Centre national de recherche agronomique, 4.

Kébé Ismaël, Koffi N’goran, Konan Ahoutou, Légnaté N’gouandi, Yapo Abé, Konan Amani, Irié Bi Zahouli, 2005. Comment cultiver le caféier Robusta en Côte d’Ivoire. Centre national de recherche agronomique, 5.

Kébé Ismaël, Koffi N’goran, Konan Ahoutou, N’guessan François, Kohi N’goran Jeanne, Irié Bi Zahouli, 2005. Bien cultiver le cacaoyer en Côte d’Ivoire, Centre national de recherche agronomique, 4.

Khan A.A., de Jong W., Jansens P.J., Spliethoff H., 2009. Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies. Fuel Processing Technology 90, 21–50.

Khush, G. S., 1997. Origin, dispersal, cultivation and variation of rice. *Plant molecular biology*, 35, 25-34.

Konan Ahoutou, Yaméogo Issiaka, Assiri Assiri Alexis, Ehougan Vincent, Pokou Yao, 2015. *Manuel du planteur de cacao*, 84

Koua B.K., Koffi P.M.E., Gbaha P., Touré S., 2015. Present status and overview of potential of renewable energy in Cote d'Ivoire. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41, 907–914.

Kumar, A., 2015. A review on biomass energy resources, potential, conversion and policy in India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 530-539

Kumar, A., 2017. A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste. *Waste Management* 69, 407-422

L

La Nawa, *Guide des potentiels*. Consulté le: mars 30, 2018.

Laratte, B., 2013. *Evaluation dynamique et cumulative des impacts environnementaux dans le cadre d'une analyse de cycle de vie*. Thèse de doctorat, Troyes, 156.

Lim J.S., Abdul Manan Z., Wan Alwi S.R., Hashim H., 2012. A review on utilisation of biomass from rice industry as a source of renewable energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, 3084–3094.

M

Mahidin, Saifullah, Erdiwansyah, Hamdani, Hisbullah, Hayati A.P., Zhafran M., Sidiq, M.A., Rinaldi A., Fitria B., Tarisma R., Bindar Y., 2020. Analysis of power from palm oil solid waste for biomass power plants: A case study in Aceh Province. *Chemosphere* 253, 126714.

Mana A.A., Allouhi A., Ouazzani K., Jamil A., 2021. Feasibility of agriculture biomass power generation in Morocco: Techno-economic analysis. *Journal of Cleaner Production* 295, 126293.

Martínez-Ángel J. D., Villamizar-Gallardo R. A., & Ortíz-Rodríguez O. O., 2015. Characterization and evaluation of cocoa (*Theobroma cacao* L.) pod husk as a renewable energy source. *Agrociencia*, 49, 329-345.

Mboumboue E., Njomo D., 2018. Biomass resources assessment and bioenergy generation for a clean and sustainable development in Cameroon. *Biomass and Bioenergy* 118, 16–23.

McIlveen-Wright, D. R., Huang, Y., Rezvani, S., Redpath, D., Anderson, M., Dave, A., Hewitt, N. J., 2013. A technical and economic analysis of three large scale biomass combustion plants in the UK. *Applied energy*, 112, 396-404.

McKendry P., 2002a. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology* 83, 37–46.

McKendry P., 2002b. Energy Production from Biomass (Part 2): Conversion technologies. *Bioresource Technology* 83, 47–54.

Mhilu, C.F., 2014. Analysis of Energy Characteristics of Rice and Coffee Husks Blends. *ISRN Chemical Engineering* 2014, 1–6.

Mikkanen P. et colb., 1999. Alkali salt ash formation in four Finnish industrial recovery boilers. *Energy and Fuels*, 13, 778–95

Mohammadi F., Roedl A., Abdoli M. A., Amidpour M., Vahidi H., 2020. Life cycle assessment (LCA) of the energetic use of bagasse in Iranian sugar industry. *Renewable Energy*, 145, 1870-1882.

Morin G., Dersch J., Platzer W., Eck M., Häberle A., 2012. Comparison of linear Fresnel and parabolic trough collector power plants. *Sol. Energy* 86, 1–12.

Muench S., Guenther E., 2013. A systematic review of bioenergy life cycle assessments. *Applied Energy* 112, 257–273.

N

Narita Y., Inouye K., 2014. Review on utilization and composition of coffee silverskin. *Food Research International* 61, 16–22.

Nielsen H. P., Baxter L. L., Sclippab G., Morey, C., Frandsen F. J., Dam-Johansen K., 2000. Deposition of potassium salts on heat transfer surfaces in straw-fired boilers: a pilot-scale study. *Fuel*, 79, 131-139.

Nzihou A., Stanmore B. R., 2015. The formation of aerosols during the co-combustion of coal and biomass. *Waste and biomass valorization*, 6, 947-957.

O

Obernberger I., Brunner T., Barnthaler G., 2006. Chemical properties of solid biofuels—significance and impact. *Biomass and Bioenergy* 30, 973–982.

Obernberger I., Thek G., 2004. Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. *Biomass and Bioenergy* 27, 653–669.

Openshaw K., 2010. Biomass energy: employment generation and its contribution to poverty alleviation. *Biomass Bioenergy*, 34, 365–378

P

Paletto A., Bernardi S., Pieratti, E., Teston F., Romagnoli M., 2019. Assessment of environmental impact of biomass power plants to increase the social acceptance of renewable energy technologies. *Heliyon* 5, e02070.

Parascanu M.M., Sandoval-Salas F., Soreanu G., Valverde J.L., Sanchez-Silva L., 2017. Valorization of Mexican biomasses through pyrolysis, combustion and gasification processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 71, 509–522.

Parisot, J., 1993. Conception et calcul des chaudières : foyer et circulation, Techniques de l'ingénieur Chaudières et fours industriels, base documentaire: TIB209DUO., no ref. article : b1461.

Prasad S., Singh A., Korres N.E., Rathore D., Sevda S., Pant D., 2020. Sustainable utilization of crop residues for energy generation: A life cycle assessment (LCA) perspective. *Bioresource Technology* 303, 122964.

Q

Quispe I., Navia R., Kahhat R., 2017. Energy potential from rice husk through direct combustion and fast pyrolysis: A review. *Waste Management* 59, 200–210.

R

Ramjeawon T., 2008. Life cycle assessment of electricity generation from bagasse in Mauritius. *Journal of Cleaner Production*, 16, 1727–1734.

Rasheed N.A., Nordin M.J., Dakheel A.H., Nados W.L., Maaroo M.K.A., 2017. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*. RJASET 14, 324–333.

Raveendran K., Ganesh A., Khilar K. C., 1996. Pyrolysis characteristics of biomass and biomass components. *Fuel*, 75, 987–998.

Roy D., Samanta S., Ghosh S., 2020. Performance assessment of a biomass fuelled advanced hybrid power generation system. *Renewable Energy* 162, 639–661.

Ruiz J.A., Juárez, M.C., Morales M.P., Muñoz P., Mendivil M.A., 2013. Biomass gasification for electricity generation: Review of current technology barriers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 18, 174–183.

S

Saenger M., Hartge E.-U., Werther J., Ogada T., Siagi Z., 2001. Combustion of coffee husks. *Renewable Energy* 23, 103–121.

Sahoo U., Kumar R., Pant P.C., Chaudhary R., 2016. Resource assessment for hybrid solar-biomass power plant and its thermodynamic evaluation in India. *Solar Energy* 139, 47–57.

Saidur R., Abdelaziz E.A., Demirbas A., Hossain M.S., Mekhilef S., 2011. A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, 2262–2289.

Salman C. A., Schwede S., Thorin E., Yan J., 2017. Enhancing biomethane production by integrating pyrolysis and anaerobic digestion processes. *Applied Energy*, 204, 1074-1083.

Sawerysyn, J.-P., 1993. *Les pouvoirs calorifiques* 87, 11.

Shafie S.M., Mahlia T.M.I., Masjuki H.H., Ahmad-Yazid A., 2012. A review on electricity generation based on biomass residue in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, 5879–5889.

Shafie S.M., Masjuki H.H., Mahlia T.M.I., 2014. Life cycle assessment of rice straw-based power generation in Malaysia. *Energy* 70, 401–410.

Simone M., Barontini, F., Nicoletta C., Tognotti L., 2012. Gasification of pelletized biomass in a pilot scale downdraft gasifier. *Bioresource Technology* 116, 403–412.

Skodras G., Grammelis P., Basinas P., Prokopidou M., Kakaras E., Sakellariopoulos G. P., 2009. A thermochemical conversion study on the combustion of residue-derived fuels. *Water, Air, & Soil Pollution: Focus*, 9, 151-157.

Strzalka R., Erhart, T. G., Eicker, U., 2013. Analysis and optimization of a cogeneration system based on biomass combustion. *Applied Thermal Engineering*, 50, 1418-1426.

Suramaythangkoor T., Gheewala S.H., 2010. Potential alternatives of heat and power technology application using rice straw in Thailand. *Applied Energy* 87, 128–133.

Suresh N.S., Thirumalai N.C., Dasappa S., 2019a. Modeling and analysis of solar thermal and biomass hybrid power plants. *Applied Thermal Engineering* 160, 114121.

Syamsiro M., Saptoadi H., Tambunan B.H., Pambudi N.A., 2012. A preliminary study on use of cocoa pod husk as a renewable source of energy in Indonesia. *Energy for Sustainable Development* 16, 74–77.

Szargut, J., 2005. *Exergy Method: Technical and Ecological Applications*. WIT press.

T

Titiloye J.O., Abu Bakar M.S., Odetoeye T.E., 2013. Thermochemical characterisation of agricultural wastes from West Africa. *Industrial Crops and Products* 47, 199–203.

Tsai C.-H., Tsai W.-T., Liu S.-C., Lin Y.-Q., 2018. Thermochemical characterization of biochar from cocoa pod husk prepared at low pyrolysis temperature. *Biomass Conv. Bioref.* 8, 237–243.

U

US EPA (US Environmental Protection Agency), 2004. *Climate leaders greenhouse gas inventory protocol core module guidance: Direct emissions from mobile combustion sources*.

V

Van Gevelt T., 2014. Rural electrification and development in South Korea. *Energy for Sustainable Development* 23, 179–187.

Varun, Bhat, I.K., Prakash, R., 2009a. LCA of renewable energy for electricity generation systems—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13, 1067–1073.

Varun Prakash R, Bhat IK, 2009b. Energy, economics and environmental impacts of renewable energy systems. *Renew Sustain Energy Rev*; 13, 2716–21.

Vassilev S. V., Baxter D., Andersen L. K., Vassileva C. G., & Morgan, T. J., 2012. An overview of the organic and inorganic phase composition of biomass. *Fuel*, 94, 1-33.

Vriesmann L.C., de Mello Castanho Amboni R.D., de Oliveira Petkowicz C.L., 2011. Cacao pod husks (*Theobroma cacao* L.): Composition and hot-water-soluble pectins. *Industrial Crops and Products* 34, 1173–1181.

Vriesmann L.C., de Oliveira Petkowicz C.L., 2017. Cacao pod husks as a source of low-methoxyl, highly acetylated pectins able to gel in acidic media. *International Journal of Biological Macromolecules* 101, 146–152.

Y

Yoshida Y., Dowaki K., Matsumura Y., Matsubishi R., Li, D., Ishitani H., Komiyama H., 2003. Comprehensive comparison of efficiency and CO₂ emissions between biomass energy conversion technologies—position of supercritical water gasification in biomass technologies. *Biomass and Bioenergy*, 25, 257-272.

Z

Zhang M, Buekens A, Jiang X, Li X., 2015. Dioxins and polyvinylchloride in combustion and fires. *Waste Management Research* 33, 630–43.

ANNEXES

ANNEXE I : Principales caractéristiques du système électrique ivoirien, au 31 décembre 2020 (ANARE-CI, 2020)

Parc de production hydraulique	Groupes	Puissance installées groupe (MW)	Puissance installées centrale (MW)	Année de mise en service
Ayamé 1	G1	10	20	1959
	G2	10		1959
Ayamé 2	G3	15	30	1965
	G4	15		1965
Kossou	G1	58	174	1972
	G2	58		1972
	G3	58		1972
Taabo	G1	70	210	1979
	G2	70		1979
	G3	70		1979
Buyo	G1	55	165	1980
	G2	55		1980
	G3	55		19880
Fayé	G1	2.5	5	1983
	G2	2.5		1983
Soubré	G1	90	275	2017
	G2	90		
	G3	90		
	G4	5		
Total parc de production hydraulique (MW)			879	

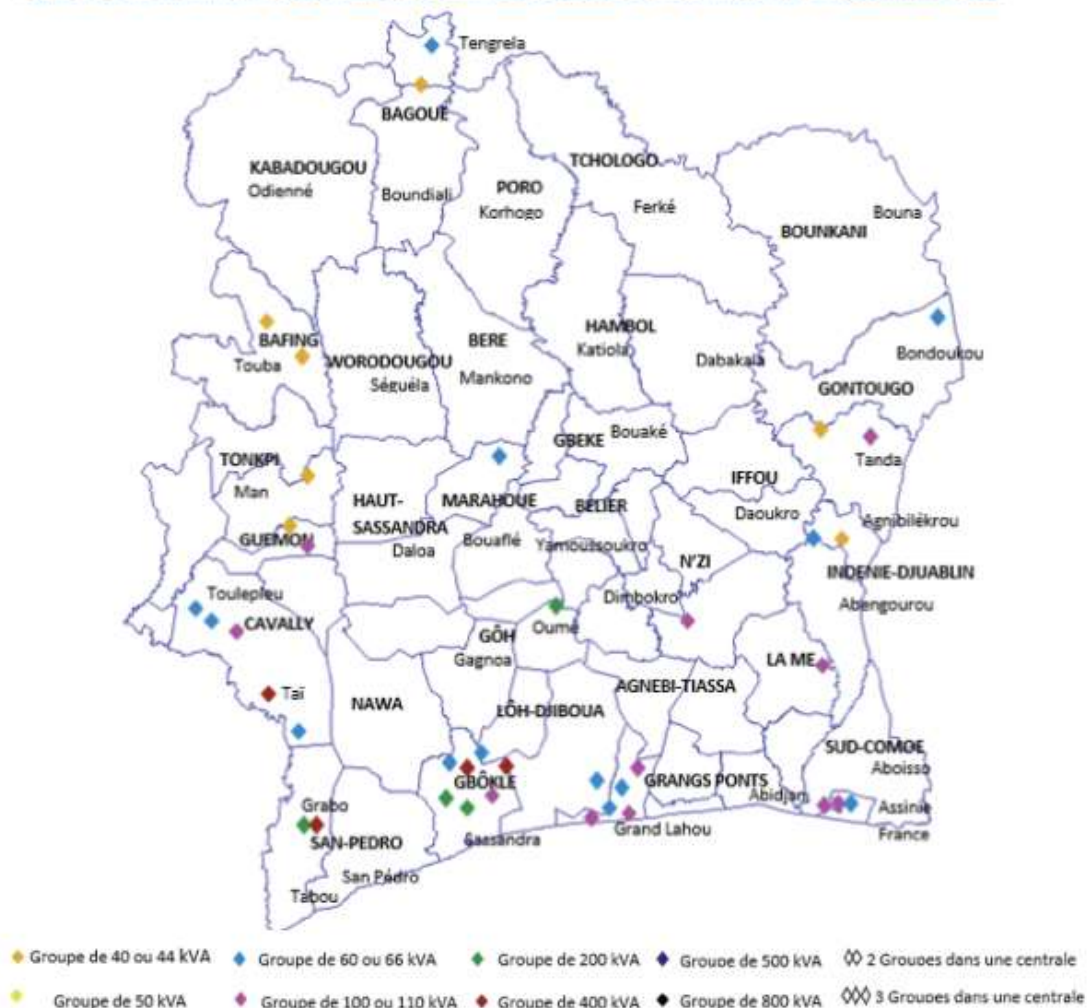
Parc de production thermique	Groupes	Puissance installées groupe (MW)	Puissance installées centrale (MW)	Année de mise en service
VRIDI 1	TAG1	25	100	1984
	TAG2	25		1984
	TAG3	25		1984
	TAG4	25		1984
	TAG5	33		1995
	TAG6	33		1995
	TAG7	33		1995
CIPREL	TAG8	111	543	1997
	TAG9	111		2010
	TAG10	111		2014
	TAV	111		2016
Azito Energie	TAG11	150 / 15	480	1999
	TAG12	150 / 15		2000
	TAV	150		2015
Aggreko	Aggreko 1	70	200	2010
	Aggreko 2	30		2012
	Aggreko 3	48		2013
	Aggreko 4	52		2013
Sous total thermique (MW)			1323	
Total parc de production (MW)			2202	

ANNEXE II : Récapitulatif des centrales isolées par région administrative

• TABLEAU RÉCAPITULATIF DES CENTRALES ISOLÉES PAR RÉGION ADMINISTRATIVE

RÉGIONS ADMINISTRATIVES	NOMBRE DE CENTRALES	RÉGIONS ADMINISTRATIVES	NOMBRE DE CENTRALES	RÉGIONS ADMINISTRATIVES	NOMBRE DE CENTRALES
Bafing	2	Gontougo	3	Marahoué	1
Bagoué	2	Grands-Ponts	6	San Pédro	1
Cavally	5	Guemon	2	Sud-Comoé	1
Gbôklè	7	Indénié Djuablin	2	Tonkpi	1
Gôh	1	La Mé	1		
TOTAL REGIONS			35		

• CARTE DE RÉPARTITION RÉGIONALE DES CENTRALES ISOLÉES EN SERVICE AU 31 DÉCEMBRE 2020



ANNEXE III : Zones de production des cultures en Côte d'Ivoire



Figure 1. Zones de production du riz paddy en Côte d'Ivoire



Figure 2. Zones de production de grains de café vert en Côte d'Ivoire



Figure 3. Zones de production des fèves sèches de cacao en Côte d'Ivoire

ANNEXE IV : Processus de production des résidus de cultures

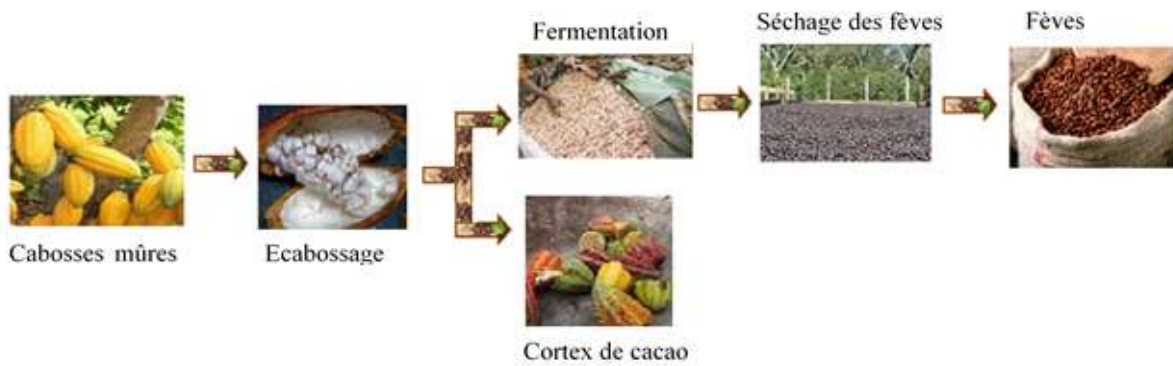


Figure 1. Processus de production du cortex de cacao



Figure 2. Processus de production de la coque de café

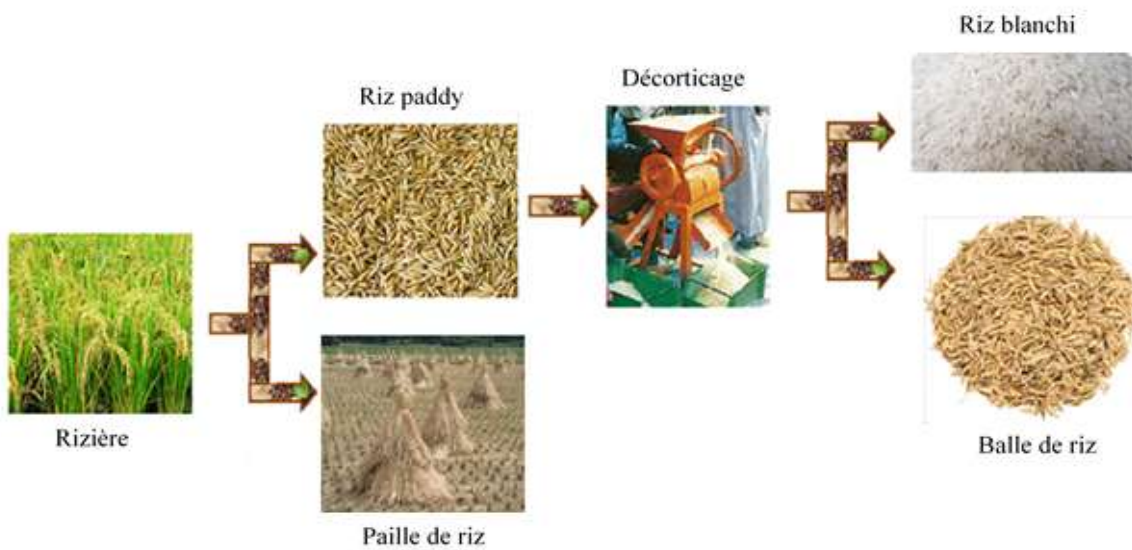


Figure 3. Processus de production de la paille et balle de riz

ANNEXE V : Technologies des chaudières à biomasse

1. Chaudière à grille

La chaudière à grille est à la fois la plus ancienne et la plus répandue pour brûler des biomasses de toute nature. Elle est adaptée pour brûler de la biomasse avec une forte teneur en humidité, des particules avec des dimensions variables et de grandes tailles.

La grille est conçue pour assurer un transport régulier et une bonne répartition du combustible afin d'optimiser l'apport et la proportion d'oxygène. Elle peut être fixe, inclinée, ou mobile.

Cette technologie a dû évoluer dans les dernières années pour s'adapter aux nouvelles exigences réglementaires, notamment en matière d'émissions atmosphériques. Ainsi, ces foyers peuvent fonctionner de manière à obtenir une combustion plus complète et permettent de réduire les émissions de particules et de NOx.

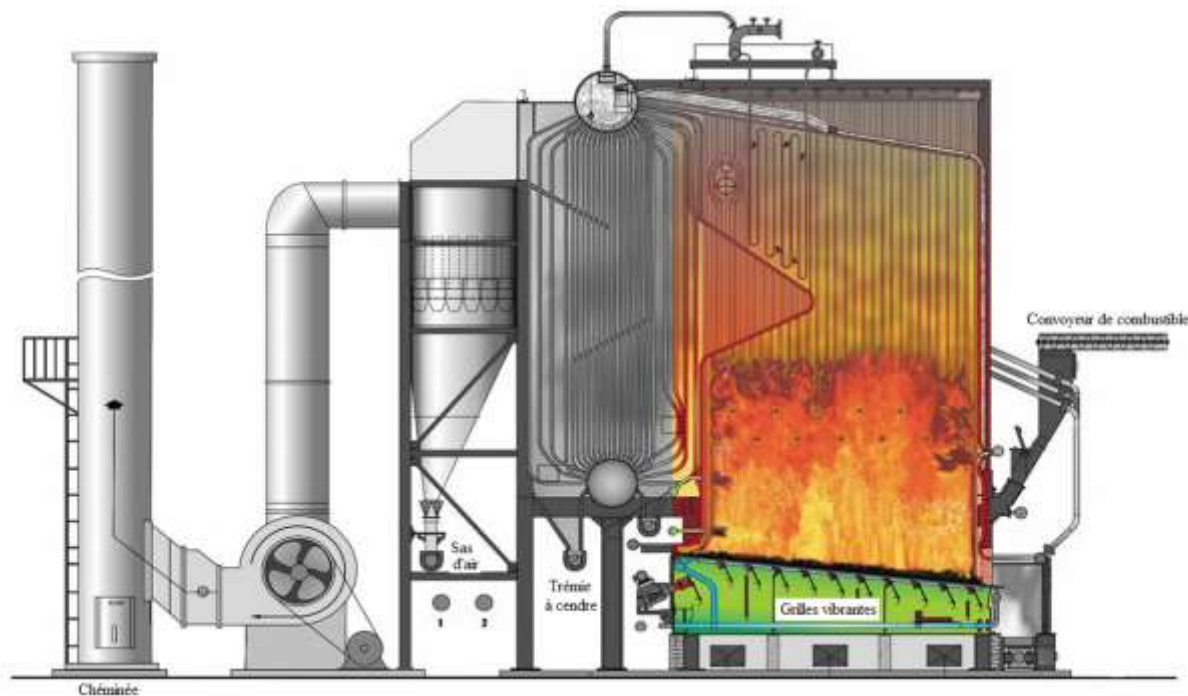


Figure 1. Chaudière à Grilles vibrantes

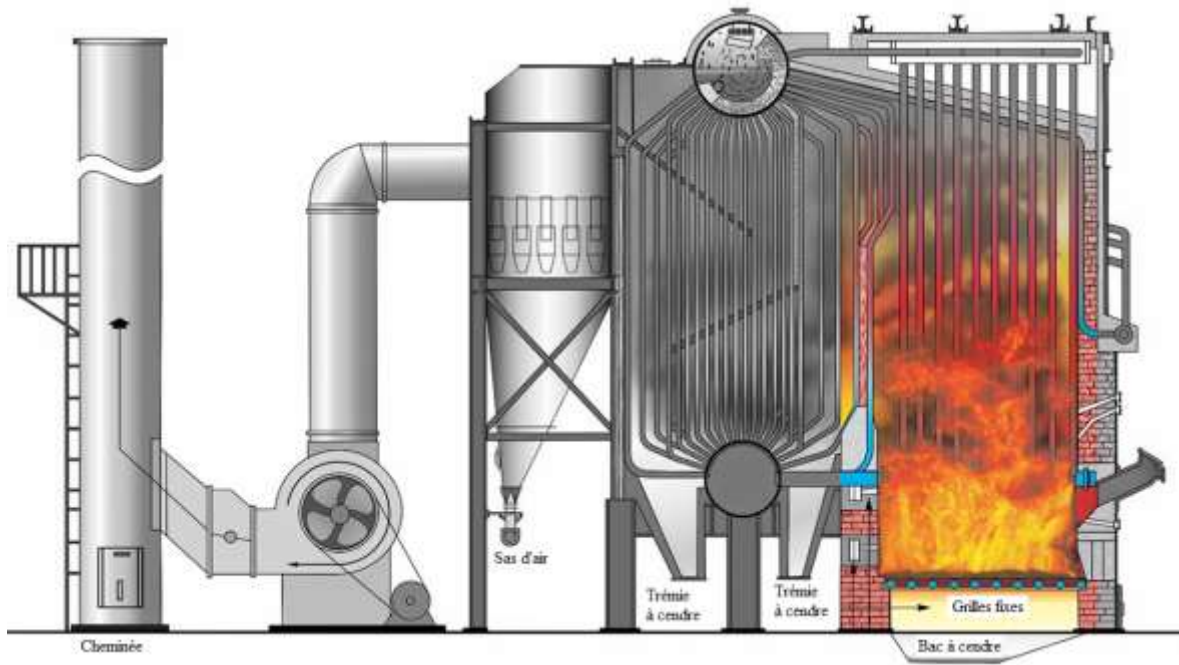


Figure 2. Chaudière à Grilles fixes

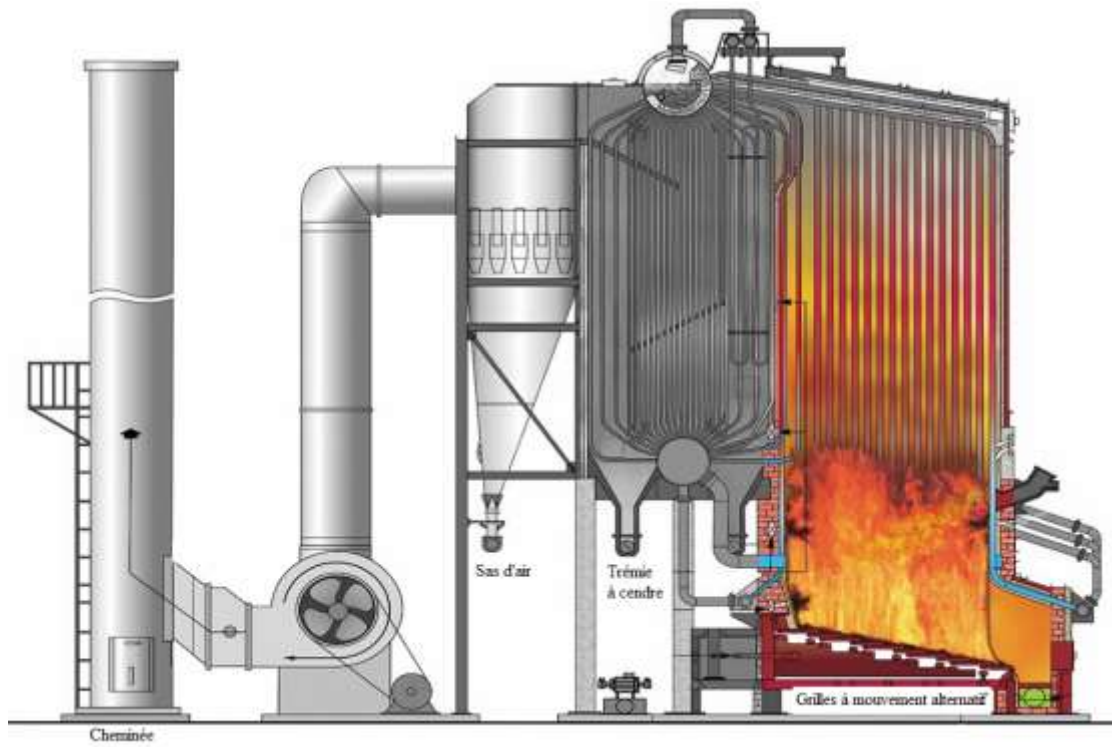


Figure 3. Chaudière à Grilles à mouvement alternatif

2. Chaudière à lit fluidisé

La fluidisation est l'état dans lequel les particules solides sont maintenues en suspension dans un courant de gaz ascendant. Dans une chaudière à lit fluidisé, la combustion de la biomasse se déroule dans un lit composé de sable, de combustible et de cendre.

La chaudière à lit fluidisé est adaptée pour brûler des combustibles à forte teneur en humidité, de pouvoir calorifique faible, et ayant des caractéristiques variables. La combustion de la biomasse s'y produit à température basse et stable comprise entre 800 et 900°C, et sans émission de NOx. Par contre elle exige des systèmes de séparation gaz-solide (filtres) très efficaces.

Il existe deux types de chaudières à lits fluidisés : la chaudière à lit fluidisé circulant et la chaudière à lit fluidisé bouillonnant.

Dans la chaudière à lit fluidisé bouillonnant, les particules du lit ont des vitesses de fluidisation comprises entre 1 et 3 m/s. Elle est essentiellement utilisée dans le secteur du bois et du papier, pour brûler des résidus ligneux ; et exige que le combustible ait une certaine teneur en eau et en alcalis. Elle n'est pas recommandée pour un combustible sec.

En outre, dans la chaudière à lit fluidisé circulant, la vitesse de fluidisation est comprise entre 3 et 6 m/s. Les particules entraînées dans le lit sont séparées dans un cyclone et retournées au fond de la cuve de fluidisation (partie basse du foyer). Elle permet de brûler des combustibles de dimensions et de teneurs en eau variés. Mais elle est sensible à la teneur en alcalis du combustible.

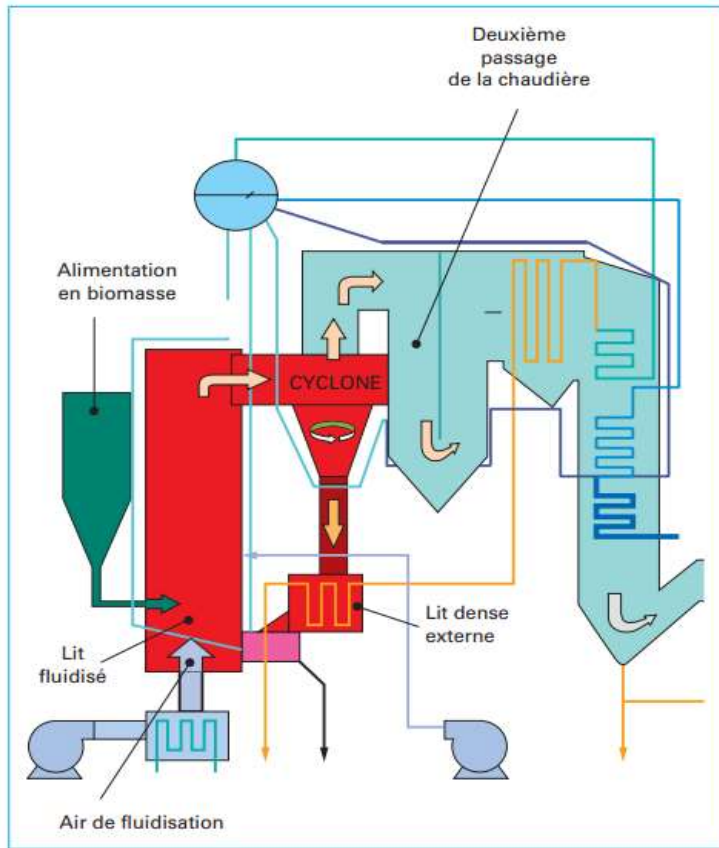


Figure 1. Chaudière à lit fluidisé circulant (LFC)

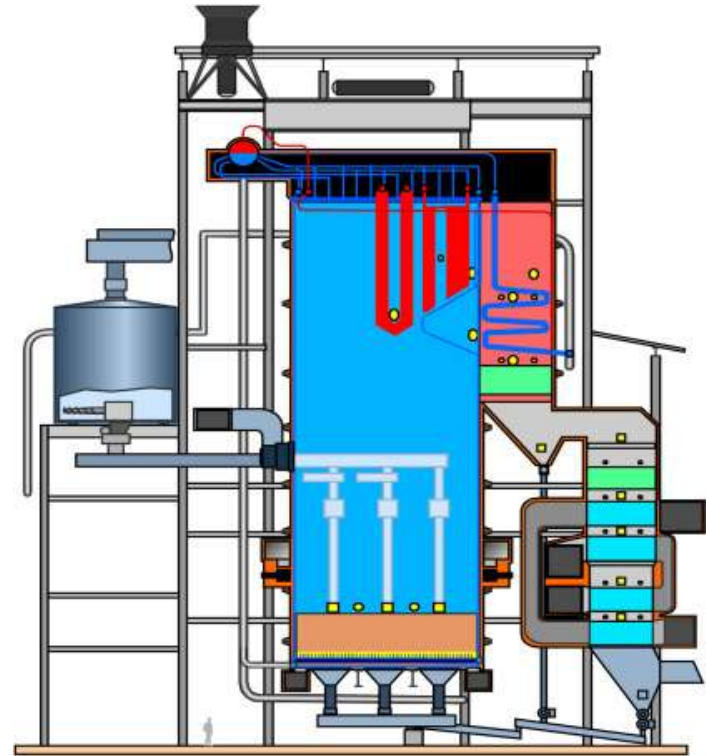


Figure 2. Chaudière à lit fluidisé bouillonnant (LFB)

ANNEXE VI : Types de turbines à vapeur

1. Turbine à condensation

Dans les turbines à condensation, la vapeur est détendue jusqu'à une pression très basse (se rapprochant du vide), puis liquéfiée dans un condenseur refroidi soit par l'air ambiant, soit par de l'eau. Ce type de turbine est surtout utilisé dans les installations visant à optimiser la production d'électricité.

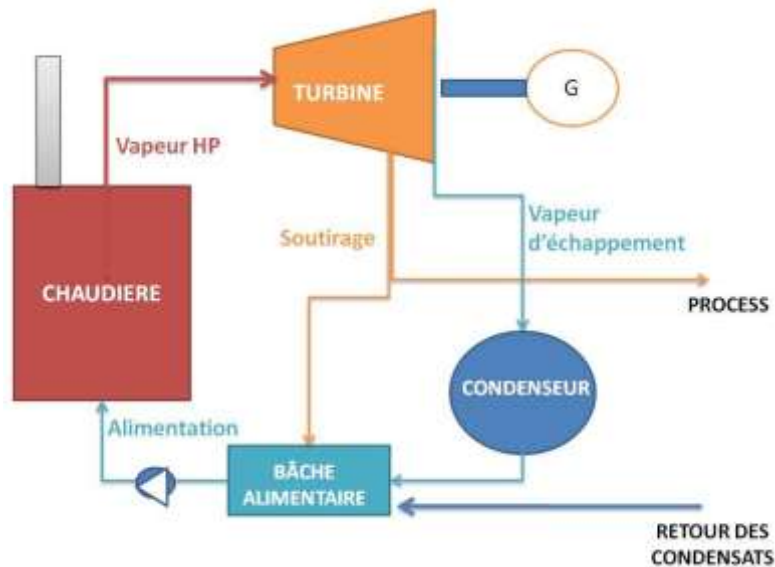


Figure 1. Schéma de principe d'une centrale avec turbine à condensation

2. Turbine à contre pression

Dans une turbine à contre-pression, la vapeur sort de la turbine à une certaine pression, qui est imposée par le procédé en aval et est mise à la disposition de l'utilisateur final. La vapeur dans la turbine est détendue jusqu'à une pression supérieure à la pression atmosphérique, puis est envoyée directement au procédé (ou via un échangeur pour des besoins en eau chaude) qui sert donc de condensateur. Ainsi, lorsque le procédé s'arrête, la centrale doit également s'arrêter. Ce type de turbine permet de produire de l'électricité grâce aux hautes températures et pressions obtenues dans la chaudière.

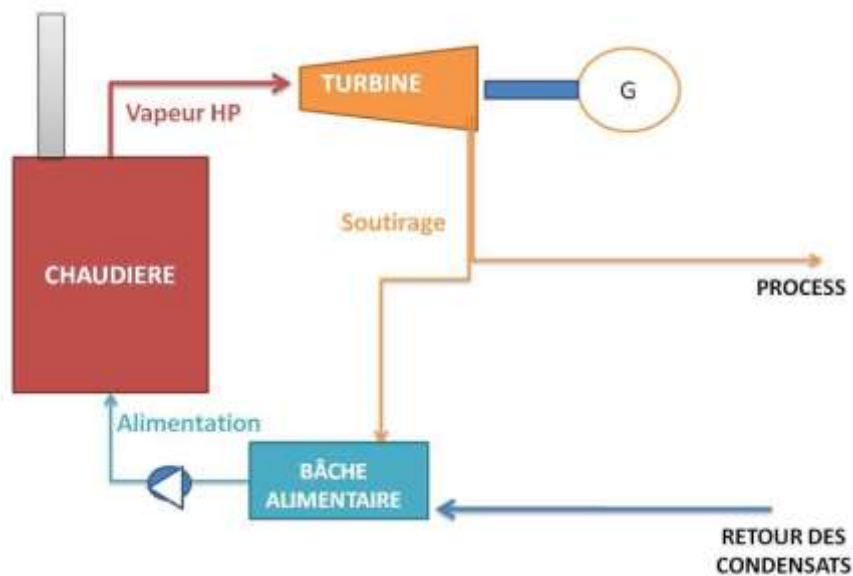


Figure 2. Schéma de principe d'une centrale avec turbine à contre-pression

ANNEXE VII : Fiches d'enquête

FICHE D'ENQUETE N° :

**PRODUCTION ANNUELLE DE GRAINS DE CAFE VERT ET FEVES SECHES DE
CACAO DANS LE VILLAGE KODAYA**

MAGASIN :

CODE :

ANNEE DE CREATION :

GERANT :

TEL/CEL :

MAIL :

Produit	2016 - 2017	2017 - 2018	2018 - 2019	2018 - 2019
Fèves sèches de cacao (Tonnes)				
Grains de café vert (Tonnes)				

FICHE D'ENQUETE N° :

PRODUCTION ANNUELLE DE PADDY DANS LE VILLAGE KODAYA

MOULIN :

CODE :

ANNEE DE CREATION :

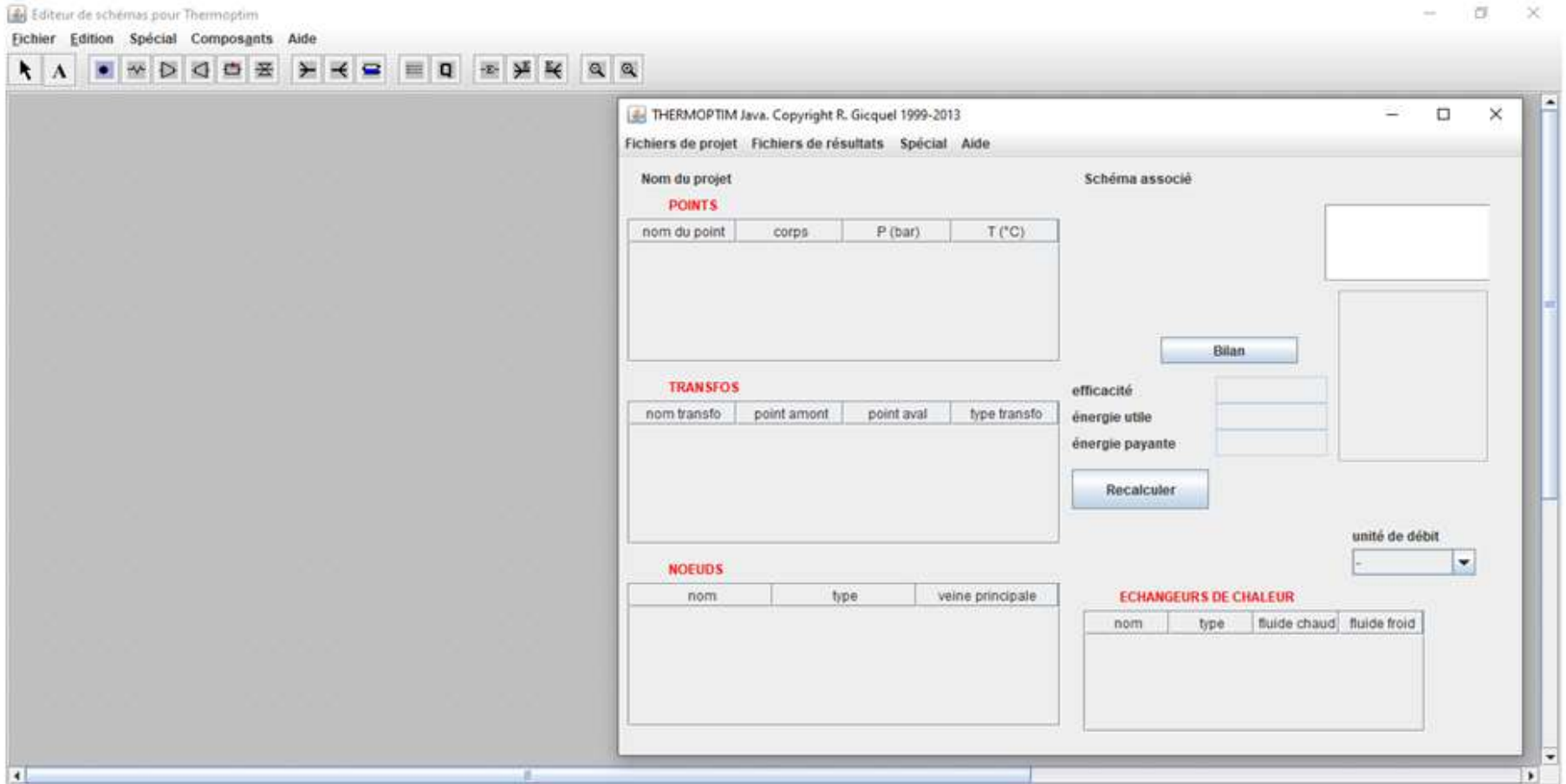
GERANT :

TEL/CEL :

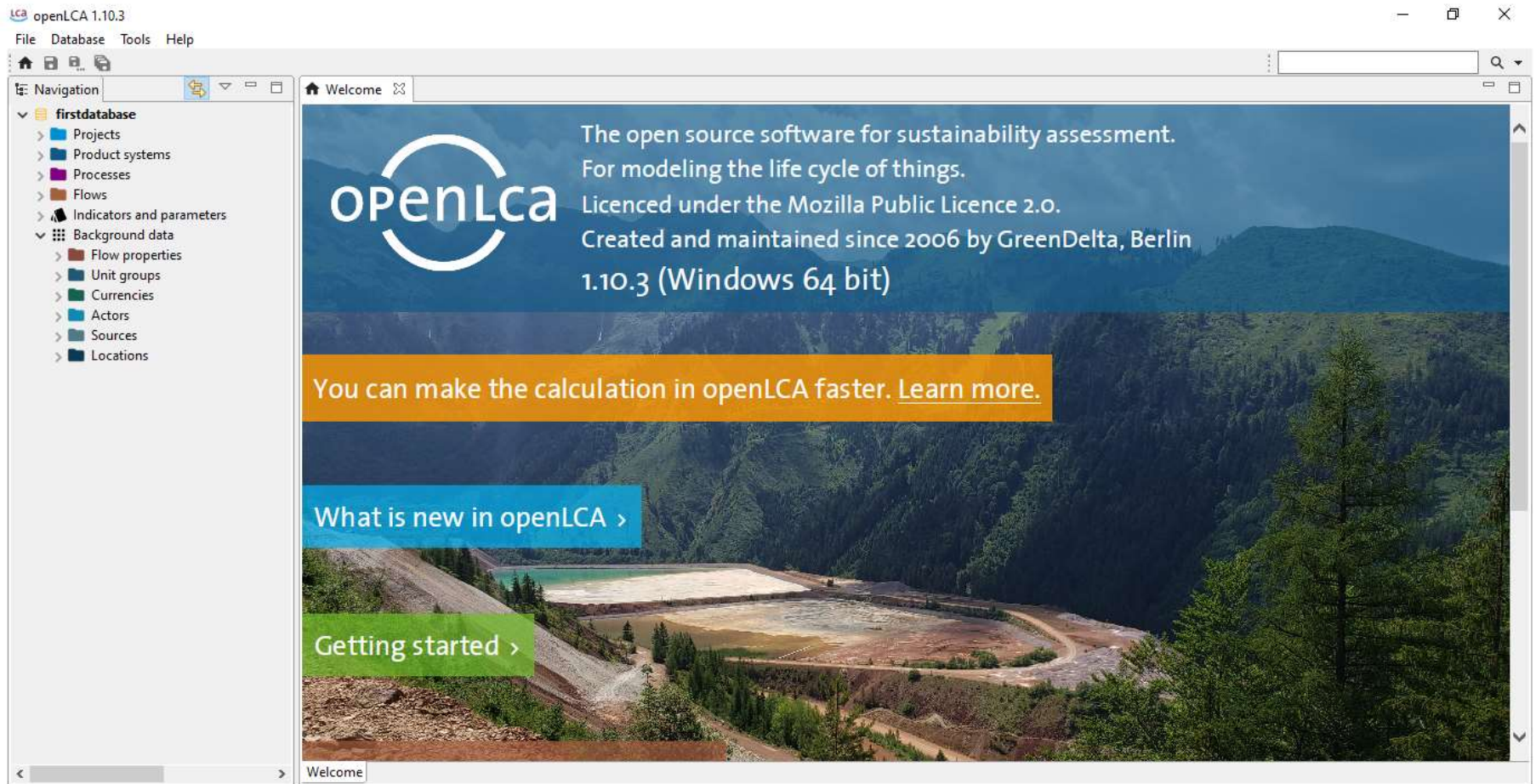
MAIL :

Produit	2016 - 2017	2017 - 2018	2018 - 2019	2018 - 2019
Riz paddy (Tonnes)				

ANNEXE VIII : Page d'accueil THERMOPTIM



ANNEXE IX : Page d'accueil d'OpenLCA 1.10.3



ANNEXE X : Modèles des procédés sous OpenLCA

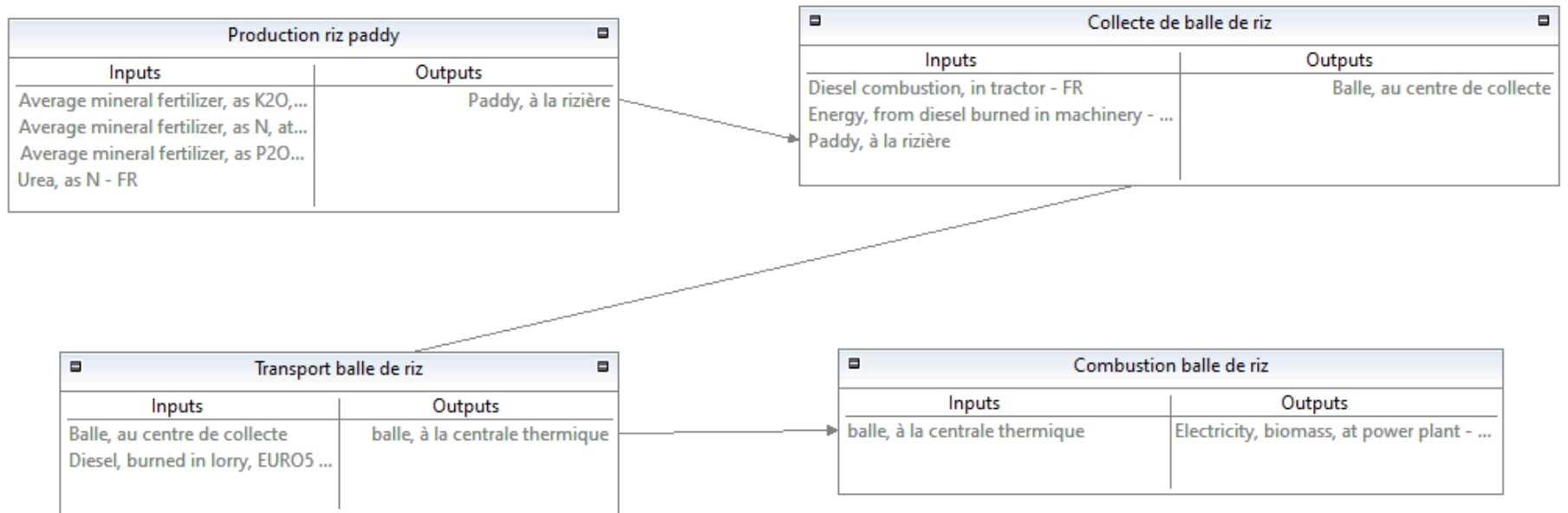


Figure 1. Modèle du procédé de production de l'électricité utilisant la balle de riz

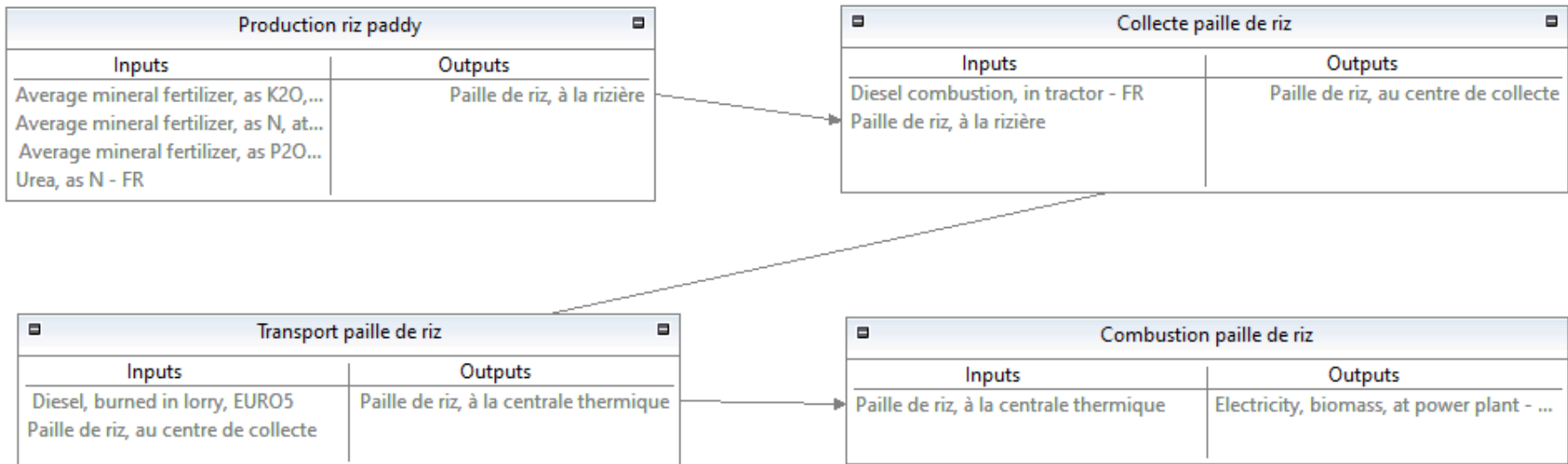


Figure 2. Modèle du procédé de production de l'électricité utilisant la paille de riz

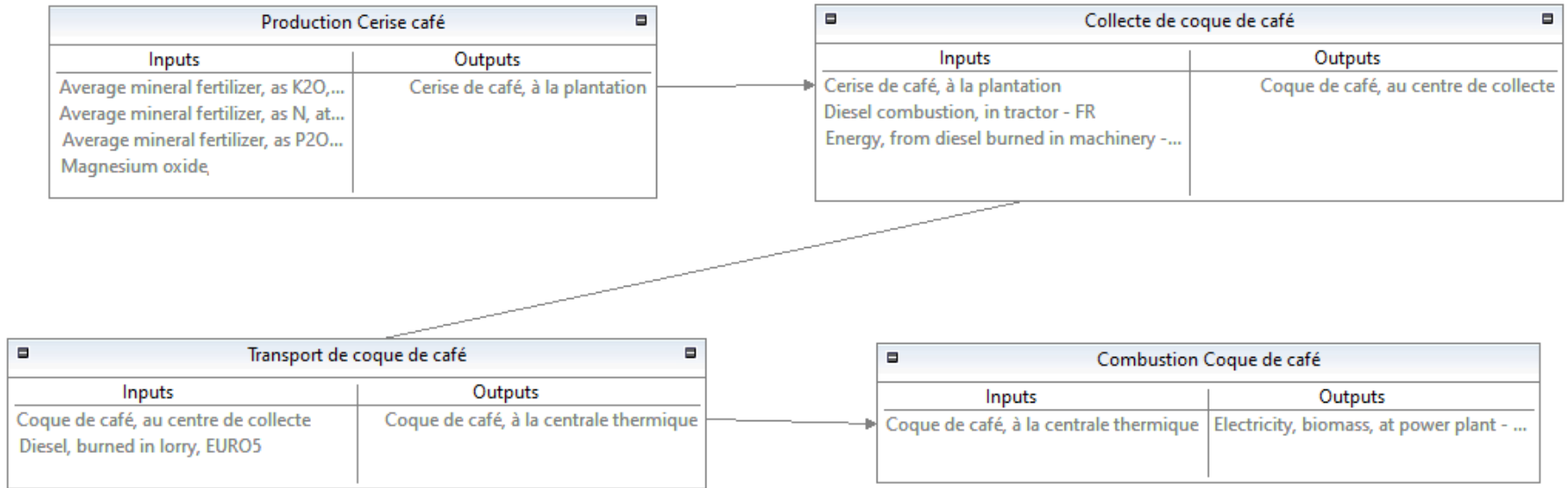


Figure 3. Modèle du procédé de production de l'électricité utilisant la coque de café

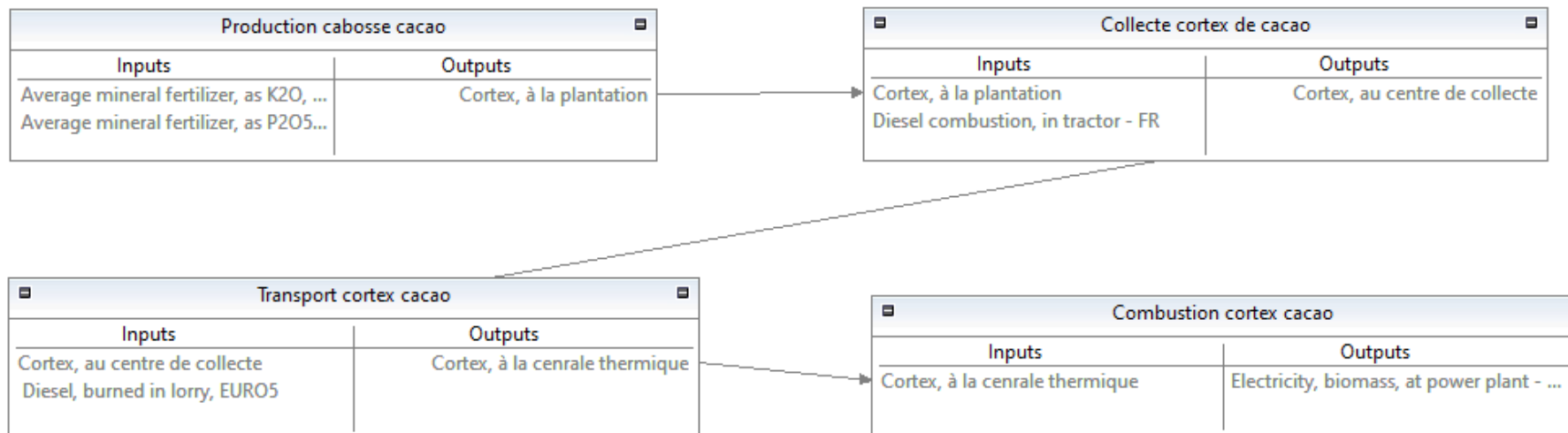


Figure 4. Modèle du procédé de production de l'électricité utilisant le cortex de cacao

ANNEXE XI : Analyse économique

Coût d'investissement (<i>Chambon et al, 2011</i>)	3 500€ / kW	11 480 000 000 FCFA
Coût annuel d'exploitation (<i>Chambon et al, 2011</i>)		579 685 000 FCFA
○ Consommation des auxiliaires (électricité)	12%	5,3 GWh/An
○ Maintenance	2,6% Inv. /An	298 480 000 FCFA
○ Besoin en personnel	10 employés	44 400 000 FCFA
○ Coût annuel du carburant	107 000 litres	65 805 000 FCFA
○ Coût du combustible	3 FCFA / kg	171 000 000 FCFA
Chiffres d'affaire/An		2 292 100 000 FCFA
○ Production énergétique /An	8 280 heures	36,1 GWh
○ Prix minimal du kWh		61 FCFA

Le personnel de l'installation est composé :

- Un ingénieur, chef d'usine;
- Neuf techniciens d'entretien, répartis en trois équipes.

Employer	Salaire mensuel	Totaux annuels
Chef d'usine	1 000 000 FCFA	12 000 000 FCFA
Technicien	300 000 FCFA	32 400 000 FCFA

Le prix du litre de diesel est de 615 FCFA, à la date de l'étude.