



**INSTITUT INTERNATIONAL D'INGENIERIE DE L'EAU
ET DE L'ENVIRONNEMENT**

ECOLE DOCTORALE SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'EAU, DE L'ENERGIE ET DE
L'ENVIRONNEMENT

THESE

Pour obtenir le grade de
DOCTEUR DE L'INSTITUT 2iE

Spécialité : **ENERGIE**

Présentée et soutenue publiquement

Par Fernand ZOMA

Le 13 février 2025

Réf :2iE/2025-06

**OPTIMISATION DES FILIERES VALORISANT LA BIOMASSE
LIGNOCELLULOSIQUE A DES FINS ENERGETIQUES EN
CONSIDERANT DIFFERENTES SOURCES AU BURKINA FASO**

JURY

M. Lat Grand N'DIAYE	Professeur titulaire	Université Assane-Seck de Ziguinchor, Sénégal	Président
M. Kouassi Hilaire EDI	Maître de Conférences (CAMES)	Université Nangui Abrogoua, Côte d'Ivoire	Rapporteur
M. Frédéric BATIONO	Maître de Recherche (CAMES)	IRSAT/CNRST, Burkina Faso	Rapporteur
M. Salifou OUIMINGA	Professeur titulaire	Université Joseph Ki- Zerbo, Burkina Faso	Examineur
M. Zeid HAJEJ	Maître de Conférences- HDR	Université de Lorraine, France	Examineur
Mme Marie SAWADOGO	Maître de Conférences (CAMES)	Institut 2iE, Burkina Faso	Directeur de thèse

Laboratoire Energies Renouvelables et Efficacité Energétique (LabEREE/2iE)

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à l'Institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement (2iE), mon institut d'accueil, pour le cadre exceptionnel qu'il m'a offert tout au long de la réalisation de cette thèse. Je remercie également la Banque mondiale, qui, dans le cadre du programme CoE, a financé ces travaux. Ce projet n'aurait pas pu aboutir sans la précieuse contribution de nombreuses personnes dont la disponibilité et le soutien indéfectible m'ont accompagné tout au long de ce parcours. Je tiens à adresser mes sincères remerciements, en particulier :

A ma directrice de thèse, Madame Marie TIEMTORE/SAWADOGO, Maître de Conférences à l'Institut 2iE et Responsable du Laboratoire Énergies Renouvelables et Efficacité Énergétique (LabEREE). Son encadrement rigoureux, sa bienveillance et son exigence scientifique ont été des atouts essentiels dans la réalisation de ce travail. Grâce à ses conseils avisés, sa disponibilité et son soutien constant, j'ai pu progresser avec confiance et surmonter les défis de la recherche. Son accompagnement a été une véritable source d'inspiration et de motivation, et je lui exprime mes sincères remerciements pour son engagement et sa générosité intellectuelle.

Aux membres de mon jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en évaluant mon travail de recherche. Je remercie tout particulièrement le Professeur Lat Grand N'DIAYE, Président du jury, pour avoir accepté de présider cette soutenance. Ma reconnaissance s'étend à Docteur Kouassi Hilaire EDI et Docteur Frédéric BATIONO, rapporteurs, pour le temps consacré à l'analyse de mon manuscrit et la pertinence de leurs observations. J'adresse également mes sincères remerciements au Professeur Salifou OUMINGA et à Docteur Zeid HAJEJ, examinateurs, pour leurs précieuses remarques qui enrichiront ont permis d'améliorer ce travail.

Aux membres de mon comité de thèse, notamment les Docteurs Didier ANCIAUX, Daouda KAMISSOKO et Sayon dit Sadio SIDIBÉ, dont l'encadrement attentif et les conseils éclairés ont grandement contribué à rehausser la qualité scientifique de ce travail.

A tout le personnel du LabEREE, mon laboratoire d'accueil, pour leur soutien, leur collaboration et l'excellent cadre de travail qui ont grandement contribué à l'aboutissement de ce projet. Leur disponibilité et leur esprit d'équipe ont été d'une aide précieuse tout au long de mon parcours.

A l'ensemble du personnel de l'École Doctorale 2iE, et tout particulièrement à Mesdames Karoll, Flavy et Nadège, pour leur soutien inestimable et leur disponibilité dans

l'accompagnement de toutes les démarches administratives liées à mon parcours doctoral. Leur aide précieuse a grandement facilité mon travail, et je leur en suis profondément reconnaissant.

Aux personnels des diverses structures et unités agro-industrielles de la ville de Bobo-Dioulasso, ainsi que les organisations interprofessionnelles des filières (APROMAB, PETRAMAB et ANTA-BF), pour leur accueil chaleureux et leur précieuse collaboration lors de mes visites de terrain et de la collecte des données.

A Madame Linda Dominique Fabiola BAMBARA, pour sa grande disponibilité, ses précieux conseils et son apport inestimable durant la phase de modélisation, ainsi qu'à Madame Fanta BARRY, chargée de recherche à l'INERA, pour le partage de son expérience et ses conseils avisés lors de la collecte des données.

A Monsieur Damien TIENDREBEOGO, Directeur provincial des enseignements post-primaires et secondaires du Séno, pour son aide précieuse dans les procédures administratives liées à l'obtention de ma disponibilité, ainsi que pour son soutien indéfectible durant les premiers moments de cette aventure.

A mes collègues doctorants du LabEREE, notamment Yasmina, Badza, Hector, Adéline, Rock, Ahmed, Bassalia, Sabba, Mahamadou, Sara, Fulgence, Ladj, Alida, Stéphanie, Mame, Aminata, Lionel, Jean, Amado, Faith, Francisco, George, Sylvain, Anselme, Rojo, Fabrice, Mitterrand et ceux des laboratoires LEMHaD et LEHSA, pour tous les moments partagés.

A la famille ILBOUDOU — Jean, Justine, Adèle, Amandine, Pacôme, Vital, Parfait et Richard — pour tout l'amour et le soutien inconditionnels qu'ils m'ont apportés.

A ma famille biologique, pour ses innombrables sacrifices, sa patience et son soutien constant depuis mes premiers jours.

A ma voisine Denise Benjamine KABORE, pour sa bienveillance et ses délicieux plats de têt, qui ont été pour moi un véritable réconfort.

Enfin, à toutes les personnes, qui, de près ou de loin, m'ont soutenu de quelque manière que ce soit dans ce travail et dans ma vie, et dont je n'ai pas pu mentionner les noms ici.

Résumé

Le Burkina Faso fait face à des défis énergétiques majeurs, avec près de 87 % de sa population n'ayant pas accès aux combustibles modernes pour la cuisson et un taux d'électrification qui ne s'élevait qu'à 26,29 % en 2023. Ainsi, la bioénergie apparaît comme une solution prometteuse pour un approvisionnement durable en énergie.

Cette thèse s'inscrit dans une perspective de proposer un cadre d'aide à la décision intégrant les dimensions économiques, environnementales et sociales afin de guider les acteurs dans l'évaluation des schémas logistiques et le choix d'options de valorisation plus viables. La méthodologie suivie repose d'abord sur une collecte de données par une veille bibliographique et des entretiens de terrain pour évaluer le potentiel de biomasses agricoles et agro-industrielles disponibles pour une valorisation énergétique. Ensuite, une sélection rigoureuse des biomasses a été réalisée sur la base de six critères définis qui sont la disponibilité et l'accessibilité de la biomasse, les utilisations concurrentielles, le potentiel de pollution, l'impact économique, le contenu énergétique de la biomasse et la disponibilité des technologies appropriées. Les analyses ont révélé que parmi les différentes biomasses agricoles et agro-industrielles étudiées, seules les tiges de cotonnier, la balle de riz, les coques d'anacarde, et les résidus de mangue (noyaux et épiluchures) sont les plus prometteuses pour une valorisation énergétique. Le potentiel global de ces résidus est d'environ 1 115 375,24 tonnes, dont 92,2% de tiges de cotonnier. Ce potentiel permettrait de satisfaire 1,82 fois le besoin énergétique moyen du pays évalué entre 2018 et 2022 à environ 5 265,3 GWh. Enfin, un modèle d'optimisation multi-objectifs a été développé pour optimiser les chaînes d'approvisionnement des filières biomasses, avec un cas d'étude appliqué à la région des Hauts-Bassins. Les résultats ont montré que dans les filières nécessitant un prétraitement de la biomasse, ce dernier constitue un facteur clé, pouvant représenter jusqu'à 60 % du coût total d'exploitation. Par conséquent, la viabilité de ces filières dépend largement de la maîtrise des coûts liés au prétraitement, en particulier ceux associés à la consommation énergétique des technologies utilisées. De plus, le coût de la biomasse elle-même, qui peut atteindre 55 % des dépenses totales dans certaines filières, et les frais de conversion, souvent élevés en raison des technologies employées, jouent un rôle déterminant dans la rentabilité globale.

Mots clés : biomasse agricole et agro-industrielle, filière, chaîne d'approvisionnement, optimisation, résidus.

Abstract

Burkina Faso faces significant energy challenges, with approximately 87% of the population lacking access to modern cooking fuels and an electrification rate of only 26.29% in 2023. Consequently, bioenergy is emerging as a promising solution for sustainable energy supply.

This thesis proposes a decision support framework that integrates economic, environmental, and social dimensions to guide stakeholders in evaluating logistic models and selecting more viable valorization options. The methodology includes data collection through a literature review and field interviews to assess the potential of agricultural and agro-industrial biomass for energy valorization. A rigorous selection process was conducted based on six criteria: biomass availability and accessibility, competing uses, pollution potential, economic impact, energy content, and availability of appropriate technologies.

The analyses showed that among the different agricultural and agro-industrial biomasses studied, cotton stalks, rice husks, cashew shells and mango residues (seeds and peels) are the most promising for energy valorization. The total potential of these residues is approximately 1,115,375.24 tons, with cotton stalks accounting for 92.2%. This potential could cover 1.82 times the average energy demand of the country, estimated at 5,265.3 GWh between 2018 and 2022. Finally, a multi-objective optimization model was developed to streamline biomass supply chains and applied to a case study in the Hauts-Bassins region.

The results showed that biomass pretreatment is a critical factor in biomass-based supply chains, representing up to 60% of the total operating costs. Thus, the viability of these chains largely depends on the control of pretreatment costs, especially those related to the energy consumption of pretreatment technologies. In addition, biomass costs, which can represent up to 55% of total expenditures in certain chains, and conversion costs, which are often high due to the technologies used, play a critical role in determining overall profitability.

Keywords: agricultural and agro-industrial biomass, sector, supply chain, optimization, residues.

Table des matières

Remerciements	i
Résumé	iii
Abstract	iv
Liste des figures	x
Liste des tableaux	xii
Abréviations	xiv
Introduction Générale.....	1
Chapitre 1 : Généralités sur la biomasse et les chaînes d’approvisionnement de la biomasse	10
A. Généralités sur la biomasse	10
I. Définition et classification de la biomasse	10
II. La biomasse lignocellulosique	12
III. Valorisation énergétique de la biomasse lignocellulosique	14
III.1. Combustion de la biomasse.....	15
III.1.1. Description du processus.....	15
III.1.2. Les technologies de la combustion de la biomasse	17
III.1.3. Défis et perspectives de la combustion de la biomasse.....	19
III.2. Gazéification de la biomasse.....	20
III.2.1. Description	20
III.2.2. Technologies de gazéification	22
III.2.3. Défis et perspectives de la gazéification	24
III.3. Pyrolyse.....	25
III.3.1. Description	25
III.3.2. Défis et perspectives de la pyrolyse	26
III.4. Méthanisation de la biomasse	27
III.4.1. Description	27
III.4.2. Types de digesteurs	29

III.4.3. Défis et perspectives des technologies de méthanisation.....	30
B. Etat des lieux sur les chaînes d’approvisionnement de la biomasse	31
I. Chaînes d’approvisionnement de la biomasse	32
I.1. Structure et caractéristiques.....	32
I.2. Analyse de la chaîne d’approvisionnement de la biomasse.....	33
II. Défis actuels des chaînes d’approvisionnement de la biomasse	35
III. Niveaux de décision dans les chaînes d’approvisionnement de la biomasse	36
III.1. Niveau de décision « stratégique ».....	36
III.2. Niveau de décision tactique.....	37
III.3. Niveau de décision opérationnel	38
IV. Approches de modélisation des chaînes d’approvisionnement de la biomasse	39
IV.1. Méthodes d’évaluation des performances.....	39
IV.2. Méthodes d’optimisation.....	40
V. Méthodes de résolution des modèles d’optimisation	43
VI. Positionnement, hypothèses et questions de recherche	45
Conclusion.....	46
Chapitre 2 : Analyse des filières bioénergies au Burkina Faso.....	47
I. Contexte de la bioénergie au Burkina Faso.....	47
II. Analyse des principales filières.....	49
II.1. Filière bois-énergie	50
II.2. Filière biomasse agricole pour la production de l’énergie	52
II.3. Filière d’exploitation des résidus agro-industriels pour la production d’énergie.....	54
III. Technologies de conversion de la biomasse au Burkina Faso	56
III.1. La Combustion directe et la cogénération.....	56
III.2. Foyer à balle de riz	58
III.3. Le pyrolyseur H2CP (High calorific cashew pyrolyser).....	59
III.4. Les Carbonisateurs	60

III.4. Les briqueteuses	61
III.5. La gazéification	62
III.6. Les biodigesteurs.....	63
III.7. Les Foyers améliorés.....	64
IV. Analyse financière des filières bioénergies au Burkina Faso.....	66
IV.1. Filière bois-énergie	66
IV.2. Filières de valorisation énergétique des résidus agricoles et agroindustriels.....	67
V. Défis et perspectives de développement des filières bioénergies.....	68
Conclusion.....	68
Chapitre 3 : Evaluation de la disponibilité de la biomasse pour la production d'énergie au Burkina Faso	
I. Approche pour l'évaluation du potentiel de biomasse agricole et agroindustrielle au Burkina Faso	70
I.1. Potentiel théorique des résidus.....	72
I.2. Potentiel disponible ou mobilisable.....	76
I.3. Potentiel énergétique.....	78
II. Analyse de la disponibilité de la biomasse en fonction de la répartition géographique ..	78
II.1. Résultats sur le potentiel théorique des résidus	78
II.2. Résultats sur le potentiel disponible des résidus	83
II.3. Résultats sur le potentiel énergétique des résidus	85
III. Sélection de biomasse adaptée pour la production d'énergie	86
III.1. Critères et méthodes de sélection de la biomasse	86
III.2. Collecte des données	88
III.3. Méthode AHP-TOPSIS	90
III.4. Etude de sensibilité.....	92
IV. Résultats de la sélection de la biomasse.....	93
IV.1. Pondération des critères	93
IV.2. Résultats sur le choix de la biomasse.....	95

IV.3. Résultats de l'analyse de sensibilité.....	96
Conclusion.....	98
Chapitre 4 : Modélisation mathématique des chaînes d'approvisionnement en biomasse pour la production des bioénergies	100
I. Description du problème	100
I.1. Critères d'optimisation.....	103
I.2. Hypothèses et limites du problème	104
I.3. Système modélisé, attributs et complexité du modèle	105
II. Formulation mathématique	108
II.1. Les ensembles.....	108
II.2. Les Paramètres.....	109
II.3. Les variables du modèle	111
II.4. Les fonctions objectifs.....	113
II.4.1. Fonction objectif économique	113
II.4.2. Fonction objectif environnemental	115
II.4.3. Fonction objectif sociale.....	116
II.5. Les contraintes du modèle	117
III. Approche de résolution	120
Conclusion.....	122
Chapitre 5 : Implémentation du modèle d'optimisation.....	123
I. Description du cas d'étude	123
I.1. Disponibilité et collecte de la biomasse.....	125
I.2. Transport de la biomasse	131
I.3. Prétraitement de la biomasse.....	132
I.4. Conversion de la biomasse.....	133
II. Fixation des poids des objectifs	136
III. Analyse de sensibilité.....	137

IV.	Résultats et discussions	138
IV.1.	Structures des chaines d’approvisionnement optimales des différentes filières	138
IV.2.	Performances des chaines d’approvisionnement en biomasse pour la production d’électricité.....	144
IV.2.1	Performances économiques.....	144
IV.2.2.	Performances environnementales et sociales	148
IV.3.	Performances des chaines d’approvisionnement pour la production de la chaleur ..	149
IV.3.1.	Performances économiques.....	149
IV.3.2.	Performances environnementales et sociales	152
IV.4.	Résultats de l’analyse de la sensibilité	154
IV.4.1.	Analyse de sensibilité liée à la variation du coût unitaire de la biomasse	154
IV.4.2.	Analyse de sensibilité liée à la variation du coût du prétraitement.....	156
	Conclusion.....	159
	Synthèse et recommandations	161
I.	Synthèse des résultats.....	161
II.	Recommandations	162
	Conclusion générale	166
	Bibliographie.....	170
	Annexes.....	193
	Annexe 1 : Questionnaire adressé aux parties prenantes pour l’évaluation des critères pour la sélection des résidus à des fins énergétiques au Burkina Faso.....	194
	Annexe 2 : technologies de prétraitement	200
	Annexe 3 : Processus de production des biomasses dans les unités agroindustrielles.....	201
	Annexe 4 : Distances entre les différents sites	203
	Annexe 5 : Les différentes chaines d’approvisionnes	206

Liste des figures

Figure 1 : Approche méthodologique générale de l'étude.....	6
Figure 2 : Approche de l'analyse filière	7
Figure 3 : Approches de valorisation de la biomasse lignocellulosique (adapté de [48]).....	15
Figure 4: Foyer à grille [26]	18
Figure 5 : Principales étapes de la gazéification [57].....	21
Figure 6 : Technologies de gazogènes à contre-courant et à co-courant [61].....	23
Figure 7 : Technologies de gazogènes à lit fluidisé	24
Figure 8: Structure classique de la chaîne d'approvisionnement en biomasse avec les principaux acteurs et activités	32
Figure 9 : Méthodes de résolution des problèmes d'optimisation	44
Figure 10 : Structure de la filière bois-énergie au Burkina Faso [158].....	51
Figure 11 : Structure de la filière résidus agricole pour la production d'énergie.....	53
Figure 12 : Organisation de la filière biomasse agro-industrielle-énergie	55
Figure 13 : a) Chaudière industrielle importée et b) chaudière de fabrication locale développée par Nitidae	56
Figure 14 : Schéma de principe de la production d'électricité par combustion [161]	57
Figure 15: Foyer à balle de riz	58
Figure 16 : Pyrolyseur H2CP couplé à une chaudière.....	59
Figure 17 : Carbonisateur [162]	60
Figure 18 : a) Presse manuelle et b) Presse motorisée	61
Figure 19 : Quelques gazogènes utilisés : a) gazogène à Bama ; b) gazogène au LabEREE et c) gazogène à Po.....	63
Figure 20: Etapes pour la détermination du potentiel énergétique des résidus agricoles et agro-industriels	72
Figure 21 : Hiérarchisation des usages de la biomasse (adaptée de [191]).....	76
Figure 22: Potentiel théorique des résidus agricoles dans les 13 régions du Burkina Faso.....	79
Figure 23: Proportions des résidus par région.....	80
Figure 24: Part de chaque région dans le potentiel national.....	81
Figure 25: Potentiel théorique des résidus agro-industriels par région	82
Figure 26: Potentiel disponible ou mobilisable des résidus agricoles et agroindustriel par région	84
Figure 27: Etapes de l'application de la méthode AHP-TOPSIS (adaptée de [218])	90
Figure 28: Principales étapes de la méthode TOPSIS.....	92

Figure 29 : Ordre de priorité des critères	94
Figure 30 : Les différents circuits de valorisation des résidus agroindustriels	102
Figure 31 : Superstructure de la chaîne d’approvisionnement.....	106
Figure 32 : Localisation de la région des Hauts-Bassins	124
Figure 33 : Organisation des producteurs de la filière coton au Burkina Faso	126
Figure 34 : Organisation du circuit d’exploitation des tiges de cotonnier	127
Figure 35 : Configuration de la chaîne d’approvisionnement de la filière des résidus de mangue (noyaux et épluchures)	128
Figure 36 : Configuration de la chaîne d’approvisionnement de la filière des coques d’anacarde	128
Figure 37 : Configuration de la chaîne d’approvisionnement de la filière balle de riz.....	129
Figure 38 : Répartition des sites de production des biomasses dans la zone d’étude	129
Figure 40 : Répartition des coûts d’approvisionnement des différentes biomasses saisonnières (Electricité).....	144
Figure 39 : Répartition des coûts d’approvisionnement des différentes biomasses annuelles (Electricité).....	144
Figure 41 : Comparaison du prix de revient du kWh de l’électricité produite à partir des biomasses au prix moyen du kWh vendu par la SONABEL (Electricité)	147
Figure 43 : Répartition des coûts d’approvisionnement des différentes biomasses saisonnières (Chaleur).....	150
Figure 42 : Répartition des coûts d’approvisionnement des différentes biomasses annuelles (Chaleur).....	150
Figure 44 : Coûts de revient du kWh thermique produit pour les différentes biomasses (Chaleur)	151
Figure 45 : Impact de la variation du coût de la biomasse sur le coût de revient du kWh produit (Electricité).....	154
Figure 46 : Impact de la variation du coût de la biomasse sur le coût de revient du kWh thermique produit (Chaleur).....	155
Figure 47 : Impact de la variation du coût du prétraitement sur le coût de revient du kWh produit (Electricité).....	157
Figure 48 : Impact de la variation du coût du prétraitement sur le coût de revient du kWh produit (Chaleur)	158

Liste des tableaux

Tableau 1 : Composition de quelques biomasses lignocellulosiques.....	13
Tableau 2 : PCI du gaz de synthèse en fonction de l'agent oxydant utilisé.....	22
Tableau 3 : Principaux paramètres opératoires des procédés de pyrolyse [68], [70], [71]	26
Tableau 4 : Caractéristiques des foyers améliorés (adapté de [166]).....	65
Tableau 5 : Principales cultures et sous-produits au Burkina Faso.....	71
Tableau 6 : Ratio Résidus-Produits (RPR) de quelques cultures [153], [154], [170], [173], [174], [181]	73
Tableau 7 : Production agricole moyenne nationale des cultures étudiées en tonne sur la période de 2018 à 2022	74
Tableau 8: RPR de quelques produits évalués[177], [181], [185]	74
Tableau 9: Ratios pour la transformation de la mangue fraîche en mangue séchée et purée [186]	75
Tableau 10 : Quantités moyennes des produits transformés entre 2018 – 2022 par région en tonne [184], [188], [189].....	75
Tableau 11 : Proportions d'usage des résidus agricoles et agroindustriels au Burkina Faso [159], [180]	77
Tableau 12 : PCI des résidus étudiés.....	78
Tableau 13: Potentiel énergétique moyen des résidus disponibles au Burkina Faso entre 2018 et 2022 en tonne équivalent pétrole (tep).	85
Tableau 14: Critères de sélection de la biomasse retenus pour l'évaluation	88
Tableau 15: Echelle fondamentale de comparaison par paires de Saaty [219]	89
Tableau 16 : Indices RI pour calculer le ratio de cohérence [229].....	91
Tableau 17 : Matrice de jugement des experts	93
Tableau 18: Paramètres de détermination de la consistance de la matrice	93
Tableau 19 : Données des différentes alternatives (biomasses).....	95
Tableau 20 : Classement des biomasses.....	95
Tableau 21 : Résultats de l'analyse de sensibilité des différents scénarios suivant les deux séries	97
Tableau 22 : Nomenclature des ensembles	109
Tableau 23 : Nomenclature des paramètres du modèle.....	109
Tableau 24 : Variables du modèle.....	112
Tableau 25 : Capacités des sites de production des résidus agro-industrielles.	130
Tableau 26 : Densités des résidus étudiés	131

Tableau 27 : Caractéristiques des moyens de transport utilisés.....	132
Tableau 28 : Caractéristiques des différentes technologies de prétraitement [269].....	133
Tableau 29 : Besoins en matières premières des technologies.....	134
Tableau 30 : Technologies de conversion étudiées.....	135
Tableau 31 : Paramètres d'entrée des technologies considérées.....	135
Tableau 32 : Poids des fonctions objectifs.....	137
Tableau 33 : Caractéristiques des chaînes d'approvisionnement optimales des différentes filières de biomasse.....	141
Tableau 34 : Répartition des émissions de GES de l'approvisionnement des différentes biomasses pour la production de l'électricité en kgeqCO ₂ /tonne de biomasse exploitée.....	148
Tableau 35 : Emplois créés par l'approvisionnement des différentes biomasses pour la production d'électricité.....	149
Tableau 36 : Répartition des émissions de GES de chaîne d'approvisionnement des différentes filières pour la production de la chaleur en kgeqCO ₂ /tonne.....	152
Tableau 37 : Emplois créés par l'approvisionnement des différentes biomasses pour la production de la chaleur.....	153

Abréviations

AHP	:	Processus d'Analyse Hiérarchique ou Analytic Hierarchy Process
ANTA-BF	:	Association Nationale des Transformateurs d'Anacarde du Burkina
APROMAB	:	Association interprofessionnelle mangue au Burkina Faso
CNSL	:	Cashew nutshell liquid
DDO	:	Distillate Diesel Oil
ELECTRE	:	Elicitation Et Choix Traduisant la REalité
FAO	:	Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture
GES	:	Gaz à Effet de Serre
GPC	:	Groupements des Producteurs de Coton
H2CP	:	High calorific cashew pyrolyzer
INSD	:	Institut National de la Statistique et de la Démographie
MCDM	:	Méthodes de prise de décision multicritères
ONEA	:	Office National de l'Eau et de l'Assainissement
ONG	:	Organisation non gouvernementale
PCI	:	Pouvoir calorifique inférieur
PIB	:	Produit intérieur brut
PNB-BF	:	Programme National de Bio digesteur
PRG	:	Potentiel de Réchauffement Global
PROMETHEE	:	Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations
PTRAMAB	:	Professionnelle de la Transformation de la Mangue au Burkina
RPR	:	Ratio résidu/produit
SONABEL	:	Société Nationale d'Electricité du Burkina Faso
TOPSIS	:	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
UEMOA	:	Union Economique et Monétaire Ouest Africaine

Introduction Générale

Cette section décrit le contexte énergétique, socio-économique et environnemental du Burkina Faso. Il présente ainsi la problématique de l'accès à l'électricité, le rôle prépondérant de la biomasse dans l'approvisionnement de l'énergie dans le pays, la situation des bioénergies sur le plan national et les principaux défis y afférant. Les objectifs de la thèse sont ensuite exposés ainsi que la démarche méthodologique de recherche mise en œuvre pour l'atteinte de ces objectifs. Le chapitre prend fin par la description de l'organisation du manuscrit.

Contexte énergétique

L'accès à l'énergie est d'une importance capitale dans le développement, tandis que sa consommation reflète le niveau de bien-être d'une communauté [1]. Cependant, de nombreux pays d'Afrique de l'Ouest, dont le Burkina Faso, sont confrontés à des défis énergétiques majeurs. Le déficit énergétique ou l'insuffisance de l'offre pour répondre aux besoins de la population ont des conséquences sévères, telles que la précarité sociale et économique, le sous-développement et le chômage.

Au Burkina Faso, l'un des pays enclavés de la région, les défis énergétiques sont particulièrement significatifs. Avec un taux d'accès à l'électricité de 19% en 2021, il a l'un des plus faibles d'Afrique de l'Ouest [2]. La consommation annuelle d'électricité par habitant de 116 kWh est bien inférieure à la moyenne dans la zone UEMOA de 175 kWh [3]. L'approvisionnement en électricité repose principalement sur des centrales thermiques, qui représentent 82,4% de la production nationale, et sur des importations en provenance de la Côte d'Ivoire, du Ghana et du Togo, qui couvrent près de 59,6% de la consommation nationale [4]. Malgré un potentiel en énergies renouvelables estimé à environ 60% pour le solaire, 10% pour la biomasse et 30% pour l'hydroélectricité [5], ces ressources restent sous-exploitées. La part de ces ressources reste faible dans la production nationale avec 11% pour l'hydroélectricité et 6% pour l'énergie photovoltaïque [6]. L'intégration de la biomasse dans cette production quant à elle reste encore très marginale [3].

Cette situation n'est pas propre au Burkina Faso. De nombreux pays ouest-africains partagent les mêmes réalités : forte dépendance aux énergies fossiles importées, infrastructures énergétiques insuffisantes, et difficulté à répondre à une demande croissante d'environ 10 à 15 % par an. Le coût élevé de l'électricité y entrave le développement industriel, affecte la compétitivité économique et limite l'accès des ménages aux services de base.

En dépit des nombreux efforts consentis dans le secteur, l'offre électrique au Burkina Faso reste insuffisante face à une demande qui augmente en moyenne de 13% par an depuis 2012 [7]. En 2022, le taux d'électrification national était estimé à 25,24% dont 86,96% en milieu urbain et 5,49% en zone rurale [4], [8]. Cette faiblesse de l'accès à l'électricité entraîne une forte dépendance de la population envers la biomasse traditionnelle (bois de chauffe, charbon de bois et résidus agricoles), qui couvre plus de 80% des besoins énergétiques nationaux [9]. Cette surexploitation exerce une pression sur les écosystèmes, compromet la durabilité environnementale, et limite l'accès à des solutions énergétiques modernes.

Ainsi, l'insuffisance de l'offre d'électricité, combinée à une forte dépendance à la biomasse traditionnelle, souligne l'urgence de développer des solutions énergétiques alternatives adaptées au contexte du Burkina Faso. Cependant, le secteur de la bioénergie est confronté à un certain nombre de défis structurels et organisationnels. L'absence d'une politique claire pour attirer les investissements et d'un cadre juridique solide crée un environnement peu favorable aux initiatives privées. En outre, la promotion de la bioénergie par l'Etat reste insuffisante, avec un manque de subventions ou d'incitations pour encourager son développement. Cette situation limite l'essor des filières de bioénergie locales. Les chaînes de production, quant à elles, souffrent d'une organisation inadaptée, aggravée par des infrastructures de transport et de logistique insuffisantes pour l'acheminement efficace de la biomasse. De plus, le manque de main d'œuvre qualifiée et la faible maîtrise des technologies modernes de conversion de la biomasse entravent la mise en œuvre de projets viables. Les investissements dans la recherche, essentiels pour adapter les solutions de bioénergie aux réalités locales, restent également insuffisants. Enfin, la non-implication des acteurs locaux dans la planification et la mise en œuvre des projets, l'accès limité aux financements et le coût élevé des technologies d'énergie renouvelable s'ajoutent aux obstacles majeurs auxquels est confronté le secteur de la bioénergie au Burkina Faso.

Pour surmonter ces défis, le Burkina Faso a mis en place des stratégies de développement visant à structurer son secteur énergétique autour de la durabilité et de l'accessibilité, avec un accent particulier sur la bioénergie et les énergies domestiques modernes. Ces politiques énergétiques se concentrent sur l'amélioration de l'accès aux énergies modernes, la réduction de la dépendance aux hydrocarbures et la promotion des énergies renouvelables pour un développement durable [10]. La Stratégie de Croissance Accélérée et de Développement Durable (SCADD) et le Livre Blanc National « Burkina 2025 » fixent des objectifs pour améliorer l'accès à l'électricité, notamment dans les services publics essentiels et les zones rurales. Le Burkina Faso met l'accent sur les énergies domestiques, telles que le bois, le gaz et

les énergies renouvelables (biogaz, solaire), tout en encourageant la gestion durable des ressources forestières pour limiter la pression sur les écosystèmes.

Dans la politique nationale de développement durable du pays [11], l'accent est également mis sur la réduction des déchets et de la consommation énergétique industrielle. Pour atteindre ces objectifs, le Burkina Faso a adhéré au projet du Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) sur les Modes de Consommation et de Production Durables (MCPD). Il a pour but est de promouvoir l'utilisation efficace des ressources dans les petites et moyennes entreprises (PME) et à améliorer la gestion des déchets solides [12]. Parallèlement, la stratégie nationale dans le domaine de l'énergie accorde une place de choix dans l'utilisation des ressources endogènes telles que les énergies renouvelables dans l'offre énergétique du pays [13]. Pour ce faire, l'Etat s'est ainsi tourné vers l'énergie solaire et la biomasse, en adoptant le modèle de Partenariat Public-Privé (PPP) [7]. Des objectifs ambitieux en matière d'accès à l'électricité ont alors été établis entre 2016 et 2020. Ils comprenaient un taux de couverture électrique national de 80%, un taux d'électrification national de 45%, un taux d'électrification urbaine de 75%, et un taux d'électrification rurale de 19% [7]. Mais, au regard des données actuelles, il apparaît clairement que la plupart des objectifs fixés n'ont pas été atteints. Fort de ce constat, il devient primordial de développer des approches novatrices permettant de relever les défis du secteur afin qu'il devienne un véritable levier pour soutenir la compétitivité et favoriser la croissance économique.

L'émergence de technologies de conversion de biomasse telles que la gazéification, la pyrolyse, la combustion et la méthanisation offre ainsi des opportunités prometteuses pour diversifier les sources d'énergie et améliorer l'accès à l'énergie. Cependant, l'adoption à grande échelle de ces technologies passe d'abord par la maîtrise de certains obstacles tels que le manque d'adéquation entre la disponibilité de la ressource et les voies de valorisation proposées, les schémas logistiques mal définis, et les coûts importants d'investissement [14].

Contexte Socio-économique et Environnemental du Burkina Faso

Le Burkina Faso est situé entre 9°20' et 15°05' de latitude Nord, 5°20' de longitude Ouest et 2°03' de longitude Est avec une superficie de 274 000 km². La population du Burkina Faso est caractérisée par une forte croissance ; de 1996 à 2006, le taux de croissance démographique annuel a atteint 3,1% [15]. En l'espace de 30 ans, la population a doublé, passant de moins de 8 millions d'habitants en 1985 à 14 millions en 2006, puis dépassant les 20 millions en 2019 [16]. La majorité de la population se trouve en milieu rural (73,7%) et vit essentiellement de l'agriculture, de l'élevage, des ressources forestières et halieutiques [17]. Le taux de natalité est

élevé et il vaut 39,4 pour mille en 2019 selon les résultats du Cinquième Recensement Général de la Population et de l'Habitation du Burkina Faso (5^e RGPH). Cette forte croissance démographique a pour corolaire la pression sur l'environnement et la surexploitation des ressources naturelles renouvelables. Ces pressions sont principalement liées aux activités économiques telles que la déforestation pour des fins agricoles ou pour l'approvisionnement en bois, l'utilisation non régulée de pesticides et d'autres intrants chimiques en agriculture, l'orpaillage, les migrations internes de la population, l'acquisition massive de terres, le braconnage, ainsi que les activités des industries de la construction et des travaux publics, etc. Entre 1992 à 2014, 47,5% des forêts au Burkina Faso ont subi des transformations dont 38,6% ont été converties en terres cultivées, 7,9% en prairies [18]. Le pays a ainsi perdu près de la moitié de ses forêts. Les contraintes et les menaces d'origine anthropique exercées sur l'environnement contribuent à l'érosion et à la détérioration du potentiel des écosystèmes et de la biodiversité.

Sur le plan socioéconomique, l'économie du pays est essentiellement tributaire de son secteur primaire qui occupe plus de 85% de la population active. Le taux moyen de croissance du produit intérieur brut (PIB) annuel enregistré entre 2016 et 2019 est de 6,2% [17]. En dépit des nombreux progrès réalisés, plus de 36,2% de la population vit toujours sous le seuil de pauvreté. Ce constat est d'autant plus préoccupant en milieu rural du fait de la faible rentabilité des activités économiques rurales autres que l'agriculture. Nonobstant les progrès économiques de ces dix dernières années, la situation socioéconomique du pays fait toujours face à de nombreux défis. A cela s'ajoute le problème d'accès à l'énergie. La situation énergétique fragile exerce des pressions significatives sur les populations, en particulier dans les zones rurales où l'accès à des sources d'énergie modernes est limité. Cette situation agit comme un frein au développement économique, limitant les opportunités d'éducation, de santé et d'activités génératrices de revenus.

Le développement industriel occupe une place centrale dans le processus de transformation structurelle de l'économie. À l'échelle mondiale, l'industrie est largement reconnue comme étant essentielle à la transformation des matières premières, à la création de la valeur ajoutée, à la génération d'emplois, à l'éradication de la pauvreté, ainsi qu'à la stimulation du progrès et de l'innovation technologique [19]. Selon le septième Recensement industriel et commercial (RICVII), les entreprises au Burkina Faso sont principalement orientées vers le secteur commercial. Cette branche d'activités regroupe plus de la moitié (52,6%) des entreprises recensées. Les secteurs des "services" et de la "fabrication, transformation et énergie" représentent respectivement 28,2% et 16,9%. Quant aux branches d'activités "Bâtiment et des

travaux publics" (1,9%), "Extraction et activités de soutien à l'extraction" (0,2%), et "Agriculture, élevage, sylviculture, pêche et chasse" représentent respectivement 1,9%, 0,2% et moins de 0,1% [16].

Les mines, l'agro-industrie et l'énergie (électricité) restent les principales activités industrielles du pays [20]. La contribution du secteur des industries, demeure globalement faible, s'élevant seulement à 20,1% du PIB en 2015. Cependant, le secteur présente d'énormes potentialités et offre de réelles opportunités pour la réalisation d'économies d'échelle et l'amélioration de la productivité.

Le secteur industriel est l'un des principaux consommateurs de services énergétiques au Burkina Faso. Dans la stratégie nationale d'industrialisation du Burkina Faso 2019-2023, il ressort des analyses que les dépenses les plus importantes dans les coûts de production des entreprises industrielles au Burkina Faso sont celles liées aux produits pétroliers et à l'électricité [19]. Ces coûts élevés sont liés à la position géographique du pays, rendant l'approvisionnement de certaines matières premières difficiles et coûteux, mais également du coût élevé de l'électricité. Ce qui rend le secteur moins compétitif, tant sur le plan national qu'international. Réduire ces coûts demeure un défi crucial pour l'industrialisation du Burkina Faso et la compétitivité de ses produits industriels. Cela passe d'abord par une gestion plus durable des ressources au niveau des industries. En effet, une grande partie des industries au Burkina Faso évolue dans les activités de l'agroalimentaire. De ce fait, elle génère des quantités importantes de déchets très caractéristiques. Ces déchets, actuellement peu valorisés, engendrent simultanément des pertes économiques et des risques pour le bien-être des populations ainsi que pour la durabilité des ressources. La valorisation efficace et optimisée de ces déchets pourrait catalyser le développement d'une économie circulaire, améliorant la compétitivité des produits et une durabilité environnementale.

Objectifs

Au regard du constat qui précède sur la problématique de valorisation de la biomasse au Burkina Faso, la présente thèse vise à contribuer à la résolution de ces défis en proposant une approche systémique et optimisée des filières bioénergétiques. En d'autres termes, elle a pour objectif principal d'optimiser l'organisation des filières bioénergies en tenant compte des ressources disponibles et des voies de valorisation possible.

De façon spécifique, il s'agit de :

- Evaluer le potentiel de biomasse valorisable pour les voies de valorisation réalisables dans le contexte de l'étude ;

- Identifier les voies de conversion adaptées à chaque type de biomasse en prenant en considération les aspects sociaux, environnementaux et économiques ;
- Proposer plusieurs modèles de filières viables dans le contexte du Burkina.

✚ Méthodologie de la recherche

L'atteinte des objectifs a été établie sur une méthodologie de recherche définie autour des différents objectifs spécifiques. Cette approche illustrée dans Figure 1 comporte cinq (05) étapes principales que sont l'analyse des filières, la collecte des données, le traitement des données, la modélisation et l'optimisation pour la conception d'un outil d'aide à la décision.

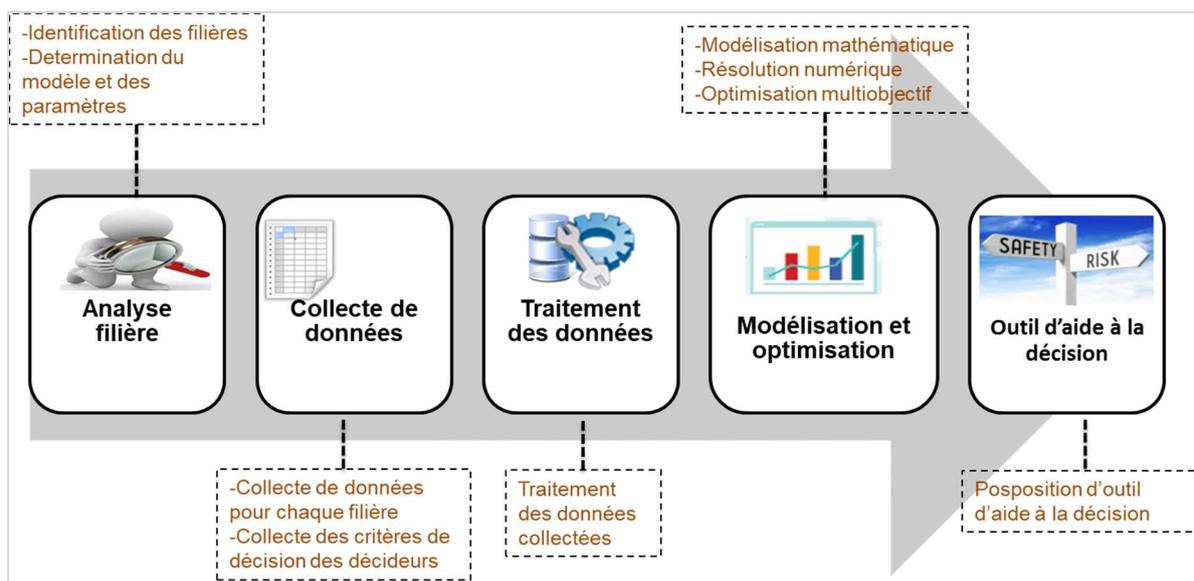


Figure 1: Approche méthodologique générale de l'étude

✓ L'analyse de filières

C'est l'analyse globale de l'ensemble des maillons, des parties prenantes et de leurs interactions tout au long d'une filière. Cette analyse suit une méthodologie dont les principales étapes sont résumées dans la Figure 2.

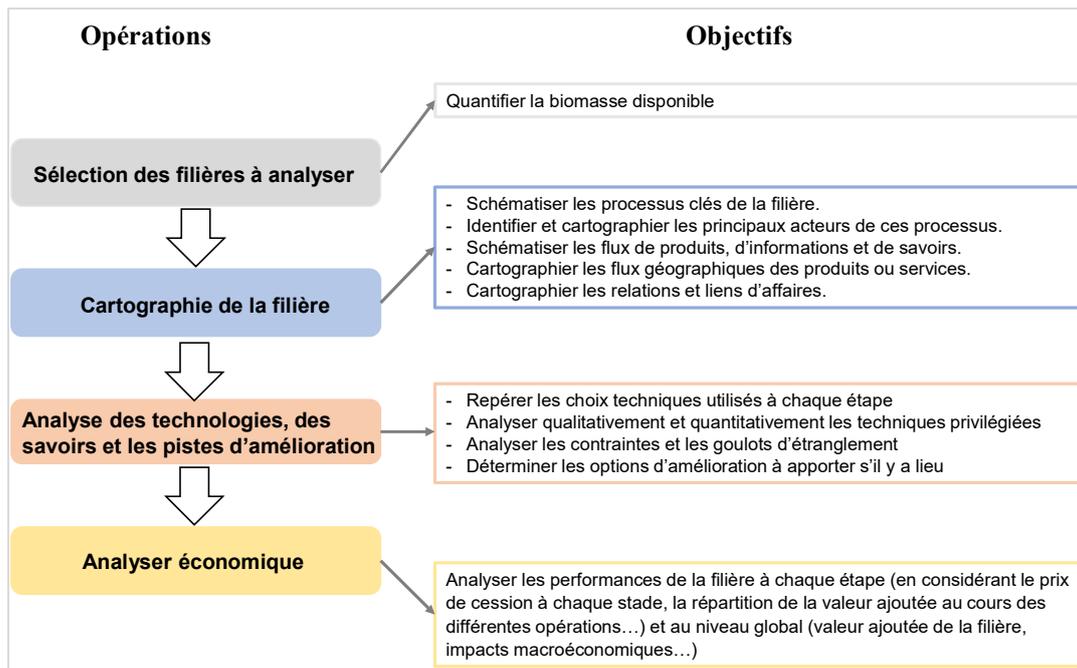


Figure 2: Approche de l'analyse filière

La première étape consiste à la sélection des filières à analyser. Le choix des différentes filières considérées dans cette étude est fait à partir des critères de sélection de biomasses durables pour la production de bioénergie issus d'une revue de la littérature et adaptée au contexte du Burkina Faso. A partir des critères retenus, les filières à haut potentiel ont été identifiées.

Une fois les filières déterminées, la seconde étape consiste à faire la cartographie de la filière. Elle vise à la détermination des différents maillons de la filière, les principaux acteurs et les interactions entre ces différents acteurs. L'objectif est de pouvoir faire une représentation schématique de chaque filière en vue de mieux cerner son organisation.

La troisième étape de l'analyse filière va consister à l'analyse des technologies et des savoirs afin de formuler des pistes d'amélioration. Un inventaire des technologies de valorisation de chaque biomasse est réalisé à cette étape. De même, une analyse qualitative et quantitative permet de déterminer les performances des technologies utilisées.

Enfin, l'analyse économique qui est la dernière étape de cette analyse des filières permet une étude des performances économiques au niveau de chaque maillon et de l'ensemble de la filière. Elle permettra de déterminer la valeur ajoutée au niveau de chaque étape du processus et sa répartition au niveau des acteurs.

Pour mieux appréhender la structuration des différentes filières sélectionnées, des visites de terrain ont été effectuées.

✓ La collecte et traitement des données

Les données à collecter sur chaque filière sont des données sur la production de la biomasse, les technologies de valorisation utilisées sur le terrain, leurs caractéristiques et les données sur la logistique d'approvisionnement (transport, conditionnement, stockage) de la biomasse. Le traitement de ces données permettra d'avoir des données fiables afin d'évaluer la disponibilité de la biomasse et alimenter le modèle d'optimisation qui sera développé.

✓ **La modélisation**

A travers une analyse bibliographique sur les modèles et les méthodes d'optimisation des chaînes logistiques de la biomasse faite en amont, le modèle d'optimisation et la méthode de résolution à utiliser sont déterminés. Dans cette étape de modélisation, il s'agira d'abord de définir le problème pour dégager les besoins liés à la modélisation. Ensuite, à partir du problème défini, déterminer les hypothèses simplificatrices, les paramètres, les variables, les fonctions objectifs et les contraintes. L'optimisation est faite suivant les critères économiques, environnementaux et sociaux. Le modèle obtenu est ensuite résolu à l'aide du solveur numérique GAMS (General Algebraic Modeling).

✓ **Aide à la décision**

Afin de déterminer la solution à retenir parmi les solutions de compromis, le décideur a besoin d'un outil qui lui permettra d'extraire une solution qu'il utilisera. Un outil d'aide à la décision permet au décideur de résoudre un problème de décision où plusieurs critères souvent contradictoires sont considérés. Dans cette étude, un cadre d'aide à la décision sera élaboré pour offrir aux décideurs des fondamentaux leur permettant de sélectionner les filières viables au Burkina Faso, en s'appuyant sur les solutions optimales issues du modèle d'optimisation.

Organisation du manuscrit

La rédaction du manuscrit s'articule autour de six (06) chapitres. Le premier chapitre, objet de la présente section intitulée "Introduction", décrit le contexte énergétique, socio-économique et environnemental du Burkina Faso. Il présente ensuite les objectifs de recherche fixés et l'organisation du manuscrit.

Le second chapitre est divisé en deux grandes parties. La première partie présente les concepts généraux et les généralités sur la biomasse. La deuxième partie dresse un état des lieux des chaînes d'approvisionnement de la biomasse. Cette section définit la chaîne logistique, en mettant en lumière les principaux maillons ainsi que les diverses activités et intervenants impliqués. Les défis actuels et les niveaux de décision au sein des chaînes d'approvisionnement

de la biomasse y sont exposés. Elle propose également un aperçu des approches de modélisation et des méthodes de résolution des problèmes logistiques de la biomasse. Enfin, le positionnement, les hypothèses et les questions de recherche qui orientent ces travaux sont définis.

Le troisième chapitre présente une analyse des filières bioénergies au Burkina Faso. Cette section décrit le contexte de la bioénergie au Burkina Faso, présente les ressources disponibles et les technologies de conversion de la biomasse en énergie. Elle propose également une analyse socio-économique et environnementale des différentes filières, ainsi que les défis et perspectives de développement.

Le quatrième chapitre traite de l'évaluation du potentiel et de la sélection de la biomasse pour la production d'énergie au Burkina Faso. À partir des données collectées sur le terrain et des recherches bibliographiques, les potentiels des biomasses agricoles et agro-industrielles disponibles au Burkina Faso sont évalués. Les résultats obtenus ont permis de construire un modèle d'analyse multicritères pour déterminer la biomasse la plus appropriée pour la valorisation énergétique dans le contexte du Burkina Faso.

Le cinquième chapitre porte sur la création d'un modèle d'optimisation pour configurer l'approvisionnement des systèmes de production de bioénergies. Le problème à modéliser, comprenant les hypothèses et les limites sous-tendant la construction du modèle, les critères d'évaluation des performances de la chaîne logistique, ainsi que les données et attributs du modèle, sont exposés et définis. Le modèle mathématique, englobant les diverses alternatives pour l'approvisionnement en biomasse, les paramètres et les variables, est formulé et modélisé en programme linéaire à variables mixtes. Enfin, l'approche de résolution adoptée est décrite.

Le sixième et dernier chapitre se concentre sur la résolution du problème d'optimisation en mettant en œuvre le modèle construit, à l'aide d'un cas d'étude basé sur l'approvisionnement en biomasses agricoles et agro-industrielles. Ce cas d'étude est résolu en tenant compte des différents critères d'optimisation (économique, environnemental et social). Les résultats obtenus sont analysés et interprétés pour démontrer l'efficacité du modèle dans l'identification des meilleures alternatives et configurations possibles de la chaîne d'approvisionnement en biomasse au Burkina Faso.

Chapitre 1 : Généralités sur la biomasse et les chaînes d'approvisionnement de la biomasse

La biomasse, comme ressource renouvelable, offre un potentiel considérable pour la production d'énergie durable et la réduction de la dépendance aux combustibles fossiles. Ce chapitre explore les généralités sur la biomasse et les chaînes d'approvisionnement associées, fournissant un cadre essentiel pour comprendre son rôle dans le contexte énergétique actuel. Nous commencerons par définir et classer la biomasse, en mettant un accent particulier sur la biomasse lignocellulosique, sujet de cette étude. Ensuite, nous examinerons les différentes voies de valorisation de la biomasse lignocellulosique, en décrivant chaque technologie, puis en évaluant leur état actuel, et en donnant un aperçu sur les défis et les perspectives associées. Enfin, nous ferons l'état des lieux des chaînes d'approvisionnement de la biomasse, en détaillant leur structure, les défis actuels, les niveaux de décision, ainsi que les approches de modélisation et de résolution. Ce chapitre se conclura par une présentation du positionnement de notre sujet de thèse dans ce domaine complexe et en pleine évolution.

A. Généralités sur la biomasse

I. Définition et classification de la biomasse

La biomasse peut être définie comme la fraction biodégradable des produits, déchets et résidus issus de l'agriculture, englobant les matières végétales et animales provenant de la terre, de la mer, de la sylviculture et des industries associées. Elle inclut également la fraction biodégradable des déchets industriels et ménagers [21]–[23].

L'énergie obtenue par conversion de la biomasse est considérée comme renouvelable, car elle repose sur ces matières organiques qui se renouvellent rapidement, contrairement aux combustibles fossiles qui mettent des millions d'années à se former. Cette exploitation suit un cycle de carbone accéléré, où le CO₂ libéré lors de la conversion est compensé par celui absorbé par les plantes pendant leur croissance, réduisant ainsi l'impact sur le climat. Enfin, la valorisation des déchets organiques pour produire de l'énergie contribue à limiter les quantités de déchets tout en favorisant une production durable.

La biomasse peut être classée suivant sa teneur en humidité, son type d'utilisation et de sa composition chimique [24].

Classification selon la teneur en humidité

Partant de la teneur en humidité de la biomasse, on distingue deux grandes familles de biomasses :

- ✓ La biomasse humide : elle regroupe l'ensemble des matériaux organiques contenant une grande portion d'humidité. Elle provient entre autres des effluents d'élevage, des effluents liquides des agro-industries et des déchets ménagers. Elles sont généralement de faible contenu énergétique [25].
- ✓ La biomasse sèche : elle est principalement constituée des biomasses de type ligneux ayant un taux d'humidité inférieur à 20%. Elle provient essentiellement des forêts, des industries de bois, de l'agriculture et des industries agro-alimentaires.

Classification selon le type d'utilisation

Selon l'Institut de l'Énergie et de l'Environnement de la Francophonie [26], suivant l'utilisation faite, on distingue deux types de biomasse :

- ✓ Biomasse traditionnelle : elle est constituée de l'ensemble des combustibles bruts utilisés pour les usages énergétiques domestiques. Elle inclut entre autres le bois de chauffe, le charbon de bois, les résidus agricoles et forestiers, etc. Cette façon d'utiliser la biomasse est peu efficace et peut engendrer de nombreux problèmes sanitaires et environnementaux.
- ✓ Biomasse moderne : elle fait allusion à l'utilisation plus avancée et technologique de matières organiques pour produire de l'énergie. Il s'agit généralement de l'utilisation des techniques telles que la gazéification, la pyrolyse, la méthanisation et la combustion contrôlée pour la production de la chaleur, de l'électricité ou des biocarburants. Ces méthodes ont généralement de bons rendements et permettent de réduire les émissions des GES et minimiser les impacts sur l'environnement.

Classification selon la composition chimique

Suivant la composition chimique de la biomasse, on distingue :

- ✓ La biomasse lignocellulosique : elle regroupe la biomasse composée principalement de matières végétales riches en cellulose, hémicellulose et lignine. Ces biomasses sont souvent issues des résidus agricoles, des résidus forestiers ou des cultures énergétiques.
- ✓ La biomasse amylacée ou riche en glucide : c'est l'ensemble des matières organiques riches en amidon. Elles sont généralement issues des résidus ou des sous-produits de la transformation des produits agricoles tels que les céréales, la canne à sucre, des betteraves sucrières, etc.
- ✓ La biomasse oléagineuse : elle est constituée de matières organiques riches en lipides telles que les graines du soja, de palme, du colza, etc. Elle constitue une ressource précieuse pour la production des biocarburants.

Parmi ces différents types de biomasses, la biomasse lignocellulosique représente une catégorie majeure des matières organiques d'origine végétale. Son potentiel comme source d'énergie renouvelable et durable en fait un sujet d'intérêt croissant dans le domaine de la production énergétique [27]. Le présent travail de thèse se concentrera sur cette catégorie de biomasse, en particulier celle provenant du secteur agricole et agro-industriel au Burkina Faso.

II. La biomasse lignocellulosique

La matière lignocellulosique, principale composante de la paroi cellulaire des plantes, représente la source la plus abondante de carbone renouvelable sur terre [28]. Composée de trois éléments essentiels que sont la cellulose, l'hémicellulose et la lignine, cette biomasse est générée par divers secteurs comme l'agriculture, la sylviculture et l'industrie [29]. La cellulose est un glucide complexe de structure fibreuse et partiellement cristalline constitué de nombreuses molécules de glucose liées entre elles. Elle est le principal composant structurel de la paroi cellulaire des plantes [30] assurant leur rigidité et leur résistance. La cellulose se combine avec les hémicelluloses pour former le complexe cellulose-hémicellulose.

L'hémicellulose est également un polysaccharide dont la structure est plus complexe que celle de la cellulose. C'est un polymère de divers sucres simples tels que le mannose, le galactose, l'arabinose, etc.[31], [32]. Elle constitue une partie importante de la paroi cellulaire des plantes offrant une certaine flexibilité et une résistance à la compression. Quant à la lignine, c'est un polymère complexe présent dans les parois cellulaires des plantes, en particulier dans les tissus ligneux comme le bois. La lignine confère de la résistance, de la rigidité et de l'imperméabilité aux cellules végétales, aidant ainsi les plantes à supporter leur propre poids et à résister à divers stress environnementaux [33], [34]. Sa structure complexe et polyfonctionnelle la rend difficile à dégrader, ce qui en fait un composant résistant à la décomposition.

La composition d'une biomasse en ces constituants dépend de la nature de la biomasse et varie considérablement comme le montre le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

Tableau 1 : Composition de quelques biomasses lignocellulosiques

Biomasse	Cellulose (%)	Hémicellulose (%)	Lignine (%)	Sources
Bois	40 -50	10-20	30-40	[25]
Pailles	30 - 43	22 - 35	15 - 23	[35]
Herbes	25 - 40	35 - 50	10 - 30	[35]
Bagasse de canne à sucre	25 - 45	28 - 32	15 - 25	[28]
Balle de riz	28,7 - 35.6	12 - 29,3	15,4 - 20	[28]
Paille de riz	29,2 – 34 ,7	23 – 25,9	17 - 19	[28]
Déchets de banane	13,2	14,8	14	[36], [37]
Coque de cajou	44	34,7	21,3	[38]
Tige de mil	41,5	18	28	[39]
Tige de maïs	40,6	32,4	20,5	[39]
Tige de sorgho	36	18	16	[39]
Tige de coton	39,9	17,2	25,6	[40]
Coque d'arachide	34,18	18,1	32,24	[41]
Noyaux de mangue	18	14,5	9,6	[42]
Coque de karité	21,2	29,5	34,9	[43]

Au sein de la biomasse lignocellulosique, la cellulose, l'hémicellulose et la lignine s'enchevêtrent pour former une structure tridimensionnelle et robuste consolidée par des liaisons hydrogène et des liaisons covalentes [29].

Sur le plan physique, la biomasse lignocellulosique se distingue par sa structure fibreuse et complexe. Cette caractéristique favorise son utilisation dans la production des biocarburants, de matériaux composites et de produits chimiques biosourcés. Du point de vue chimique, la composition de la biomasse lignocellulosique peut varier en fonction de la source de la biomasse, ce qui influence ses propriétés de dégradation, de réactivité et de valorisation. Ces propriétés physicochimiques font de cette biomasse un matériau prometteur dans la transition énergétique durable.

La biomasse lignocellulosique se décline généralement en trois catégories de ressources : la biomasse vierge, la biomasse résiduelle et les cultures énergétiques [44]. La biomasse vierge inclut des éléments comme les arbres, les buissons et les herbes, tandis que la biomasse

résiduelle englobe les restes de cultures et les déchets agro-industriels. Quant aux cultures énergétiques, elles fournissent les matières premières pour les biocarburants de deuxième génération.

Historiquement, la biomasse lignocellulosique, telle que le bois, a servi pendant des siècles de matière première pour satisfaire les besoins énergétiques, notamment pour le chauffage et la cuisson. Cependant, cette utilisation a été progressivement supplantée par les combustibles fossiles avec l'avènement de la révolution industrielle. Au cours du 20^e siècle, une demande croissante de biomasse pour la production d'énergie est apparue, motivée par plusieurs facteurs. Ces raisons incluent la raréfaction des ressources fossiles, l'augmentation constante de la demande énergétique mondiale, le coût relativement faible et la disponibilité étendue de la biomasse, les progrès technologiques, ainsi que les préoccupations environnementales liées au changement climatique [45], [46]. En effet, la croissance démographique rapide et le développement industriel ont entraîné d'importants défis énergétiques pour les sociétés humaines. Dans ce contexte, la biomasse est devenue une alternative attrayante en raison de sa nature renouvelable et de son abondance. Les activités humaines ont également généré d'importantes quantités de résidus et de déchets organiques largement sous-exploités, constituant très souvent une ressource "gratuite" pour une valorisation énergétique. De plus, les avancées significatives dans le développement des technologies de valorisation de la biomasse ont amélioré leurs performances énergétiques, augmentant ainsi la compétitivité des bioénergies par rapport aux énergies fossiles dans certaines régions du monde. Ces technologies permettent non seulement de produire de l'énergie renouvelable à faible empreinte carbone, mais contribuent également à une gestion efficace des déchets.

III. Valorisation énergétique de la biomasse lignocellulosique

Selon l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), la valorisation peut être définie comme « le réemploi, le recyclage ou toute autre action visant à obtenir, à partir des déchets, des matériaux réutilisables ou de l'énergie » [47]. La valorisation énergétique de la biomasse est donc l'utilisation efficace et optimale des matières organiques d'origines végétale ou animale pour produire de l'énergie. Les principales formes d'énergie produite à partir de la biomasse sont les biocarburants pour le transport, la chaleur et l'électricité pour les usages domestiques et industriels. La valorisation de la biomasse en énergie peut se faire suivant trois approches principales : la conversion thermo-chimique, la conversion biochimique et la conversion physico-chimique, comme illustré dans Figure 3.

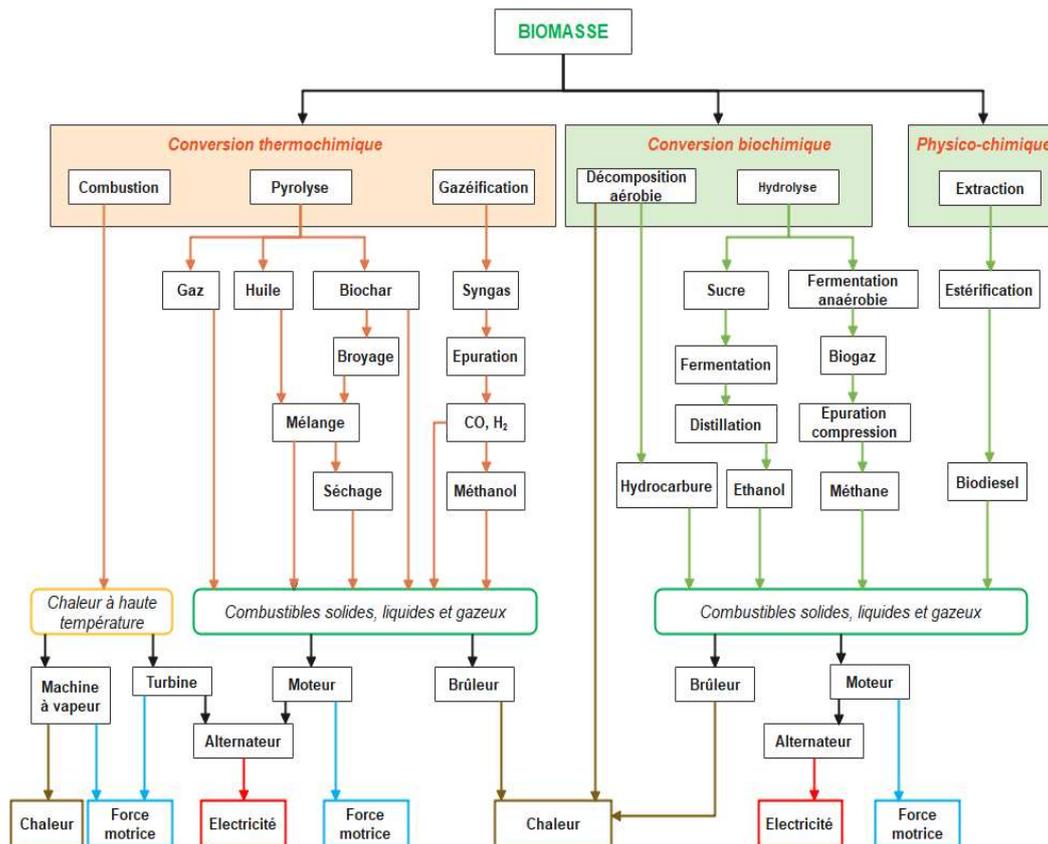


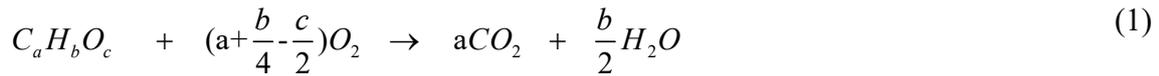
Figure 3 : Approches de valorisation de la biomasse lignocellulosique (adapté de [48])

Ainsi, la voie thermochimique est particulièrement adaptée pour traiter les biomasses dites sèches. Elle englobe divers procédés qui impliquent la décomposition des biomolécules sous l'effet de la chaleur, tels que la combustion, la gazéification et la pyrolyse. En revanche, la voie biochimique requiert une intervention microbienne et/ou enzymatique pour dégrader la biomasse. Elle comprend principalement deux procédés : la méthanisation et l'hydrolyse. Quant à la voie physico-chimique, elle repose sur l'extraction mécanique de l'huile par pression, souvent complétée par une extraction aux solvants. Pour ces travaux, nous nous concentrerons sur les trois voies de valorisation thermochimique et la méthanisation.

III.1. Combustion de la biomasse

III.1.1. Description du processus

La combustion de la biomasse est un processus par lequel la matière organique d'origine végétale ou animale est brûlée pour produire de l'énergie (chaleur, électricité) en présence d'oxygène [23]. Lorsque la biomasse est brûlée, elle réagit avec l'oxygène de l'air pour produire de la chaleur, du dioxyde de carbone (CO_2) et de la vapeur d'eau comme illustré dans l'équation (1) ci-dessous.



Le processus de combustion est un phénomène complexe qui se déroule en plusieurs phases distinctes. Chacune de ces phases joue un rôle crucial dans la transformation de la matière et la libération de l'énergie contenue dans la biomasse. La combustion d'un combustible tel que le bois comprend plusieurs phases essentielles. Tout d'abord, il y a la phase de séchage, au cours de laquelle l'humidité présente dans le bois s'évapore à mesure que la température augmente. Ensuite, intervient la phase pyrolyse/gazéification, une réaction thermochimique qui décompose la matière organique du bois en gaz volatils, en liquides pyrolytiques et en charbon résiduel. Ces gaz volatils subissent ensuite une combustion dans la phase de combustion des gaz, où ils réagissent avec l'oxygène pour produire de la chaleur, de la lumière et des gaz de combustion tels que le dioxyde de carbone et l'eau. Enfin, la combustion du résidu carboné se produit lorsque le charbon résiduel restant réagit avec l'oxygène pour brûler et libérer davantage de chaleur et de dioxyde de carbone [49].

Le processus de combustion peut se produire de manière contrôlée dans des installations telles que les centrales à biomasse, où la biomasse est utilisée comme combustible, ou dans des systèmes plus petits comme les poêles à bois domestiques. La combustion est considérée comme la méthode la plus simple pour exploiter l'énergie présente dans la biomasse. Elle permet de récupérer directement la chaleur contenue dans la biomasse, tandis que les autres méthodes de valorisation impliquent la conversion de la biomasse en un vecteur énergétique plus facile à stocker ou à transporter. La transformation finale en énergie utile est ensuite réalisée à un autre moment et en un autre lieu [25]. L'énergie produite lors de la combustion sous forme de chaleur peut être capturée et utilisée pour diverses applications, telles que le chauffage, la production d'électricité ou la cuisson des aliments.

L'humidité de la biomasse est un facteur important, car une biomasse trop humide nécessitera plus d'énergie pour sécher avant de commencer à brûler, ce qui peut réduire l'efficacité globale de la combustion. Cependant, une biomasse trop sèche peut brûler trop rapidement, provoquant des pertes d'énergie [50]. La dimension et la nature de la biomasse jouent également un rôle important. Une biomasse finement hachée ou pulvérisée brûlera plus rapidement qu'une biomasse en morceaux plus gros. De plus, la composition chimique de la biomasse, y compris la teneur en carbone, en hydrogène et en autres éléments, peut influencer la réaction de combustion et la formation de produits de combustion tels que les cendres et les gaz. Cependant, lorsqu'il s'agit de combustibles très fins, comme la sciure du bois, par exemple,

la combustion peut devenir problématique, car la circulation d'air nécessaire ne peut pas se faire de manière efficace [50].

Comprendre ces différentes étapes est essentiel pour optimiser le processus de combustion et maximiser l'efficacité énergétique de cette méthode de conversion.

L'énergie issue de la combustion de la biomasse est considérée comme une forme d'énergie renouvelable, car la matière organique utilisée peut être régénérée à l'échelle d'une vie humaine. Cependant, il est essentiel de gérer la combustion de la biomasse de manière durable pour minimiser les émissions de polluants atmosphériques tels que les particules fines, les oxydes d'azote et les composés organiques volatils.

III.1.2. Les technologies de la combustion de la biomasse

On distingue deux modes principaux de combustion de la biomasse : la combustion à lit fixe et la combustion à lit fluidisé.

III.1.2.a. La combustion à lit fixe

Dans un système de combustion à lit fixe, le combustible est généralement placé sur une grille ou dans une chambre de combustion conçue pour maintenir sa position pendant le processus de combustion. L'air primaire nécessaire à la combustion est introduit sous la grille ou à travers des ouvertures dans la chambre de combustion, créant ainsi un flux d'air ascendant à travers le lit de combustible où se déroulent les processus de séchage, de gazéification et de combustion du charbon. Les gaz combustibles ainsi produits sont ensuite brûlés après l'introduction de l'air secondaire, habituellement dans une zone de combustion distincte du lit de combustible (voir Figure 4). Ce type de combustion est couramment utilisé dans les chaudières à biomasse et les fours industriels. Les installations les plus répandues sont les foyers à grille et ceux à alimentation par le bas [26].

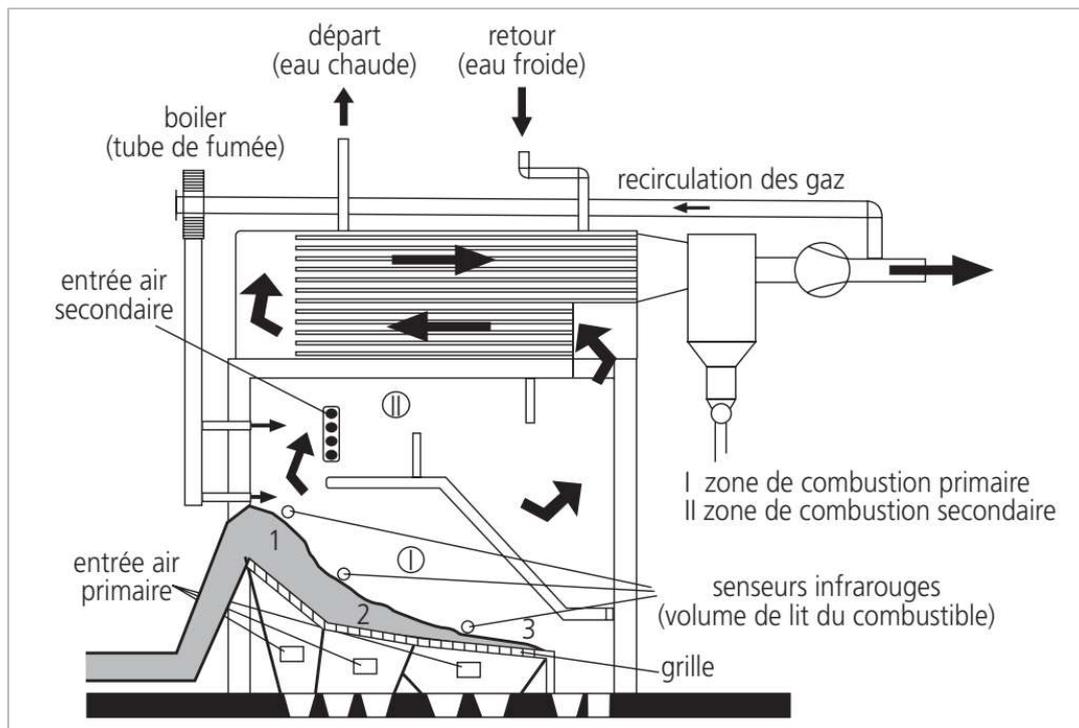


Figure 4: Foyer à grille [26]

Les foyers à grilles sont spécialement conçus pour incinérer de la biomasse ayant une teneur élevée en humidité (10 – 60 %), des particules de tailles variables (5 mm - > 10 cm) [51]. Leur capacité peut atteindre jusqu'à 20 MW. Ces foyers peuvent être équipés de grilles fixes ou mobiles, et le nettoyage des cendres peut être automatisé ou réalisé manuellement. Cependant, à cause de la faible température de fusion de la cendre de certaines biomasses telles que la paille et l'herbe, leur combustion dans ce type de technologie pourrait s'avérer problématique [51], [26]. En effet, en fondant, les cendres peuvent former des dépôts sur les surfaces d'échange thermique, réduisant l'efficacité du transfert de chaleur. Elles peuvent également générer des scories et des mâchefers qui obstruent les grilles et conduits, perturbant l'apport en air et le flux de matière. De plus, ces cendres contiennent parfois des composés corrosifs, comme les chlorures de potassium, accélérant la dégradation des surfaces métalliques. Ces obstructions et dépôts nuisent au bon déroulement de la combustion, diminuant son efficacité et augmentant les émissions polluantes.

La technologie du foyer à alimentation par le bas est une option économique pour les installations de petite et moyenne taille, allant jusqu'à 6 MW. Elle implique l'utilisation d'une vis pour alimenter le foyer par le bas. Ce système est particulièrement adapté aux biocombustibles à faible teneur en cendres et aux particules de petite taille. Comparé au foyer à grille, le foyer à alimentation par le bas offre un meilleur contrôle de l'arrivée du combustible.

La combustion à lit fixe offre plusieurs avantages, notamment une combustion plus contrôlée, une efficacité thermique accrue et une réduction des émissions polluantes grâce à une meilleure gestion de l'air de combustion. Cependant, elle nécessite généralement une conception spécifique et un contrôle précis des paramètres de combustion pour garantir un fonctionnement optimal.

III.1.2.b. Combustion à lit fluidisé

La combustion à lit fluidisé est une méthode de combustion utilisée dans les chaudières et les centrales électriques pour brûler des combustibles solides tels que la biomasse, le charbon et les déchets. Contrairement à la combustion à lit fixe où le combustible reste immobile, dans un lit fluidisé, le combustible est agité et maintenu en suspension dans l'air de combustion [50]. Le processus de combustion à lit fluidisé implique la combustion du combustible de biomasse dans un mélange de gaz et de matières solides (dolomite, silice, sable), où l'air primaire de combustion entre par le bas du lit [51]. Cette circulation d'air crée un mouvement ascendant qui agite et suspend les particules de combustible dans le flux d'air, formant ainsi un lit de combustible fluidisé. Lorsque le combustible est chauffé, il subit une pyrolyse et une combustion des gaz libérés, tout en restant en suspension dans le lit fluidisé. Ce mouvement constant des particules de combustible assure un contact efficace avec l'oxygène de l'air, favorisant ainsi une combustion complète et uniforme.

Les technologies à lit fluidisé offrent une grande tolérance pour le niveau d'humidité du combustible (10 à 55 %) ainsi que la possibilité de mélanger différents types de combustibles. Cependant, leur flexibilité est limitée en ce qui concerne la taille des particules, qui doit être inférieure à 80 mm [51]. Les chaudières à lit fluidisé peuvent avoir une capacité allant de 20 MW à plusieurs centaines de MW.

Les avantages de la combustion à lit fluidisé incluent une meilleure efficacité énergétique, une réduction des émissions de polluants tels que les oxydes de soufre et d'azote, ainsi qu'une plus grande flexibilité dans le choix des combustibles [51]. Cependant, la conception et le contrôle des paramètres du lit fluidisé sont cruciaux pour garantir un fonctionnement optimal et éviter des problèmes tels que l'agglomération des particules de combustible.

III.1.3. Défis et perspectives de la combustion de la biomasse

Les technologies de combustion de la biomasse rencontrent plusieurs défis significatifs. L'une des principales difficultés est la variabilité des caractéristiques de la biomasse, telles que la teneur en humidité, la densité énergétique et la composition chimique : ce qui peut entraîner

des inefficacités et des variations de performance lors de la combustion. De plus, l'accumulation de cendres et la formation de dépôts dans les chaudières et autres équipements de combustion peuvent réduire l'efficacité opérationnelle et augmenter les coûts de maintenance. Les émissions de polluants atmosphériques, telles que les particules fines, les oxydes d'azote et les composés organiques volatils, posent également des défis environnementaux et réglementaires importants. Enfin, la logistique liée à la collecte, au stockage et au transport de grandes quantités de biomasses peut être complexe et coûteuse, limitant ainsi la viabilité économique des installations de combustion à grande échelle.

Les perspectives pour les technologies de combustion de la biomasse sont prometteuses. La co-combustion de la biomasse avec d'autres combustibles, tels que le charbon, peut également offrir des avantages en termes de rendement et de performances environnementales et économiques [52], [53]. En outre, la valorisation des cendres produites comme amendement agricole ou matériau de construction peut créer des débouchés supplémentaires, améliorant ainsi la rentabilité et la durabilité des installations de combustion de la biomasse.

III.2. Gazéification de la biomasse

III.2.1. Description

La gazéification de la biomasse est un processus de conversion thermochimique qui transforme la matière organique en un gaz synthétique appelé gaz de synthèse, ou syngaz en présence d'un oxydant (air, oxygène pur, dioxyde de carbone, etc.) [54]. Le syngaz est essentiellement composé d'hydrogène (H_2), de monoxyde de carbone (CO), de dioxyde de carbone (CO_2), d'eau (H_2O) et de quantité variable de goudron [55]. Les conditions de gazéification, notamment la température, le rapport de combustion et la pression, jouent un rôle déterminant dans la composition du gaz de synthèse [56].

Le processus de gazéification se déroule dans une atmosphère contrôlée, généralement dans un réacteur appelé gazéificateur. Il s'effectue suivant quatre étapes successives : le séchage, la pyrolyse, l'oxydation et la réduction comme indiqué dans la Figure 5.

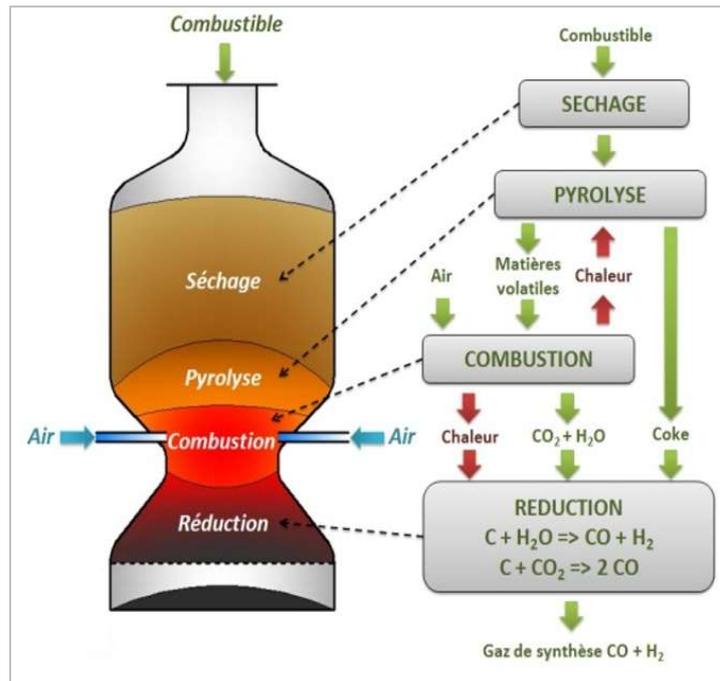


Figure 5 : Principales étapes de la gazéification [57]

Au cours du séchage, la biomasse est chauffée afin de réduire l'humidité qu'elle contient. La biomasse ne subit pas de décomposition thermique de ses matières volatiles durant cette phase en raison de la température relativement basse [58]. La quantité d'énergie thermique nécessaire pour cette opération est proportionnelle au taux d'humidité initial de la matière. Le processus de séchage est généralement considéré comme complet lorsque la température de la biomasse atteint environ 150 °C [59].

Le processus génère du charbon solide, du goudron liquide et des gaz [60]. Les gaz pyrolytiques produits se composent d'une partie condensable, comprenant notamment la vapeur d'eau et des composés organiques, et d'une partie incondensable, incluant le monoxyde de carbone (CO), le dioxyde de carbone (CO₂), l'hydrogène (H₂) et le méthane (CH₄) [24]. Quant au charbon produit, encore appelé coke ou carbone résiduel, il est caractérisé par une forte teneur en carbone et un pouvoir calorifique (PCI) élevé. Il contient également des éléments minéraux. La composition précise des produits finaux dépend du type de biomasse utilisé comme combustible et des conditions spécifiques dans lesquelles la pyrolyse est réalisée. Après la pyrolyse suit l'étape d'oxydation. Lors du processus d'oxydation, les matières volatiles présentes dans la biomasse subissent des réactions chimiques exothermiques avec l'agent oxydant. Cette phase est importante pour déterminer le type et la qualité du produit final. Les principaux produits de l'oxydation sont le CO et le H₂. Le rendement du gaz produit dépend principalement de la température et de la pression dans le réacteur, ainsi que du choix de l'agent de gazéification (oxygène, air ou vapeur). En outre, le choix de l'oxydant est primordial, car il est

un facteur déterminant pour le PCI du gaz final. Ainsi, le Tableau 2 donne les PCI du gaz en fonction du type d'oxydant utilisé.

Tableau 2 : PCI du gaz de synthèse en fonction de l'agent oxydant utilisé

Type d'oxydant	PCI du gaz (MJ/Nm ³)
Air ou air/vapeur d'eau	4 à 6
Vapeur d'eau	12 à 18
Oxygène pur	12 à 18
Hydrogène	40

Les agents les plus utilisés sont l'air et l'oxygène. Mais, pour améliorer le PCI du gaz, la vapeur d'eau est utilisée comme additif.

Enfin, vient l'étape de réduction. Durant cette étape, plusieurs réactions chimiques se produisent à des températures élevées dans une atmosphère réductrice. Ces réactions transforment la chaleur contenue dans les gaz et le charbon en énergie chimique sous forme de gaz de production. Ce processus de réduction implique des réactions endothermiques qui génèrent des produits combustibles comme le monoxyde de carbone (CO), l'hydrogène (H₂) et le méthane (CH₄) [58].

Ces quatre étapes de la gazéification, le séchage, la pyrolyse, l'oxydation et la réduction, sont essentielles pour la conversion efficace de la biomasse en gaz de synthèse, offrant ainsi une voie alternative pour produire de l'énergie propre et des produits chimiques à partir de ressources renouvelables.

III.2.2. Technologies de gazéification

En se basant sur le mode d'alimentation de la biomasse, l'agent oxydant employé, la conception du réacteur et la méthode d'évacuation des cendres, on peut identifier deux grandes familles de gazogènes :

- **Gazogène à lit fixe** : c'est l'approche traditionnelle de la gazéification de la biomasse. Elle implique la création d'une zone d'oxydation/réduction stable où le coke est maintenu par une grille. L'agent oxydant principal utilisé est généralement de l'air, éventuellement enrichi en vapeur. Trois types de gazogènes à lit fixe sont distingués en fonction du sens d'écoulement du gaz : co-courant, contre-courant et transversal (ce dernier est moins utilisé en raison de sa faible efficacité et de la production élevée de goudrons). Dans les procédés à co-courant, le combustible solide et l'oxydant sont introduits en partie haute dans le réacteur de gazéification

(Figure 6). Les produits issus de séchage et de la pyrolyse traversent la zone d'oxydation où se produit le craquage thermique des matières volatiles. Cette étape permet de réduire la formation de goudron et d'obtenir un gaz de meilleure qualité [57], [58].

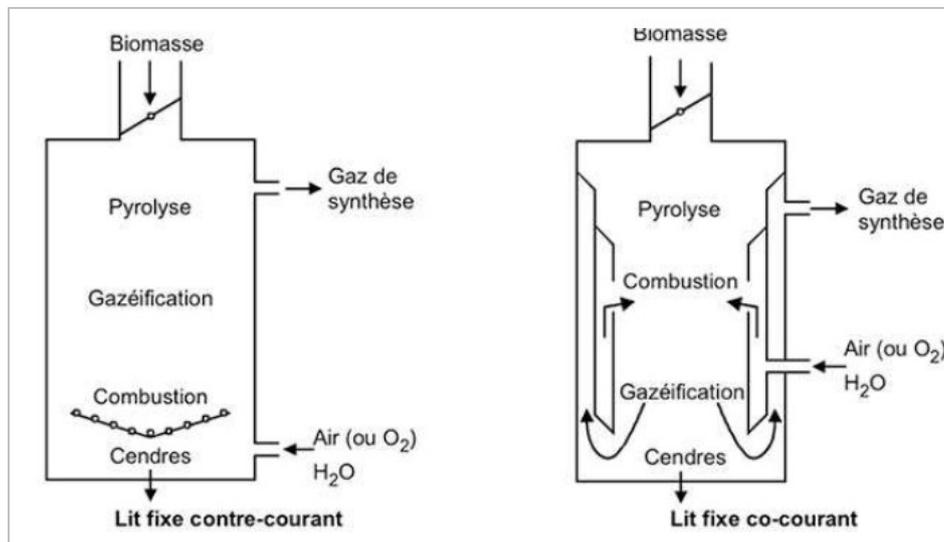


Figure 6 : Technologies de gazogènes à contre-courant et à co-courant [61]

Dans les procédés à contre-courant, la biomasse est introduite dans la partie haute du réacteur de gazéification, tandis que le gazéifiant est introduit dans la partie basse du réacteur (Figure 6). La biomasse se déplace donc vers le bas tandis que le gazéifiant se déplace vers le haut, permettant ainsi un contact direct entre les deux flux à l'endroit où les réactions de gazéification ont lieu. Ces technologies présentent l'avantage d'être flexibles par rapport à l'humidité de la biomasse. Cependant, le gaz produit dans ce type de procédé est souvent fortement contaminé par des goudrons formés lors de la phase de pyrolyse.

Les gazogènes à lit fixe sont appréciés pour leur simplicité de conception et leur capacité à fonctionner avec une variété de combustibles solides. Cependant, ils peuvent nécessiter un contrôle précis des paramètres de fonctionnement pour optimiser l'efficacité de la gazéification et la qualité du syngaz produit. Ces systèmes sont souvent utilisés dans les applications industrielles de cogénération pour produire de l'électricité, de la chaleur ou des carburants à partir de ressources renouvelables.

- **Gazogène à lit fluidisé** : c'est le processus durant lequel, la biomasse est fluidisée grâce à un flux de gaz à haute vitesse. Dans un système de lit fluidisé, la matière première doit être broyée en fines particules, et les gaz de gazéification/fluidification sont introduits par une plaque de distribution située près du fond du réacteur. Dans ce type de réacteur, les zones de séchage, de pyrolyse, d'oxydation et de réduction ne sont pas distinctement localisées dans une région spécifique du gazéificateur, contrairement aux gazéificateurs à lit fixe [62]. On distingue trois

types de procédés à lit fluidisé : le lit fluidisé dense, le lit fluidisé circulant et le procédé à flux entrainé (Figure 7) [57].

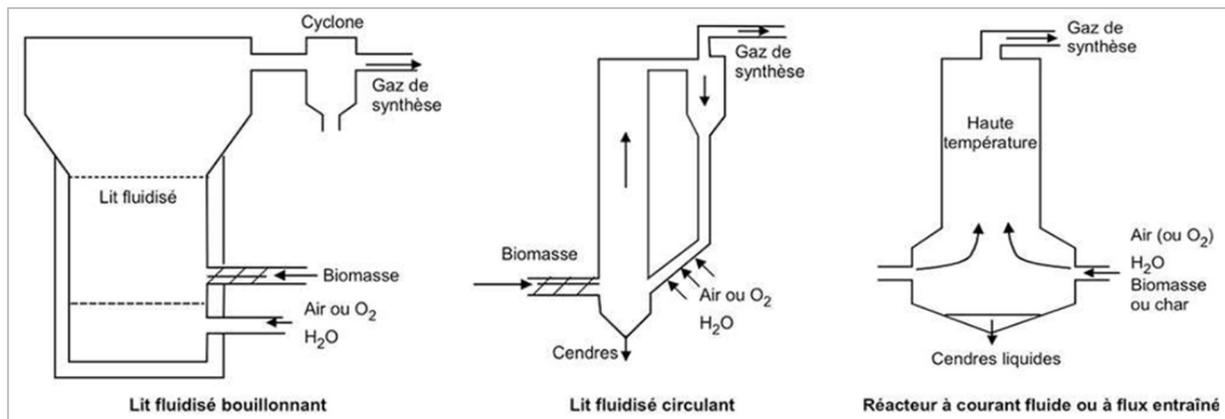


Figure 7 : Technologies de gazogènes à lit fluidisé

Dans les gazogènes à lit fluidisé dense, le combustible est soutenu par une grille par laquelle passent les gaz oxydants. La vitesse des gaz est soigneusement contrôlée, oscillant entre 1 et 2 mètres par seconde, juste assez rapide pour agiter les particules sans les éjecter du lit. Dans le cas à lit fluidisé circulant, le combustible se déplace de la zone de réaction vers un cyclone séparateur où les cendres sont retirées. La vitesse de fluidisation est plus élevée, variant entre 4 et 6 mètres par seconde, ce qui entraîne une certaine quantité de particules du lit hors du réacteur. Pour les procédés à lit entrainé, le combustible est pulvérisé dans le flux gazeux de l'agent gazéifiant, qui le garde en suspension jusqu'à ce qu'il soit entièrement consommé. La vitesse de fluidisation, largement supérieure à 6 mètres par seconde, aligne la vitesse des particules avec celle des gaz, assurant ainsi leur circulation efficace dans le système.

Les gazogènes à lit fluidisé offrent plusieurs avantages, notamment une meilleure efficacité de conversion, une réduction des émissions de polluants et une flexibilité dans le choix des combustibles [62], [63]. De plus, ils peuvent être utilisés dans une gamme de tailles allant des petites unités domestiques aux installations industrielles plus importantes. Cependant, le gaz produit contient une concentration importante de particules, nécessitant des traitements préalables avant son utilisation. En outre, leur conception et leur exploitation nécessitent une expertise technique pour garantir un fonctionnement optimal et une production de syngaz de qualité.

III.2.3. Défis et perspectives de la gazéification

Les technologies de gazéification de la biomasse font face à plusieurs défis majeurs. La variabilité des matières premières est un obstacle important, car la composition de la biomasse

peut considérablement varier, affectant la stabilité et l'efficacité du processus de gazéification. De plus, les coûts logistiques et de transport associés à la collecte et à la préparation de la biomasse sont élevés, ce qui rend difficile l'optimisation économique de cette technologie à grande échelle. Un autre défi est la production de goudrons et autres contaminants pendant la gazéification, qui nécessite des systèmes de purification coûteux et complexes pour obtenir un gaz de synthèse de haute qualité [64]. En outre, la disparité des connaissances sur les technologies de la gazéification par les différents acteurs entrave la diffusion à grande échelle de la technologie [58]. Plusieurs autres défis de la gazéification ont été identifiés et étudiés dans la littérature comme [58], [65]. Ces obstacles sont généralement d'ordre technique, financier, socioculturel et organisationnel, politique et géographique [66].

Face à ces défis, l'amélioration des technologies de prétraitement de la biomasse peut contribuer à réduire l'effet de la variabilité des matières premières et à augmenter l'efficacité du processus. De plus, le développement de réacteurs de gazéification plus avancés et de systèmes de purification du gaz de synthèse pourrait réduire les coûts opérationnels et améliorer la qualité du gaz produit. L'utilisation de co-gazéification, où la biomasse est gazéifiée avec d'autres matériaux, pourrait également améliorer la performance globale et réduire les coûts. Enfin, les recherches en cours sur la valorisation des sous-produits de la gazéification, tels que le biochar, offrent de nouvelles opportunités pour améliorer la rentabilité et la durabilité de ce processus.

III.3. Pyrolyse

III.3.1. Description

La pyrolyse de la biomasse offre une perspective prometteuse comme source renouvelable et durable de biocombustibles et de substituts pétrochimiques [67]. C'est un processus de conversion thermochimique au cours duquel la matière organique est transformée en produits utiles tels que le biochar, le bio-huile et les gaz de pyrolyse [68]. Ce processus se déroule en l'absence d'oxygène [69]. Suivant les conditions opératoires, on distingue la pyrolyse lente conventionnelle ou carbonisation, la pyrolyse rapide et la pyrolyse flash. Les paramètres principaux des différents procédés sont indiqués dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Principaux paramètres opératoires des procédés de pyrolyse [68], [70], [71]

Type de pyrolyse	Température (°C)	Temps de séjour (s)	Vitesse de chauffe (°C/s)	Taille des particules	Rendement (%)		
					Bio-Huile	Gaz	Biochar
Lente	300 - 500	>30	0,1 - 1	5 – 50	30	35	35
Rapide	400 - 600	<2	10 - 200	< 1	70	12	13
Flash	900 - 1200	<0,5	>1000	< 0,5	75	<12	<13

La maîtrise de ces paramètres permet d'orienter la réaction et d'optimiser le rendement et la qualité des produits de la pyrolyse. Ainsi, lorsque la pyrolyse est menée à environ 300 à 500°C, avec des augmentations lentes en température et des temps de séjour prolongés (quelques heures à des jours), elle est qualifiée de pyrolyse lente conventionnelle ou de carbonisation [72]. La pyrolyse lente conduit à la formation du biochar (35%), principal produit, du bio-huile et des gaz [73]. Cependant, en fonction du type de biomasse choisi et de la technologie (artisanale ou industrielle) utilisée, le rendement massique du biochar peut aller de 11 à 40% [25].

La pyrolyse est dite rapide lorsqu'elle est effectuée à des températures comprises entre 400 et 600°C, avec une vitesse de chauffage rapide (>10-200°C/s) et des temps de séjour courts (0,5 - 10 s) [67]. Les principaux produits de ce procédé sont la bio-huile dont le rendement peut atteindre jusqu'à 70% et le gaz de pyrolyse (10-20%) [74]. La bio-huile peut être utilisée pour comme biocarburant ou pour la production de produits chimiques d'origine biologique.

La pyrolyse flash est une forme avancée de la pyrolyse rapide. Elle est caractérisée par une vitesse de chauffage très élevée (1000°C/s), un temps de séjour très court (0,1 à 0,5 s) et se déroule à des températures pouvant atteindre les 1200°C [75], [71]. Comparativement à la pyrolyse rapide, le rendement en bio-huile de la pyrolyse flash peut dépasser 75% [71], [76]. Chaque type de pyrolyse a ses avantages et ses applications spécifiques en fonction des produits finaux recherchés et des conditions de traitement de la biomasse.

III.3.2. Défis et perspectives de la pyrolyse

L'un des principaux défis de la pyrolyse de la biomasse réside dans la logistique des matières premières. Le coût de la manutention et du transport de la biomasse est élevé, rendant difficile l'optimisation de l'efficacité de la pyrolyse à grande échelle [77]. Pour surmonter cela, il est crucial de produire des produits à haute densité énergétique directement à la source de la biomasse, ce qui réduirait les coûts logistiques. De plus, les performances des réacteurs de pyrolyse actuels doivent être améliorées afin de pouvoir maximiser la production de bio-huile tout en minimisant l'accumulation de cendres et de métaux dans les réacteurs. Il est également

nécessaire de résoudre certains problèmes, notamment l'absence de marchés pour les huiles de pyrolyse et l'absence de produits dérivés du biochar avec des caractéristiques de performance bien définies [73]. L'utilisation de catalyseurs robustes et thermiquement stables est également essentielle pour améliorer la qualité de la bio-huile, mais ces processus peuvent être entravés par des dépôts de carbone et de minéraux. Enfin, la conversion des produits de pyrolyse en carburants et produits chimiques de transport plus précieux nécessite des améliorations technologiques significatives, et la co-pyrolyse de divers matériaux présente des défis supplémentaires en termes de complexité et de coûts [78].

Bien que ces défis posent des obstacles significatifs à l'optimisation de la pyrolyse de la biomasse, les avancées technologiques et les nouvelles approches offrent des perspectives encourageantes pour l'avenir. L'utilisation de systèmes de pyrolyse mobiles offre une solution efficace pour traiter la biomasse directement à la source, ce qui réduit à la fois les coûts de transport et les risques d'accumulation de biomasse dans les forêts, contribuant ainsi à réduire les risques d'incendie [77]. Parallèlement, l'introduction de nouveaux catalyseurs, tels que le calcium, représente une avancée prometteuse en améliorant les réactions de pyrolyse tout en permettant la fixation du dioxyde de carbone.

En outre, le reformage à la vapeur catalytique de la bio-huile en carburants de transport et en produits chimiques de haute valeur pourrait transformer l'industrie, rendant les produits issus de la pyrolyse plus compétitifs sur le marché.

La co-pyrolyse de la biomasse avec des déchets polymères est une autre innovation qui améliore non seulement le rendement en bio-huile. Enfin, l'intégration des systèmes de pyrolyse rapide avec des technologies de gazéification ou des centrales de cogénération (CHP) pourrait renforcer la viabilité économique de la pyrolyse tout en améliorant les performances environnementales, notamment par des réductions significatives des émissions de gaz à effet de serre.

III.4. Méthanisation de la biomasse

III.4.1. Description

La méthanisation représente une opportunité exceptionnelle pour la conversion des bioressources abondantes en énergie renouvelable [79]. C'est un processus biologique naturellement présent dans la nature et utilisé de manière contrôlée pour valoriser les déchets organiques. Ce processus, également appelé digestion anaérobie, se déroule dans un environnement dépourvu d'oxygène où des microorganismes décomposent la matière organique pour produire un mélange gazeux (biogaz) et un effluent solide (le digestat) [80]. Le biogaz

produit est un gaz combustible principalement composé de méthane (CH₄), représentant généralement de 50 à 70% de sa composition, accompagné de 20 à 50% de CO₂, ainsi que de petites quantités d'autres composés tels que le sulfure d'hydrogène (H₂S), l'ammoniac (NH₃) et de la vapeur d'eau (H₂O) [81], [82]. Le PCI du biogaz varie en fonction de sa teneur en méthane. Sa valeur moyenne est de 21,5 MJ/m³ (60% de méthane) et sa densité est de 1,22 kg/m³ [83]. Selon la pureté du biogaz, il peut être utilisé pour la production de l'électricité et/ou de la chaleur ou comme carburant pour le transport et les piles à combustible [84]. Le digestat, renfermant des éléments nutritifs de la matière organique d'origine, peut être utilisé directement comme engrais ou après un processus de traitement pour l'amendement des sols [85]. Les matières premières utilisées dans la méthanisation peuvent inclure des déchets agricoles, des résidus alimentaires, des boues d'épuration et d'autres biomasses [86]. La dégradation anaérobie se déroule suivant quatre étapes : l'hydrolyse, l'acidogénèse, l'acétogénèse et la méthanogénèse [87].

- *La phase d'hydrolyse* : durant cette phase qui marque le début du processus, les grandes molécules organiques telles que les polysaccharides, les lipides et les protéines sont décomposées en molécules plus petites par des enzymes et des bactéries [25]. Cette étape prépare les substrats pour les étapes suivantes de la digestion.
- *La phase acidogénèse* : dans cette étape, les composés organiques produits lors de l'hydrolyse, tels que les acides gras volatils, les acides aminés et les sucres simples, sont transformés en acides gras et en acides organiques à chaîne courte (comme l'acétate, le propionate et le butyrate) par des bactéries acidogènes. Cette phase génère également de l'hydrogène, du dioxyde de carbone et de l'ammoniac.
- *La phase acétogénèse* : les acides organiques produits dans la phase précédente sont convertis en acétate, en dioxyde de carbone, en hydrogène et en éthanol par des bactéries acétogènes. Cette étape est importante, car elle fournit les substrats nécessaires à la production de méthane [87].
- *La phase méthanogénèse* : c'est la phase dans laquelle les microorganismes méthanogènes consomment l'hydrogène, le dioxyde de carbone, l'acétate et d'autres composés pour produire du méthane (CH₄) et du dioxyde de carbone (CO₂).

Ces phases se déroulent de manière séquentielle et interdépendante dans un environnement anaérobie contrôlé appelé digesteur.

Pour une fermentation efficace, plusieurs conditions doivent être respectées dont entre autres :

- Le substrat (matière organique) doit avoir une teneur en eau entre 80 et 90% [25].

- Le digesteur être hermétique pour éviter les entrées d'air.
- La température de la matière organique doit être maintenue autour de 35°C [87].
- Le pH du substrat doit être compris entre l'intervalle 6,5 et 8,5. Le pH idéal étant compris entre 7 et 8 [88].
- Homogénéiser le contenu du réacteur et maintenir une température optimale pour favoriser le travail efficace des micro-organismes, essentiels au processus.
- Respecter une durée suffisante pour permettre la décomposition complète de la matière organique dans le digesteur.

III.4.2. Types de digesteurs

Suivant le mode d'alimentation, on distingue trois types de digesteur :

- *Le digesteur continu* : ce type de procédé consiste à remplir le digesteur avant de lui fournir régulièrement de la matière organique pour maintenir son activité. Le rythme d'alimentation devrait être continu pour une efficacité maximale. Mais, pour des raisons pratiques, les digesteurs sont généralement alimentés par intermittence, la période la plus courante étant une fois par jour [89]. Compte tenu du temps nécessaire à la croissance des bactéries (environ 10 à 20 jours), les débits d'entrée et de sortie seront très réduits, en particulier pour les réacteurs de petite taille [90].

Le digesteur continu est souvent utilisé dans les installations de méthanisation de grande échelle, telles que les centrales de biogaz ou les installations de traitement des déchets municipaux et industriels. Son fonctionnement continu permet une production stable de biogaz et une utilisation efficace des matières organiques, tout en offrant une certaine flexibilité pour ajuster les paramètres de fermentation selon les besoins.

- *Le digesteur discontinu ou batch* : contrairement aux digesteurs continus, le digesteur discontinu fonctionne par lots, traitant une quantité définie de matières organiques à la fois. Ils sont remplis puis vidés séquentiellement lorsque la production de biogaz chute ou devient nulle. Son principe de fonctionnement est basé sur les phases successives :

Alimentation – Digestion – Usage – Décharge

Ce mode de fonctionnement est robuste et relativement simple à mettre en œuvre. Cependant, ces réacteurs exigent une phase de remplissage et de vidange, ainsi qu'un temps significatif pour la croissance des bactéries, ce qui limite leur utilisation aux petites installations [90]. Le digesteur discontinu est couramment utilisé dans les exploitations agricoles de petite et moyenne taille, les installations de traitement des eaux usées, ainsi que dans d'autres sites où besoin en biogaz est périodique.

- *Le digesteur à lit fixe et à lit fluidisé* : le digesteur à lit fixe utilise un lit de matière solide, tel que de la paille, des copeaux de bois, etc., pour supporter la biomasse. Les matières organiques sont chargées sur ce lit fixe et les microorganismes se développent à la surface de ce substrat solide pour dégrader la matière organique. Quant aux digesteurs à lit fluidisé, il se distinguent par la grande mobilité de leurs supports. Cette agitation continue crée un environnement dynamique où les particules de matière organique sont constamment en contact avec les micro-organismes et les enzymes, favorisant ainsi la digestion anaérobie. Ce type de réacteur est particulièrement robuste face aux surcharges organiques [91].

Le digesteur à lit fixe est plus simple et adapté aux petites exploitations, tandis que le digesteur à lit fluidisé offre une meilleure efficacité et polyvalence pour traiter une gamme plus large de matières organiques. Cependant, il nécessite une gestion plus complexe.

III.4.3. Défis et perspectives des technologies de méthanisation

L'hétérogénéité des matières organiques utilisées pour la méthanisation, telles que les déchets agricoles, industriels et municipaux, pose un défi majeur. Cette variabilité en composition peut affecter l'efficacité du processus et rendre difficile la standardisation des opérations. Pour la biomasse lignocellulosique, sa structure complexe et sa teneur élevée en lignine compliquent la digestion anaérobie, nécessitant un prétraitement adéquat pour faciliter sa dégradation dans le réacteur [92], [93]. De plus, la disponibilité des intrants fluctue selon les saisons, créant des défis d'approvisionnement constants.

Un autre défi réside dans l'absence de digesteurs conçus pour manipuler efficacement la biomasse à haute teneur en solides [79]. Le digestat peut contenir des polluants tels que des métaux lourds et des pathogènes, nécessitant un traitement adéquat avant une utilisation sécurisée comme fertilisant. L'absence de marché pour le digestat, et la réticence des agriculteurs à l'accepter, compromet la viabilité financière du processus [92], [94]. La forte concurrence de l'électricité bon marché produite par les centrales fossiles et les coûts importants des investissements initiaux pour les installations de méthanisation constituent une barrière à l'entrée pour de nombreux opérateurs potentiels.

Pour optimiser le processus de méthanisation, des prétraitements adaptés peuvent améliorer la dégradabilité et augmenter la production de méthane à partir de biomasses lignocellulosiques. La co-digestion, qui consiste à mélanger différents types de biomasse, permet d'équilibrer les nutriments nécessaires aux microbes méthanogènes, augmentant l'efficacité globale du processus [84]. La récolte de la biomasse à un stade de maturité approprié peut également

améliorer le rendement et permettre une conversion en méthane sans nécessiter un prétraitement intensif [79].

Le développement de nouveaux types de réacteurs adaptés et capables de traiter efficacement les matières premières à haute teneur en solides pourrait améliorer l'efficacité énergétique de la méthanisation. De plus, la combinaison de la digestion anaérobie avec la production de microalgues est prometteuse. Cette approche utilise les nutriments présents dans l'effluent pour cultiver des algues, dont les lipides peuvent être transformés en biodiesel, et les résidus post-récolte peuvent être réintroduits dans le digesteur pour produire du méthane. L'effluent post-production d'algues peut être recyclé pour alimenter le digesteur anaérobie [79]. Les avancées en biotechnologie, notamment l'ingénierie des microbes méthanogènes pour une meilleure performance et résistance, sont prometteuses pour augmenter l'efficacité du processus. Par ailleurs, améliorer les techniques de traitement et de valorisation du digestat est crucial pour en faire un fertilisant de haute qualité ou un amendement de sol. La récupération de nutriments présents dans le digestat, tels que l'azote et le phosphore, peut être valorisée pour des applications agricoles ou industrielles. Enfin, l'utilisation de systèmes de gestion intelligente permet d'optimiser les conditions opératoires et de minimiser les coûts d'exploitation, rendant la méthanisation plus viable économiquement.

La recherche pourrait soutenir le développement de cette chaîne de valeur en fournissant entre autres des outils d'optimisation simples et peu onéreux pour la récupération du méthane, des conceptions innovantes de digesteurs à haute teneur en matières solides couvrant un large éventail de biodéchets et des protocoles de surveillance normalisés pour les digestats.

B. Etat des lieux sur les chaînes d'approvisionnement de la biomasse

Dans un contexte mondial marqué par une recherche constante de solutions énergétiques durables, l'optimisation des chaînes d'approvisionnement des systèmes bioénergies est devenue un enjeu crucial. Cette section vise à dresser un état des lieux complet des pratiques, des technologies et des avancées récentes visant à améliorer l'efficacité, la durabilité et la rentabilité des chaînes d'approvisionnement dans le domaine des bioénergies. À travers cette exploration, nous examinerons les défis rencontrés, les solutions innovantes proposées et les perspectives pour une gestion optimale des ressources bioénergétiques.

I. Chaines d'approvisionnement de la biomasse

I.1. Structure et caractéristiques

La chaîne logistique, également appelée chaîne d'approvisionnement, est définie comme un réseau d'organisations liées par des flux amont et aval, engagées dans divers processus et activités visant à créer de la valeur sous forme de produits et de services pour un consommateur final [95].

La chaîne d'approvisionnement de la biomasse est le flux de biomasse depuis la source de production jusqu'à son utilisation finale [96], [97]. Elle comprend un ensemble d'opérations et de processus pouvant inclure la culture, la récolte, la collecte, le transport, le stockage, le prétraitement, la transformation et les utilisations finales [98]–[100]. Dans de nombreux travaux, les activités liées à la culture et au processus de conversion sont souvent exclues de la chaîne [101]. Elle est alors considérée comme débutant dans les champs prêts à la récolte et prend fin aux portes de l'unité de conversion. La structure de la chaîne d'approvisionnement est généralement organisée en quatre grandes étapes : récolte/collecte, prétraitement, stockage, transport. Dans ces maillons interviennent divers acteurs ayant des interactions entre eux. La Figure 8 illustre une structure de la chaîne d'approvisionnement en biomasse.

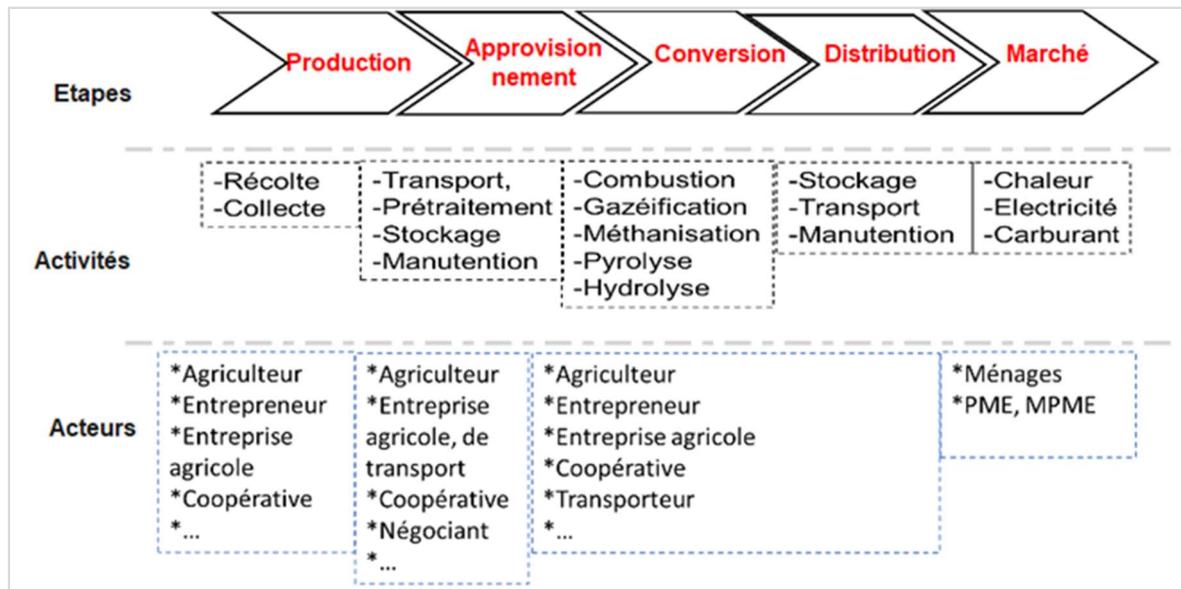


Figure 8: Structure classique de la chaîne d'approvisionnement en biomasse avec les principaux acteurs et activités

Bien que des activités telles que le transport, la production et le stockage soient communes avec d'autres chaînes d'approvisionnement, des opérations spécifiques telles que la récolte et le prétraitement sont propres à la chaîne d'approvisionnement de la biomasse [102]. En effet, plusieurs caractéristiques notables de la biomasse distinguent la chaîne d'approvisionnement

en biomasse de la chaîne d'approvisionnement classique. Ces caractéristiques sont entre autres la dispersion géographique de la ressource, la teneur en eau élevée, la densité apparente réduite et la disponibilité saisonnière ; à cela s'ajoutent les incertitudes liées aux variations météorologiques, aux politiques et aux fluctuations du marché [103]. L'ensemble de ces facteurs rendent la logistique de la biomasse à la fois complexe et coûteuse. Toutefois, il est important de souligner que la configuration précise de la chaîne d'approvisionnement en biomasse varie en fonction du type de biomasse, de ses caractéristiques, des technologies employées pour la conversion énergétique et de la conception du système [98].

I.2. Analyse de la chaîne d'approvisionnement de la biomasse

En raison de la diversité considérable des types de biomasse disponibles et des diverses technologies de conversion énergétique, il n'est pas envisageable de créer une seule chaîne d'approvisionnement universelle qui convienne à toutes les ressources. Cependant, les principaux processus couramment mis en œuvre sont :

- *La récolte et/ou collecte de la biomasse des sites de production* : c'est la première étape de la chaîne d'approvisionnement de la biomasse. Elle consiste à retirer la biomasse et à la rassembler pour la déplacer hors des champs ou de son lieu de production. Cela peut inclure des cultures énergétiques, les résidus agricoles, les déchets forestiers, les résidus de l'industrie agroalimentaire, etc. Cette tâche peut être affectée par les caractéristiques de la biomasse et son utilisation finale. Les activités de la récolte de la biomasse se font généralement sur des périodes limitées, soit de façon mécanique ou manuelle en fonction du type de biomasse et de l'échelle de production. La perte de biomasse durant cette phase est généralement de 10 à 20 % [104]. Parmi les méthodes courantes de récolte et collecte de la biomasse, on trouve la mise en balles, le hachage humide et sec, la récolte en plusieurs passages, la récolte en un seul passage et la récolte de l'ensemble de la récolte [102]. Cette première phase de chaîne est la plus influente en matière d'impacts environnementaux et économiques. Il est donc important de considérer les techniques de récolte qui minimisent les pertes et les coûts, préservent la qualité de la biomasse et réduisent les impacts environnementaux.
- *Le prétraitement de la biomasse* : avant la transformation de la biomasse en produits finaux tels que le biocarburant, le biogaz, l'électricité, etc., elle peut nécessiter un prétraitement. Ce processus vise à minimiser les pertes de matière et à transformer la biomasse de faible densité en un produit plus stable et densifié, ce qui permet de faciliter et de réduire les coûts du transport [105]. Il peut inclure le broyage, le tamisage, le

séchage, la fragmentation, la densification (pelletisation, briquetage), la désintégration thermique, la torréfaction, la pyrolyse, ou d'autres processus visant à améliorer la qualité, la maniabilité et la convertibilité de la biomasse [106]. Cette étape est très souvent effectuée avant le transport mais, peut être faite à n'importe quel stade de la chaîne. Le plus économique étant de l'intégrer à la récolte [101].

Les tiges de cotonnier et les résidus de mangue (noyaux et épiluchures) par exemple à l'état brute sont volumineux, fibreux et hétérogènes. Cela peut source de plusieurs problèmes dans le processus de la valorisation. En effet, leur volume important rend leur transport, stockage et manipulation difficiles et coûteux. La structure fibreuse, souvent résistant et entremêlée, de ces résidus peut entraîner des blocages dans les équipements de traitement, perturbant ainsi le flux de matière et la continuité des opérations. De plus, l'hétérogénéité des matériaux, en termes de taille, de forme et de composition, peut provoquer des déséquilibres dans les réactions, menant à une conversion incomplète ou inefficace. Cela se traduit par exemple par une combustion irrégulière, une production de gaz non uniformes et une qualité variable des produits finaux. Afin de surmonter ces contraintes, le broyage se présente comme une bonne option. Ce procédé permet de réduire ces résidus en particules plus petites et plus uniformes, augmentant ainsi la surface spécifique de la biomasse et améliorant sa réactivité lors de la conversion. Ce traitement permet de maximiser ainsi les rendements énergétiques et la qualité des produits finaux. En outre, le broyage facilite le transport, le stockage et la manipulation des résidus en augmentant leur densité en vrac. Cela est particulièrement important pour les applications industrielles, où la gestion efficace des matières premières est importante pour la rentabilité. Enfin, le broyage permet également d'assurer une homogénéité de la biomasse permettant de maintenir une performance stable et éviter les blocages ou les déséquilibres dans les équipements de conversion. De même, le prétraitement des résidus comme les coques d'anacarde peut s'avérer déterminant pour leur valorisation. Le prétraitement des coques d'anacardes consiste très souvent à un pressage visant à extraire le CNSL avant leur utilisation dans les technologies de conversion. Ce processus est essentiel pour réduire les émissions des composés organiques volatils et de gaz toxiques, contribuant ainsi à une valorisation plus propre. Il permet de minimiser les dépôts de résidus et la corrosion des grilles, réduisant ainsi les coûts de maintenance et prolongeant la durée de vie des équipements. L'extraction du CNSL, inflammable, améliore également la sécurité opérationnelle. Par ailleurs, le CNSL peut être valorisé dans la fabrication de résines, peintures et autres

produits chimiques, ou utilisés comme combustible dans les brûleurs, générant ainsi des revenus supplémentaires

- *Le transport* : une fois récoltée, la biomasse doit être transportée vers les sites de traitement. Le prétraitement consiste à l'acheminement de la biomasse vers les sites de prétraitement, stockage ou de conversion. Il peut être réalisé par voie routière, fluviale ou ferroviaire. Le choix d'un ou plusieurs modes de transport est fonction des caractéristiques de la biomasse, de la distance à parcourir et de la quantité à transporter [107]. A cette activité sont souvent associés le chargement et le déchargement de la biomasse dans les véhicules de transport. Le transport a une importante influence sur la rentabilité de chaîne de la biomasse. Il peut représenter près de 50% des coûts de l'approvisionnement de la biomasse [108]. Il est alors essentiel d'optimiser les itinéraires de transport pour réduire les coûts, minimiser les émissions de gaz à effet de serre et assurer une livraison rapide et efficace.
- *Le stockage* : à cause de la disponibilité saisonnière de certaines biomasses, les installations de stockage servent de zone tampon entre les périodes de récolte des diverses cultures et leur utilisation par les unités de conversion. En effet, la récolte se faisant sur une période définie de l'année, afin d'assurer un approvisionnement régulier des unités de conversion, il est indispensable de les stocker. Le stockage peut se faire en tas, en plein air, dans des silos, des hangars ou d'autres structures de stockage adaptées dans les champs, les sites de collecte, des sites intermédiaires ou sur les sites des installations de conversion. C'est un facteur essentiel de la chaîne logistique. Il doit garantir la préservation de la qualité de la biomasse en évitant la contamination, la dégradation et les pertes dues à l'humidité, à la pourriture ou à d'autres facteurs.

Chaque étape de la chaîne d'approvisionnement de la biomasse est cruciale pour assurer une transformation efficace, durable et rentable des matières premières en produits énergétiques ou dérivés.

II. Défis actuels des chaînes d'approvisionnement de la biomasse

Les chaînes d'approvisionnement en biomasse sont confrontées à plusieurs défis actuels qui nécessitent une attention particulière pour garantir leur efficacité, leur durabilité et leur rentabilité. Ces défis se résument tout d'abord à la question de la disponibilité et de la qualité de la biomasse qui est vraiment importante [109]. En effet, les fluctuations saisonnières, les conditions météorologiques extrêmes, les contraintes de récolte et les variations dans les flux de matières peuvent affecter la quantité et la qualité de la biomasse disponible pour la

transformation. Cela peut entraîner des problèmes de logistique, de planification de la production et de stabilité des approvisionnements. De plus, la logistique de transport constitue un défi majeur, en particulier dans les pays en développement, où les sites de récolte sont éloignés des sites de transformation et où les infrastructures de transport sont insuffisantes. Les coûts de transport, les émissions de gaz à effet de serre associées et les contraintes d'accès peuvent affecter la rentabilité et la durabilité des chaînes d'approvisionnement en biomasse. Un autre défi et non le moindre, réside dans la nécessité de développer des technologies polyvalentes, adaptables et optimisées qui puissent traiter plusieurs types de biomasse présentant des spécificités variables en fonction de la disponibilité saisonnière. Cela demande une approche intégrée et innovante qui prend en compte la diversité des matières premières biologiques et les contraintes opérationnelles associées à leur conversion en énergie. Par ailleurs, la concurrence avec d'autres utilisations de la biomasse (alimentation, matériaux, produits chimiques) soulève des questions sur l'allocation optimale des ressources [110]. En effet, une forte utilisation des ressources de biomasse dans ces secteurs concurrents pourrait limiter la disponibilité de la biomasse pour des fins énergétiques ou entraîner une augmentation des coûts, affectant ainsi les chaînes d'approvisionnement. À l'inverse, une focalisation exclusive sur l'exploitation rentable de la biomasse pour l'approvisionnement en énergie pourrait conduire à une surexploitation de cette ressource, compromettant l'autosuffisance des communautés et détériorant leur approvisionnement.

Il est crucial d'adopter une approche intégrée et stratégique dans la conception des chaînes d'approvisionnement en biomasse. Cela inclut l'utilisation de modèles de simulation pour prévoir la demande et optimiser l'allocation des ressources, ainsi que la diversification des sources de biomasse en exploitant les résidus et déchet organiques et en promouvant les cultures énergétiques sur des terres non adaptées à l'agriculture alimentaire.

III. Niveaux de décision dans les chaînes d'approvisionnement de la biomasse

Les chaînes d'approvisionnement sont structurées en plusieurs niveaux de décision pour optimiser l'efficacité et la réactivité des opérations. Ces niveaux de prise de décision peuvent être classés suivant le degré d'importance et l'horizon temporel en décision stratégique, tactique ou opérationnelle [111].

III.1. Niveau de décision « stratégique »

Les décisions au niveau stratégique concernent les décisions de planification à long terme (au moins une année) qui ont un impact durable sur la chaîne d'approvisionnement [102].

Il s'agit de déterminer les objectifs globaux et les orientations stratégiques de l'entreprise. Ces décisions incluent entre autres le choix des types de biomasse, des technologies de valorisation, de l'emplacement des usines et des centres de distribution, le choix des fournisseurs principaux, la conception du réseau logistique global, et la mise en place de partenariats à long terme [112]. En raison de l'importance capitale qu'elles jouent dans la mise en place des chaînes logistiques, plusieurs travaux se sont concentrés sur le développement et la mise en place des décisions stratégiques. Ainsi, J. E. Santibañez-aguilar et al., [113] ont développé un modèle d'optimisation stratégique pour la conception et la planification des chaînes d'approvisionnement de bioraffineries durables. Ce modèle implique le choix des emplacements des usines, des types de biomasse, des technologies de production et prend en compte les objectifs de la durabilité et plusieurs autres facteurs stratégiques. Afin d'assurer un approvisionnement efficace en biomasse pour la production de biocarburants à grande échelle, T. Lin et al., [114] ont développé un modèle stratégique permettant d'opérer des choix sur le nombre, l'emplacement et la capacité des installations ainsi que les schémas de distribution de la biomasse et des produits finaux. Un cas d'étude a été implémenté sur la production de l'éthanol dans l'Illinois. Dans la même optique, C. Cambero et al., [115] ont mis en place un modèle permettant la prise de décisions stratégiques sur l'emplacement, le type et la taille des technologies à installer, les produits finaux à produire, la quantité de matières premières à exploiter sur une période de vingt (20) ans. Le modèle a été appliqué en Colombie-Britannique pour la production d'électricité et de chaleur à partir de la biomasse forestière. En 2015, S. Samsatli et al., [116] ont proposé un modèle stratégique dénommé BVCM (Biomass Value Chain Model) permettant d'opérer des choix sur le nombre, les puissances et la localisation des technologies de conversion, les emplacements et les superficies des sites de production de la biomasse en tenant compte des aspects économiques et environnementaux. Une analyse structurée de l'état des lieux récent sur la planification stratégique à long terme des chaînes d'approvisionnement de la biomasse est présentée par S. Fichtner et H. Meyr [95]. Ils mettent en avant les diverses utilisations de la biomasse, ainsi que les perspectives de gestion de la chaîne logistique selon les contraintes de la demande et de l'offre. De plus, une analyse des modèles et des méthodes pour la planification stratégique des chaînes d'approvisionnement de la biomasse est réalisée.

III.2. Niveau de décision tactique

A ce niveau, les décisions se concentrent sur la planification à moyen terme, généralement sur une période de quelques semaines ou mois, et sur la mise en œuvre des stratégies définies

au niveau stratégique. Cela inclut la gestion des stocks, la planification de la production et l'optimisation des flux de transport [112].

Les responsables tactiques cherchent à équilibrer l'offre et la demande, à minimiser les coûts et à maximiser l'efficacité opérationnelle. Par exemple, ils peuvent décider de la quantité de stocks à maintenir pour chaque produit afin de répondre à la demande tout en réduisant les coûts de stockage. Ils doivent également coordonner avec les fournisseurs et les transporteurs pour garantir des livraisons ponctuelles et fiables. Généralement, les modèles tactiques sont des modèles multi-périodes [117]. Mais, un modèle mono-période sur une très courte durée (inférieure à un an) peut être considéré comme tactique [101]. En 2019, L. Camara [118] a développé un modèle destiné à examiner les décisions tactiques au sein des chaînes logistiques circulaires de biomasse. L'objectif était de créer un modèle plus efficace en s'appuyant sur les avancées récentes de la littérature. Par exemple, le modèle mathématique OPTIMASS a été mis en place par A. De Meyer et al., [119] pour optimiser les décisions stratégiques et tactiques dans les chaînes d'approvisionnement de la biomasse, considérant les variations des caractéristiques de la biomasse et la réutilisation des sous-produits. Il permet de prendre en compte les variations des caractéristiques de la biomasse et la réutilisation des sous-produits des unités de conversion. Un modèle de décision de niveau tactique a été proposé par Y. Wang et al., [120] pour optimiser les chaînes d'approvisionnement de multiples sources de biomasse, en incluant des aspects tels que l'établissement des approvisionnements en biomasse, la récolte, le stockage, le transport et le prétraitement : le modèle fut appliqué pour 13 Etats du nord-est des États-Unis. Dans les travaux de S. Akhtari et al., [121], est proposé un modèle intégrant les décisions stratégiques et tactiques pour optimiser les chaînes d'approvisionnement en biomasse forestière. L'intégration des décisions tactiques visait à analyser les variations à moyen terme de l'offre et de la demande de biomasse qui n'étaient pas généralement pas considérées dans les modèles antérieurs. Des modèles tactiques sont également développés dans de nombreux travaux tels que ceux présentés par S. Akhtari et al., N. Shabani and T. Sowlati, N. Geng and Y. Sun et S. Bairamzadeh et al., [122]–[125].

III.3. Niveau de décision opérationnel

Ce niveau concerne les décisions à court terme (quelques jours) et les activités quotidiennes [117]. Il résulte de la décomposition des décisions tactiques en opérations détaillées, impliquant une planification spécifique et une gestion quotidienne des activités. Les responsables opérationnels gèrent les processus de production, les commandes clients, et la logistique de distribution au jour le jour. Ils s'assurent que les produits sont fabriqués selon les spécifications

et livrés à temps aux clients. Les décisions incluent l'ordonnancement des tâches de production, la gestion des expéditions, et la résolution des problèmes quotidiens tels que les retards de livraison ou les défaillances de machines. Par exemple, ils peuvent ajuster le programme de production en fonction des commandes urgentes ou réaffecter des ressources pour faire face à une rupture de stock imprévue.

Dans le but de réduire les coûts de transport et le temps des déplacements, S. K. Han and G. E. Murphy [126] ont développé un modèle opérationnel pour résoudre un problème de planification des camions pour le transport de plusieurs types de biomasses ligneuses dans l'ouest de l'Oregon. Les résultats de l'implémentation de ce modèle ont permis de réduire respectivement de 18% et 15% les coûts de transport et le temps total de déplacement. De même, pour améliorer l'approche de prise de décision dans les exploitations agricoles de taille moyenne à grande, B. Recio et al., [127] ont proposé un modèle opérationnel permettant la programmation des tâches sur le terrain, l'analyse des investissements, la sélection des machines et l'analyse des coûts/bénéfices. En outre, une synthèse de la littérature sur les modèles de planification du transport de la biomasse forestière au niveau opérationnel a été réalisée par K. T. Malladi and T. Sowlati [128], mettant en évidence les limites des études antérieures et proposant des pistes d'orientation pour les travaux futurs. Bien que certaines études examinent les aspects opérationnels, la majorité vise à soutenir les décisions stratégiques et tactiques, en aidant à concevoir et à planifier efficacement les chaînes d'approvisionnement en biomasse, en tenant compte des incertitudes et des variables à long et moyen terme.

IV. Approches de modélisation des chaînes d'approvisionnement de la biomasse

La littérature indique l'existence de divers modèles et approches pour concevoir et résoudre les problèmes liés à la chaîne d'approvisionnement en biomasse [129]. Ces problématiques incluent la sélection optimale des technologies de conversion, les modes et moyens de transport, ainsi que la détermination du nombre et des capacités des sites de production et de traitement. Dans le domaine de la modélisation des chaînes d'approvisionnement en biomasse, deux approches prédominent : l'évaluation des performances et l'optimisation.

IV.1. Méthodes d'évaluation des performances

L'évaluation des performances se base sur plusieurs types de modèles, dont les calculs des coûts, les systèmes d'information géographique (SIG) et les modèles de simulation [101]. Les modèles basés sur les calculs des coûts évaluent le critère de performance en considérant le coût de production ou le profit total. Ils requièrent des données précises, et les coûts associés aux

différentes opérations, ainsi que les données cartographiques, sont souvent très élevés [117]. Les modèles basés sur les SIG se concentrent sur les aspects géographiques comme l'occupation des sols et les distances, offrant une vue d'ensemble et spatiale des réseaux de chaînes logistiques. Des études, telles que celle de K. Calvert [130], mettent en évidence l'utilisation des SIG dans la résolution des problèmes de chaînes d'approvisionnement des systèmes de bioénergie. Pour contribuer au développement des systèmes de valorisation des déchets en Alberta au Canada, M. Ullah et al., [131] ont élaboré un modèle SIG pour évaluer la disponibilité de la biomasse et identifier les emplacements des installations de conversion. Ils ont ainsi généré des cartes permettant de visualiser la disponibilité et la répartition des différents types de biomasse, ainsi que les potentiels de production d'énergie associés. En Chine, J. Cao et al., [132] ont mis en place un modèle SIG pour optimiser la collecte et le transport de la paille destinée à la production d'énergie. Ce modèle permet également de calculer les coûts de transport et d'optimiser les emplacements des stations de transfert et des usines de valorisation de la paille. En utilisant la méthode SIG, R. L. Graham et al., [133] ont estimé les implications économiques et environnementales de l'approvisionnement d'un Etat en une certaine quantité de matières premières spécifiques. Le système mis en place inclut les emplacements et le potentiel des sites de production de biomasse, ainsi que la variabilité spatiale de leur rendement et les coûts associés au transport et à l'achat de la biomasse.

En ce qui concerne les modèles de simulation (à temps continu et à événements discrets), ils tendent à simplifier le fonctionnement d'un système réel afin d'en déterminer les critères de performance. Dans le contexte de la logistique de la biomasse, ces modèles analysent les processus, calculent et évaluent les coûts, la consommation énergétique et les émissions de gaz à effet de serre (GES). Ils sont principalement utilisés pour prendre des décisions tactiques et opérationnelles, leur popularité étant largement due à leur flexibilité.

Malgré leur capacité à gérer des problèmes complexes, les modèles d'évaluation des performances ne sont pas adaptés pour aborder des questions d'optimisation [117].

IV.2. Méthodes d'optimisation

Les problèmes d'optimisation visent généralement à modéliser, analyser et résoudre, de manière analytique ou numérique, des questions de minimisation ou de maximisation d'une fonction sur un ensemble donné. Ces modèles, généralement basés sur la programmation mathématique, utilisent des variables de décision pour définir des contraintes et des fonctions objectifs à optimiser. L'évolution de l'électronique et de l'informatique a considérablement favorisé le développement et l'utilisation de ces modèles.

Les problèmes d'optimisation des chaînes logistiques de la biomasse ont fait l'objet d'études et de recherches depuis plusieurs décennies [134], avec pour objectif principal de maximiser l'efficacité et la durabilité de la production d'énergie à partir de la biomasse. Les critères de durabilité, incluant les aspects économiques, environnementaux et sociaux, sont souvent utilisés comme critères d'optimisation. N. Z. Atashbar et al., [102] ont réalisé une analyse des travaux récents sur les modèles d'optimisation, offrant un aperçu de la littérature, en mettant en évidence les avancées récentes, les défis actuels, et en proposant des pistes pour les recherches futures. Les modèles d'optimisation peuvent être classés suivant la nature des données d'entrée et le nombre critères à optimiser.

Suivant la nature des données d'entrée, on distingue les modèles déterministes et les modèles stochastiques. Les modèles déterministes sont des modèles de programmation mathématique utilisant des données connues et précises. Ces modèles comprennent les modèles de programmation linéaire (PL), de programmation linéaire en nombres entiers (PLNE), de programmation linéaire en entiers mixtes (MILP) et la programmation non linéaire (PNL). Les modèles MILP sont les plus répandus, mais les plus simples restent les modèles PL [104], [112]. Du fait de leur grande complexité, les modèles PNL sont moins utilisés. De nombreux chercheurs ont utilisé ces modèles dans la résolution des problèmes d'optimisation de la chaîne logistique de la biomasse. Par exemple, M. Saghae et al., [135], ont mis au point un modèle de programmation non linéaire stochastique en deux étapes (MINLP) avec une contrainte aléatoire pour réduire le coût total de la production d'électricité à partir de biomasse ligneuse dans une chaîne d'approvisionnement bioénergétique intégrée à quatre niveaux. Dans leur approche, les décisions stratégiques comme l'emplacement et la capacité de l'infrastructure sont prises en compte lors de la première étape, tandis que les décisions opérationnelles concernant l'approvisionnement en matériaux, la gestion de l'inventaire et des stocks sont incluses dans la deuxième étape. Dans les travaux de N. Shabani et T. Sowlati [123], un modèle PLN est proposé pour maximiser le profit total de la chaîne d'approvisionnement en biomasse forestière pour une centrale électrique. Dans le cadre de la mise en place de chaîne logistique de la production de biocarburant en Afrique de l'Ouest, Bambara et al., [136] ont développé un modèle d'optimisation MILP pour optimiser la durabilité de la production en utilisant de la biomasse cultivée (graine de jatropha) et sauvage (graines de balanites). Les résultats ont montré que la biomasse issue de culture énergétique était économiquement et environnementalement rentable que la biomasse sauvage. Dans le même sens, E. León-Olivares et al., [137] élabore un modèle MILP pour minimiser les coûts d'approvisionnement du bioéthanol. Le modèle permet de déterminer le nombre optimal ainsi que l'emplacement des sites de stockage, des usines de

mélange, de bioraffineries, mais également des flux de matières premières et de produits entre les différentes installations. Un modèle MILP est aussi proposé par J. Wu et al., [138] pour optimiser la conception stratégique d'une chaîne d'approvisionnement en agro-biomasse. Ce modèle vise à minimiser les coûts d'approvisionnement en agro-biomasse en proposant une conception optimale de la chaîne d'approvisionnement. De même, L. M. Reyes-Barquet et al., [139] ont élaboré un modèle MILP pour évaluer les conséquences économiques et environnementales de l'utilisation des déchets de biomasse dans la production d'énergie et leur intégration au réseau énergétique national. Ce modèle a été conçu en tenant compte de la maximisation du profit annuel et de la minimisation des émissions de gaz à effet de serre comme principaux critères d'optimisation.

Les modèles dits stochastiques sont des modèles extrêmement difficiles à résoudre et très peu utilisés dans les problèmes de la logistique de la biomasse. Ces modèles utilisent des données sur lesquelles existent des nombreuses incertitudes. Ils sont dits probabilistes. Une synthèse des travaux utilisant ces modèles dans les chaînes d'approvisionnement en biomasse a été proposé par I. Awudu et J. Zhang [140].

Suivant le nombre de critères à optimiser, un modèle d'optimisation peut être mono objectif (un seul critère est optimisé) ou multi-objectifs (plusieurs critères sont optimisés). Dans les modèles d'optimisation mono-objectifs appliqués aux chaînes d'approvisionnement en biomasse, le critère d'optimisation le plus utilisé est le critère économique. Il consiste généralement à minimiser le coût total ou à maximiser le profit total de toute la chaîne ou d'un ensemble d'étapes.

Pour minimiser le coût total pour une bioraffinerie, C. Ahn et al., [141] ont proposé un modèle déterministe permettant de déterminer les emplacements et les quantités optimaux de biomasse et de technologies à mettre en œuvre pour une planification à long terme. Afin de contribuer à l'intégration des bioénergies dans le mix-énergétique du Burkina Faso, F. Zoma et M. Sawadogo [14] ont proposé un modèle MILP permettant de minimiser les coûts de la chaîne logistique de la biomasse.

Ces dernières années, la conception des chaînes logistiques a évolué vers une approche durable intégrant les dimensions économiques, sociales et environnementales. Afin de prendre en compte ces paramètres de durabilité, les chercheurs ont recours à des modèles multi-objectifs. Allant dans ce sens, A. Al-Noweam et al., [142] ont étudié la conception d'une chaîne d'approvisionnement en bioéthanol à partir de déchets alimentaire en Egypte. Ils proposent un modèle multi-objectif prenant en compte les trois dimensions de la durabilité. En outre, [143] étudient un modèle multi-objectif pour maximiser le profit, l'énergie nette et minimiser les

émissions des GES dans les installations de biogaz en Malaisie. Le modèle a pour objectif de montrer aux usines de production d'huile de palme malaisiennes les avantages de l'intégration de la valorisation des déchets d'huile de palme en termes de durabilité. En Zambie, M. Kaoma et S. H. Gheewala [144] ont développé un modèle d'optimisation pour une chaîne d'approvisionnement en bioénergie, évaluant sa performance en termes de durabilité par rapport aux systèmes énergétiques existants. Les résultats ont montré que les systèmes bioénergies peuvent réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) tout en générant des économies financières. Un modèle MILP multi-objectifs a été élaboré également par M. Rabbani et al., [145] dans le but d'optimiser plusieurs aspects de la chaîne d'approvisionnement, tels que la capacité et l'emplacement de l'usine, les niveaux de stock, ainsi que les flux de matières premières entre les différentes étapes. L'objectif de ce modèle était de répondre aux objectifs économiques, environnementaux et sociaux de manière optimale. Au Chili, H. Fernández-Puratich et al., [146] ont mis en place un modèle bi-objectifs visant à optimiser l'approvisionnement en biomasse pour un système de production combinée de chaleur et d'électricité dans des environnements méditerranéens. L'objectif de cette étude était d'évaluer la viabilité économique et les avantages environnementaux du transport de différents types de biomasse vers la centrale de cogénération par rapport à leur élimination comme déchets.

Les problèmes d'optimisation multi-objectif sont souvent considérés comme étant NP-difficiles en raison de leur complexité combinatoire, de la multiplicité des objectifs, de leur nature non linéaire et de la notion d'optimalité de Pareto. Avec le grand nombre de variables et de contraintes, la recherche de solutions optimales parmi toutes les combinaisons possibles devient rapidement impraticable. De plus, la nécessité de considérer simultanément plusieurs objectifs contradictoires augmente la complexité. La nature non linéaire de nombreux problèmes d'optimisation multi-objectif rend également difficile l'application de méthodes traditionnelles basées sur la programmation linéaire. Enfin, la recherche d'ensemble de solutions de Pareto non dominées nécessite souvent des approches heuristiques ou avancées pour obtenir des solutions efficaces dans un temps raisonnable.

V. Méthodes de résolution des modèles d'optimisation

Les approches de résolution des problèmes d'optimisation peuvent être classées en deux grandes familles : les méthodes exactes et les méthodes approchées. La Figure 9 résume les principales approches de résolution utilisées.

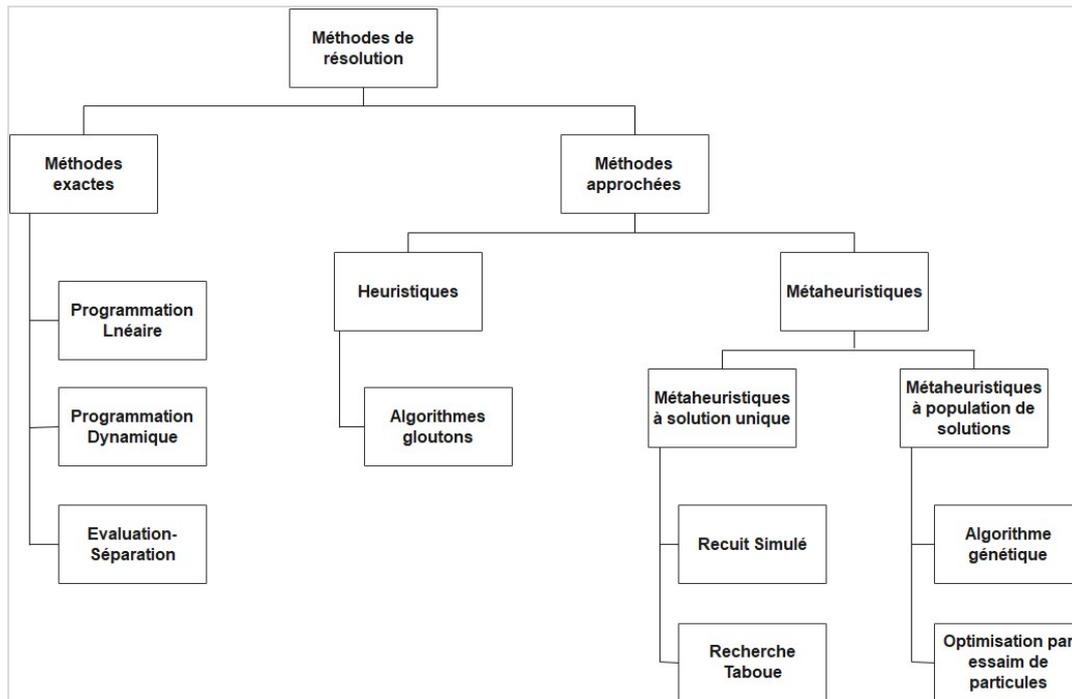


Figure 9 : Méthodes de résolution des problèmes d'optimisation

Les méthodes exactes sont fondées sur une exploration systématique de toutes les solutions possibles pour un problème donné, garantissant ainsi l'optimalité de la solution. Cependant, cette approche peut être très coûteuse en temps, limitant son utilisation aux problèmes de petite taille. Parmi les méthodes exactes les plus couramment utilisées, on trouve la méthode de séparation et évaluation, la programmation dynamique et la programmation linéaire.

En revanche, dans les applications réelles, les problèmes impliquent souvent plusieurs objectifs contradictoires à optimiser simultanément. Dans ces cas, les méthodes approchées sont préférées, offrant des solutions de compromis de qualité raisonnable pour des problèmes complexes. Ces méthodes se divisent généralement en deux catégories : les heuristiques et les méta-heuristiques. Les heuristiques visent à fournir rapidement une solution réalisable, même si elle n'est pas nécessairement optimale. Elles peuvent être spécifiques à un problème ou adaptées à plusieurs problèmes, elles sont appelées méta-heuristiques. Ces dernières utilisent une approche itérative pour équilibrer l'exploration et l'exploitation de l'espace de recherche, cherchant ainsi l'optimal global tout en évitant les optimums locaux.

De nombreux solveurs commerciaux, tels que XPRESS, CPLEX et LINGO reposent sur ces approches. Ils sont largement utilisés par les chercheurs pour résoudre une variété de problèmes de conception de chaînes logistiques, comme en témoignent plusieurs études récentes [113], [134], [147]–[149].

VI. Positionnement, hypothèses et questions de recherche

La majorité des études précédentes dans la littérature ont démontré que les filières biomasse-énergie peuvent être rentables et viables à grande échelle et dans des structures bien organisées. Cependant, lorsqu'on considère des échelles plus petites et moins structurées, comme celles observées, les questions logistiques ont souvent été négligées.

Le potentiel en biomasse au Burkina Faso majoritairement constitué de résidus agricoles et agro-industriels est encore largement sous-exploité. La biomasse agricole, produite directement dans les champs, est généralement très dispersée géographiquement, ce qui pose d'importantes contraintes logistiques pour son acheminement et son utilisation efficace. Déterminer des schémas optimaux de valorisation pour ce type de biomasse nécessite donc de surmonter des défis liés au transport et à la distribution des ressources, souvent disséminées sur de vastes zones rurales. Parallèlement, la biomasse agro-industrielle présente un potentiel plus concentré et facilement localisable, mais elle possède des caractéristiques spécifiques qui rendent nécessaire un choix attentif des méthodes de conversion. Sur le terrain, divers acteurs, tels que les PME et les industries locales, manifestent un réel intérêt pour la valorisation de ces résidus, afin de répondre à leurs besoins énergétiques de manière durable. Cependant, il manque des données d'aide à la décision pour les guider dans leurs choix. En l'absence de ces données, ces acteurs ne peuvent pas aisément évaluer les schémas logistiques optimaux, ni identifier les configurations technologiques les plus viables pour tirer parti de cette biomasse tout en respectant leurs contraintes spécifiques.

Le défi actuel consiste donc à concevoir des filières de biomasse-énergie de petite et/ou moyenne tailles, répondant aux besoins variés des acteurs locaux, et qui soient durables et économiquement viables. Pour relever ce défi, la modélisation de différentes configurations de chaînes de bioénergies offre une approche précieuse. Elle permet d'évaluer différentes configurations de chaînes afin de quantifier les ressources nécessaires, les coûts associés, la consommation d'énergie, et les impacts environnementaux, tout en identifiant les paramètres d'optimisation pour rendre les modèles existants plus efficaces. Bien que cette approche soit relativement peu coûteuse, elle requiert des modèles pertinents et des données fiables pour être véritablement utile.

Ce travail s'inscrit dans la recherche de solutions alternatives locales aux défis énergétiques actuels auxquels sont confrontées les entreprises et les acteurs des zones décentralisées. Son objectif est de contribuer à réduire les échecs des projets locaux de bioénergie en proposant un outil d'aide à la décision pour le choix de configurations de chaînes plus viables.

Les hypothèses scientifiques qui gouvernent cette étude sont :

- Première hypothèse : le Burkina Faso dispose d'un potentiel important en biomasse agricole et agro-industrielle pour la production de bioénergie ;
- Deuxième hypothèse : il existe des voies de conversion adaptées à ces biomasses, en fonction de leurs caractéristiques ;
- Troisième hypothèse : il est possible de définir plusieurs filières durables pour la valorisation énergétique de la biomasse au Burkina Faso.

Pour mieux guider les recherches, les questions de recherche suivantes ont été formulées :

- Question 1 : Quel est le potentiel de biomasse agricole et agroindustrielle réellement disponible pour une conversion énergétique au Burkina Faso ?
- Question 2 : quelles sont les voies de valorisation adaptées à ces différents types de biomasse ?
- Question 3 : quels sont les schémas optimisés et durables pour une meilleure valorisation des biomasses agricoles et agro-industrielles au Burkina Faso ?

Conclusion

Ce chapitre a fourni une vue d'ensemble complète sur la biomasse et ses chaînes d'approvisionnement, soulignant l'importance de cette ressource dans la transition énergétique. La définition et la classification de la biomasse, avec un focus particulier sur la biomasse lignocellulosique, ont permis de comprendre son potentiel énergétique et ses diverses applications. Les technologies de valorisation de la biomasse lignocellulosique, bien que prometteuses, sont confrontées à des défis techniques et économiques que nous avons détaillés tout en discutant des perspectives d'amélioration. En ce qui concerne les chaînes d'approvisionnement de la biomasse, nous avons identifié les principaux défis, les niveaux de décision et les approches de modélisation et de résolution, soulignant l'importance d'une optimisation efficace pour assurer la viabilité économique et environnementale de ces chaînes. Ce chapitre a ainsi établi les fondations nécessaires pour le positionnement de notre sujet de thèse, qui vise à proposer des schémas de valorisation durable de la biomasse au Burkina Faso. Le prochain chapitre abordera l'analyse des filières bioénergies au Burkina Faso.

Chapitre 2 : Analyse des filières bioénergies au Burkina Faso

Le développement des filières bioénergies représente une opportunité stratégique pour le Burkina Faso afin de diversifier son mix énergétique, renforcer la sécurité énergétique, et promouvoir un développement durable.

Dans un premier temps, le chapitre présentera le contexte général de la bioénergie au Burkina Faso. Cette section abordera l'importance de la bioénergie dans la politique énergétique nationale, ainsi qu'un aperçu des initiatives et projets en cours ou ayant été expérimentés.

Ensuite, une analyse détaillée des ressources disponibles pour la bioénergie sera effectuée. Cette partie identifiera les différentes sources de biomasse disponibles dans le pays, telles que les résidus agricoles, les déchets agro-industriels et les cultures énergétiques.

Le troisième volet abordera les technologies de conversion de la biomasse disponibles et utilisées au Burkina Faso. Les différentes technologies utilisées actuellement au Burkina Faso pour la valorisation énergétique de la biomasse seront présentées, en évaluant leur efficacité, leurs avantages et leurs inconvénients dans le contexte burkinabé.

Une analyse économique des filières bioénergies sera ensuite présentée, avec un focus sur les coûts de production. Cette section examinera également les opportunités économiques et les défis financiers associés à la mise en œuvre des projets de bioénergie.

Enfin, le chapitre se conclura par une discussion sur les défis et les perspectives de développement des filières bioénergies au Burkina Faso. Les principaux obstacles à surmonter, tels que les barrières technologiques, économiques et institutionnelles, seront identifiés, ainsi que les opportunités et les stratégies pour un développement durable et inclusif de la bioénergie dans le pays.

I. Contexte de la bioénergie au Burkina Faso

La biomasse représente la ressource énergétique la plus utilisée dans le pays, avec un potentiel exploitable estimé 2515 millions de mètre cube en 2015 [150]. Elle est constituée des déchets alimentaires, des résidus agricoles, des déchets issus des ménages, de la restauration et des industries agroalimentaires. Principalement utilisée comme combustible traditionnel, le bois est utilisé par près de 85,6% des ménages comme principale source d'énergie [151]. En 2019, la consommation de bois a été estimée à 6 448 800 tonnes, tandis que celle du charbon de bois atteignait 394 100 tonnes [152].

L'exploitation de la biomasse pour la production d'énergie électrique à grande échelle est encore à ses débuts au Burkina Faso. Les projets de conversion de la biomasse à grande échelle demeurent peu nombreux, principalement en raison de la faible pénétration des nouvelles

technologies de conversion dans le pays. Cette faible adoption résulte de divers obstacles, comme l'ont démontré F. Barry et al., [65] dans leurs travaux sur la gazéification. Ils identifient cinq grandes catégories de barrières à cette adoption que sont : les barrières techniques, économiques et financières, socioculturelles et organisationnelles, politiques, gouvernementales et institutionnelles, et écologiques et géographiques. Parmi ces catégories, les barrières les plus contraignantes sont celles d'ordre socioculturel, organisationnels, écologiques et géographiques, tandis que les barrières techniques, économiques et politiques jouent un rôle secondaire. Ainsi, malgré un potentiel énergétique important, le développement de la biomasse au Burkina Faso est entravé par des obstacles multiples. Ces défis (techniques, économiques, socioculturels, organisationnels et géographiques) influent sur l'ensemble du secteur, mais leur impact varie fortement en fonction de la taille et des moyens des acteurs impliqués.

D'un côté, les grandes entreprises du secteur, qui produisent leurs propres matières premières, disposent d'installations performantes et coûteuses, en service depuis de nombreuses années. Grâce à des technologies de pointe et à une maintenance spécialisée souvent importée, ces grandes installations assurent une production stable et fiable, permettant une exploitation continue et efficace de la biomasse.

En revanche, les petites unités de production, bien qu'intéressées par ces technologies, rencontrent des difficultés plus importantes. Ne pouvant satisfaire leurs besoins en matière première par leur propre production, elles peinent souvent à s'approvisionner en résidus. Elles sont également confrontées à la forte dispersion géographique des ressources, à la disponibilité limitée des résidus, et à des contraintes logistiques liées au transport. Ces obstacles s'ajoutent à des défis techniques, tels que l'inadéquation des équipements à leurs besoins spécifiques, une maîtrise limitée des technologies installées et des rendements insuffisants de certains équipements, très souvent de fabrication locale. Parmi les expériences prometteuses, il y a :

- La SN/SOSUCO (Société Nouvelle Sucrière de la Comoé) : Cette société sucrière située dans la région des cascades a une capacité de production d'environ 490 208 tonnes de canne à sucre par an et génère environ 122 552 tonnes de bagasse annuellement [153]. La bagasse produite est utilisée au niveau de l'usine comme combustible pour la production de l'électricité et de la chaleur. La société dispose à cet effet de trois (03) chaudières haute pression à biomasse et de trois turbines de 1700 KVA (1,36 MW) chacune. L'énergie produite est utilisée pour l'alimentation des broyeurs de canne à sucre et les autres organes de l'usine.

- La SN Citec (Société Nouvelle Huilerie et Savonnerie Citec) : société d'huilerie et de savonnerie, compte deux (02) chaudières à biomasse de capacité 2 tonnes par heure chacune. Ces chaudières produisent de la chaleur, mais également de l'électricité à partir d'un turbo-alternateur de 2,7 MW pour le process. L'énergie produite couvre environ 70% du besoin en énergie de l'usine. Ces chaudières utilisent les coques de coton produites à l'usine comme combustibles.
- FASO-biogaz : c'est une entreprise de méthanisation créée en 2012 avec une capacité de production de 275 kW électrique [154]. Ce projet résulte d'une collaboration entre le Burkina Faso et les Pays-Bas, ainsi que d'un partenariat entre le secteur public et le secteur privé. L'unité de valorisation exploite les résidus d'abattoirs et d'autres substrats organiques dans la ville de Ouagadougou. Elle produit environ 630 à 740 m³ de biogaz par jour. Le biogaz produit est ensuite transformé à l'aide d'une unité de cogénération en chaleur et en électricité. L'électricité produite est vendue à la Société Nationale d'Electricité du Burkina (SONABEL) et injectée sur le réseau électrique national via un poste de 15 kV. Le digestat est valorisé comme fertilisant sous la marque Nourrisol depuis 2016. L'entreprise ambitionne d'augmenter sa capacité de production à 550 kW dans les années à venir.

A côté de ces grandes expériences, se trouvent également quelques petites installations comme celles de la coopérative GUEBANA, de l'huilerie Tondé, de l'association Yanta, qui utilisent des pyrolyseurs de type H2CP (High Calorific Cashew Pyrolyser), ainsi qu'ANATRANS, utilisant des chaudières horizontales pour valoriser les coques de cajou en chaleur. La réussite de ces expériences suscite un engouement auprès de plusieurs promoteurs d'unités agroalimentaires. Aussi, depuis 2009, un programme national de bio digesteurs (PNB-BF) a été mis en œuvre avec pour objectif 100 000 installations d'ici à 2030. Ce programme a permis à la date 2022 de construire environ 15 978 bio-digesteurs dans tout le pays [8].

II. Analyse des principales filières

L'analyse de filière est perçue comme une méthode de segmentation et de modélisation simplifiée d'un système de production souvent complexe, permettant de décrire les flux physiques et financiers entre les différents acteurs [155]. Dans les filières bioénergie, l'aval de la chaîne requiert une attention particulière, car le produit joue un rôle essentiel en tant que facteur de production pour divers secteurs économiques. L'analyse de filière permet d'intégrer des considérations à la fois macroéconomiques et microéconomiques, d'examiner les options techniques pour chaque fonction de la filière, d'organiser les acteurs concernés et de prendre en

compte la dimension géographique des activités. Ainsi, la filière se révèle être un cadre d'étude pour identifier les facteurs critiques, analyser leur influence et fournir les éléments essentiels pour soutenir la prise de décision.

II.1. Filière bois-énergie

Les forêts du Burkina Faso couvrent une superficie de 8,6 millions d'hectares, représentant 31,6 % du territoire national. Ces forêts jouent un rôle essentiel dans le développement socioéconomique du pays, contribuant à environ 9,6 % du PIB, dont 5,3 % proviennent de la production de bois de chauffe [156]. Le bois-énergie est une ressource vitale, répondant à près de 95 % des besoins énergétiques du pays et 86 % de la consommation énergétique des ménages en milieu urbain [157]. En milieu rural, il demeure l'unique source d'énergie en raison du manque d'alternatives, tandis qu'en milieu urbain, son utilisation prédomine en raison des coûts élevés d'autres sources d'énergie.

Entre 2009 et 2019, la consommation de bois est passée de 4 809 000 tonnes à 6 448 800 tonnes soit une augmentation de 34.1% en dix ans. La consommation de charbon, quant à elle, est passée de 216 600 tonnes à 394 100 tonnes soit une hausse de 81,9% [152]. Cette tendance à la hausse est particulièrement notable dans les grandes villes, en raison de la croissance démographique, de l'urbanisation rapide et du faible pouvoir d'achat. La production actuelle de bois de chauffe, équivalente à environ 1 516 599 tonnes de pétrole (tep), est stratégique pour le pays, lui permettant d'éviter l'importation d'autres ressources énergétiques. Si le gaz butane était utilisé à la place du bois, cela entraînerait un déficit commercial d'environ 480 millions de dollars par an [156]. Cependant, la demande en bois-énergie, estimée à 9 693 132 tonnes en 2013, dépasse l'offre nationale de 9 166 319 tonnes, causant une déforestation rapide de 107 626 hectares par an, avec des conséquences environnementales graves.

Sur le plan socioéconomique, l'exploitation du bois-énergie est une source importante de revenus, particulièrement en milieu rural. La production de bois et de charbon génère annuellement environ 199 245 FCFA et 585 297 FCFA par producteur, respectivement [156]. Elle représente la principale source d'emplois formels après l'agriculture en milieu rural. Le bois-énergie est approvisionné par deux types de circuits : le circuit organisé et le circuit informel. Dans les circuits organisés, la production se déroule dans des forêts aménagées, suivant des directives techniques favorisant une exploitation durable. Le marché est structuré pour faciliter la distribution, assurée par des commerçants souvent regroupés en associations. Les circuits informels, qui sont les plus nombreux, sont caractérisés par un manque d'organisation, une exploitation dans des zones non aménagées et une faible prise en compte

des enjeux environnementaux et de durabilité. La fraude y est courante, rendant la perception des taxes difficile.

Selon le décret n° 98-306/PRES/PM/MEE/MEF/MCIA du 15 juillet 1998, les acteurs de la filière bois-énergie comprennent les exploitants (producteurs), les commerçants grossistes-transporteurs, et les commerçants-détaillants [158]. La Figure 10 illustre l'organisation des différents acteurs de la filière.

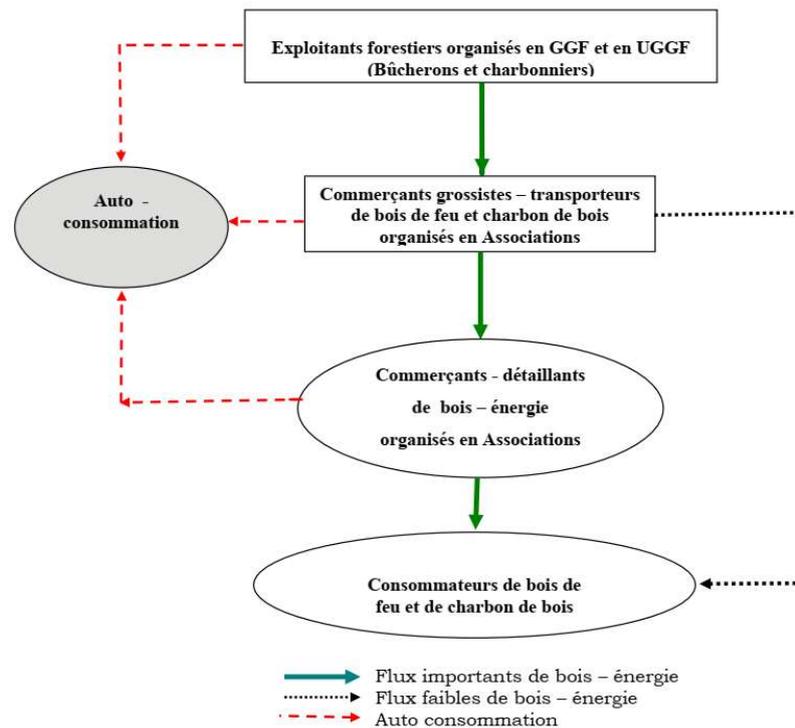


Figure 10 : Structure de la filière bois-énergie au Burkina Faso [158]

Les producteurs, regroupés en structures socio-professionnelles comme les Groupements de Gestion Forestière (GGF) et les Unions de Groupements de Gestion Forestière (UGGF), exploitent les bois dans les forêts aménagées et les fournissent aux commerçants grossistes-transporteurs. Ces derniers transportent et vendent le bois aux commerçants-détaillants, qui jouent le rôle de distributeurs. La chaîne valeur de la filière comprend environ 15 000 bûcherons, 1 708 charbonniers et 244 distributeurs [156].

Afin de garantir un approvisionnement durable et rentable, il est essentiel d'organiser les différents acteurs de la filière afin de mieux gérer les ressources forestières et d'optimiser la rentabilité économique. Cette organisation passe par une meilleure régulation des circuits informels et la promotion de pratiques d'exploitation durable, tout en sensibilisant les acteurs aux enjeux environnementaux et socioéconomiques.

II.2. Filière biomasse agricole pour la production de l'énergie

La biomasse agricole au Burkina Faso représente une source d'énergie renouvelable d'importance capitale, en particulier pour les zones rurales. Cette filière utilise les résidus agricoles tels que les tiges de maïs, de mil, de sorgho, etc., pour produire de l'énergie. La majeure partie de la production nationale est utilisée comme combustible dans les ménages ruraux, comme litière dans le secteur de l'élevage, ou comme compost pour l'amendement des sols [159], [160]. En plus de répondre aux besoins énergétiques des ménages, l'exploitation des résidus agricoles contribue à la réduction des déchets agricoles et à la protection de l'environnement.

La filière biomasse agricole-énergie joue un rôle crucial dans le développement socioéconomique du Burkina Faso. Elle génère des revenus supplémentaires pour les agriculteurs, qui peuvent vendre les résidus de leurs récoltes. De plus, elle crée des emplois dans la collecte, le transport, la transformation et la commercialisation de la biomasse. Cette filière soutient également la sécurité énergétique en diversifiant les sources d'énergie et en réduisant la dépendance aux énergies fossiles importées.

Cependant, il existe très peu d'études détaillées sur l'organisation de cette filière. Les observations de terrain montrent une filière informelle composée de producteurs (agriculteurs) qui jouent le rôle de fournisseurs, et des consommateurs (industries ou ménages) qui assurent la transformation ou l'utilisation. Ces acteurs assurent souvent eux-mêmes le transport de la biomasse. En raison de la faible pénétration des nouvelles technologies de valorisation de la biomasse, des contraintes logistiques liées à l'accessibilité et à la mobilisation, ainsi que des caractéristiques physiques et énergétiques de ces biomasses, leur utilisation en milieu urbain est très limitée. L'exploitation de la biomasse agricole pour l'énergie est principalement développée en zones rurales pour l'autoconsommation. De ce fait, il n'existe pas encore de véritable marché pour la biomasse agricole-énergie au Burkina Faso.

En dépit de cela, certaines initiatives de valorisation de la biomasse agricole en énergie, utilisant des technologies comme la gazéification, la combustion et le briquetage, montrent qu'une filière d'exploitation des résidus agricoles pour fins énergétiques pourrait émerger. Les principaux acteurs de cette filière sont les producteurs, les transporteurs, les transformateurs et les utilisateurs. La Figure 11 illustre la structure globale de la filière.

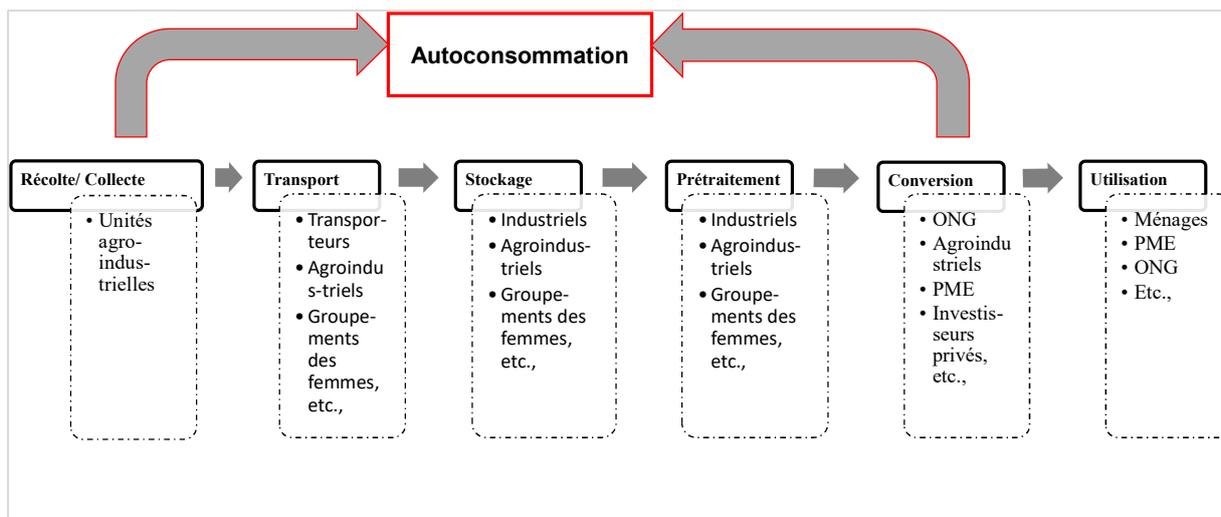


Figure 11 : Structure de la filière résidus agricole pour la production d'énergie

Les producteurs, généralement des agriculteurs, récoltent et collectent les résidus de leurs champs pour les fournir aux transformateurs. Ces derniers convertissent la biomasse en énergie ou en vecteurs d'énergie, qu'ils utilisent ou revendent aux utilisateurs finaux. Souvent, les producteurs assurent également le transport, car certains transformateurs n'achètent la biomasse qu'une fois livrée à l'usine. Dans certains cas, les producteurs doivent aussi réaliser un prétraitement, comme pour les tiges de coton destinées à la SN-Citec, qui n'acceptait que la biomasse déjà prétraitée. Divers moyens tels que des charrettes, des tricycles, des motos, des bicyclettes et des camions, sont généralement utilisés pour acheminer la biomasse des points de collecte ou de production vers les sites de valorisation.

Malgré les progrès technologiques, le développement de la filière de la bioénergie issue des résidus agricoles demeure limité en raison de nombreux obstacles. D'abord, le faible rendement de la ressource et sa forte dispersion géographique compliquent considérablement la récolte et la collecte de ces résidus. La dispersion des ressources implique des coûts logistiques associés à la collecte plus élevés, nécessitant souvent des déplacements sur de grandes distances pour obtenir des volumes exploitables.

Ensuite, la faible densité des tiges de cotonnier et autres résidus réduit l'efficacité du transport : leur transport en vrac est coûteux et nécessite un conditionnement adapté pour optimiser l'acheminement vers les sites de transformation. Enfin, l'insuffisance des infrastructures routières, surtout dans les zones rurales où se trouvent la majorité des résidus, pose un défi majeur en matière d'accessibilité. Ces obstacles cumulés freinent l'expansion de cette filière et soulignent la nécessité d'améliorations logistiques et infrastructurelles pour que la bioénergie devienne une alternative énergétique viable.

II.3. Filière d'exploitation des résidus agro-industriels pour la production d'énergie

Au Burkina Faso, les unités agro-industrielles sont variées et utilisent une gamme de combustibles en fonction de leurs besoins de transformation. Les huileries et savonneries, qui transforment des graines de coton, d'arachides, de sésame et de karité, utilisent surtout le bois de chauffe, le charbon de bois, et parfois les coques des graines de coton et les coques d'anacarde comme combustible. Les plus modernes optent très souvent pour le fioul ou les générateurs électriques. Les unités de transformation de fruits et légumes, telles que celles qui séchent les mangues, emploient souvent le gaz butane pour leurs séchoirs, tandis que les unités modernes ont recours à l'électricité. De même, les unités de décorticage de riz utilisent du bois, du charbon, et parfois les coques de riz comme combustibles, avec le soutien de l'électricité ou du diesel pour les équipements de traitement. Les brasseries et distilleries utilisent aussi du bois pour les besoins de transformation thermique, bien que les installations industrielles modernes puissent se tourner vers le fioul ou l'électricité. Dans les usines de canne à sucre, la bagasse est couramment utilisée pour produire vapeur et électricité, en rendant le processus partiellement autonome. Enfin, les abattoirs dépendent majoritairement du bois pour le fumage, tandis que l'électricité est indispensable dans la réfrigération. Ainsi, ces unités agro-industrielles, bien qu'essentielles au développement économique local, restent très dépendantes de sources de biomasse traditionnelle.

La biomasse agro-industrielle au Burkina Faso représente une source d'énergie renouvelable d'une importance capitale, particulièrement dans le contexte de la transition énergétique du pays. Cette filière consiste à valoriser les résidus des industries agroalimentaires, tels que les coques d'arachide, les coques d'anacarde, la bagasse de canne à sucre, les résidus de coton et les déchets de transformation des fruits et légumes. En exploitant ces sous-produits, la filière biomasse agro-industrielle contribue à la réduction des déchets et à l'optimisation des ressources disponibles, tout en offrant une solution énergétique durable.

La filière utilisant les résidus des unités de transformation agroalimentaire joue un rôle crucial dans le développement socioéconomique du Burkina Faso. Elle génère des revenus supplémentaires pour les industries agroalimentaires, qui peuvent vendre ou utiliser les résidus de leurs activités. De plus, elle crée des emplois dans la collecte, le transport, la transformation et la distribution de la biomasse. Cette filière soutient également la sécurité énergétique en diversifiant les sources d'énergie et en réduisant la dépendance aux énergies fossiles importées, renforçant ainsi la résilience économique du pays.

La cartographie de la filière montre deux types d'organisation : une filière courte et une filière longue [66]. Dans la filière courte, les résidus générés dans les unités agro-industrielles

sont directement réutilisés au sein desdites unités pour la production de chaleur ou d'électricité nécessaire au fonctionnement de leurs processus. Dans cette filière, les producteurs sont en même temps les utilisateurs, et très peu d'acteurs interviennent. C'est le circuit généralement observé dans certaines unités de transformation de l'anacarde où les coques sont réutilisées comme combustibles. Il y a aussi le cas des industries sucrières qui utilisent la bagasse et des huileries qui valorisent les coques des graines de coton pour la production de chaleur et d'électricité.

Le circuit long quant à lui est organisé autour de plusieurs acteurs : les producteurs, les transporteurs, les transformateurs et les utilisateurs. Les producteurs, qui sont les agro-industriels, produisent les résidus qu'ils vendent ou cèdent aux transformateurs pour la valorisation énergétique. Ces derniers, par l'intermédiaire des transporteurs, acheminent la biomasse jusqu'aux sites de transformation où elle est convertie en combustibles, en électricité et en chaleur. Les utilisateurs sont généralement les ménages et les industries agroalimentaires.

Les principales activités de la filière longue exploitant les résidus agro-industriels la collecte de la biomasse, le transport, le stockage, le prétraitement et la conversion. La structure de la filière est présentée dans la Figure 12.

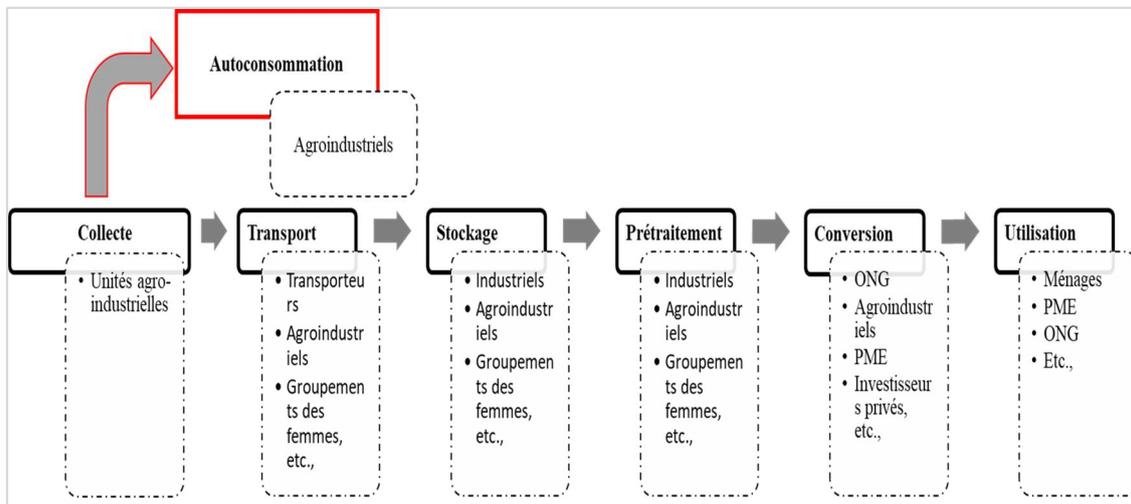


Figure 12 : Organisation de la filière biomasse agro-industrielle-énergie

Comme dans les autres filières, les différents acteurs assurent souvent plusieurs fonctions à la fois. On trouve des producteurs qui sont à la fois transformateurs et transporteurs, des producteurs qui prétraitent, des transformateurs/transporteurs, et des transformateurs/utilisateurs. Ce type de filière est principalement rencontré dans certaines unités de transformation de la mangue et des huileries exploitant les coques de cajou comme

combustible, ainsi que dans certaines unités de transformation de l'anacarde exploitant les résidus d'autres unités industrielles et les installations de production de briquettes.

Malgré ses nombreux avantages, la filière biomasse agro-industrielle doit surmonter plusieurs défis. Les techniques de transformation des résidus en énergie sont souvent inefficaces et coûteuses. De plus, la logistique de collecte et de transport des résidus des sites de production aux lieux de transformation pose des problèmes importants.

III. Technologies de conversion de la biomasse au Burkina Faso

Au Burkina Faso, les technologies de conversion de la biomasse sont en développement et leur adoption reste encore limitée. Différentes filières disposent de diverses technologies pour convertir la biomasse en énergie ou en biocombustibles. Pour mieux comprendre le sujet, des visites de terrain ont été effectuées. Elles ont permis d'identifier les principales technologies utilisées par les acteurs clés.

III.1. La Combustion directe et la cogénération

Ces technologies de conversion de la biomasse sont en plein développement au Burkina Faso et jouent un rôle important dans la valorisation des ressources locales. Principalement utilisées par les unités agro-industrielles, ces technologies permettent de convertir la biomasse en chaleur ou en électricité grâce à des turbines. Au cœur de ce processus se trouvent les chaudières, où le combustible est incinéré dans un foyer dédié, transférant efficacement la chaleur produite vers de l'eau pour générer de la vapeur ou de l'eau chaude sous pression. Les chaudières peuvent être de fabrication locale ou importée comme illustrée dans la Figure 13.

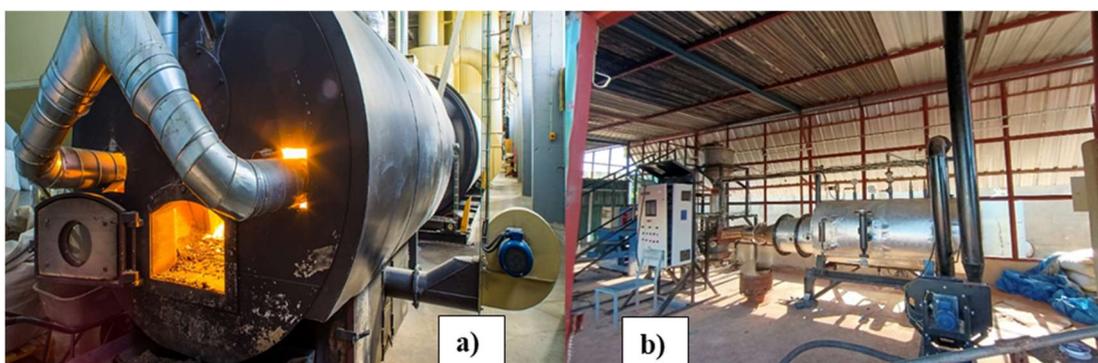


Figure 13 : a) Chaudière industrielle importée et b) chaudière de fabrication locale développée par Nitidae

Pour la production de l'électricité, la vapeur est dirigée vers une turbine à vapeur où elle se détend en passant à travers les pales, faisant tourner la turbine. Cette rotation convertit l'énergie

thermique de la vapeur en énergie mécanique. La turbine est couplée à un alternateur qui produit de l'électricité lorsque la turbine tourne. Après avoir traversée la turbine, la vapeur, désormais à une pression et température plus basses, est condensée en eau dans un condenseur. L'eau condensée est ensuite renvoyée dans la chaudière pour être de nouveau chauffée et transformée en vapeur, bouclant ainsi le cycle. Un appoint d'eau est nécessaire pour entre autres maintenir le niveau d'eau, assurer une production continue de vapeur, prévenir la surchauffe, éliminer les impuretés et réguler la température de la chaudière (Figure 14).

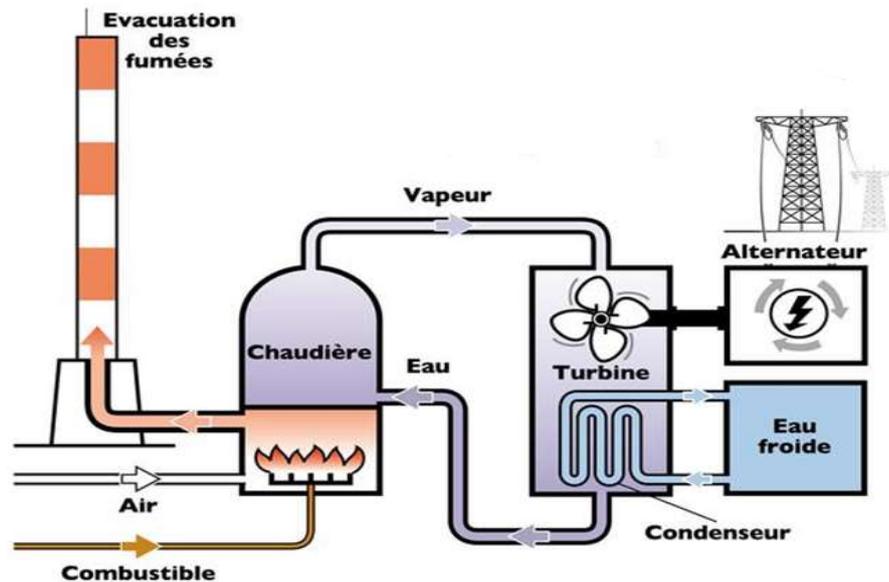


Figure 14 : Schéma de principe de la production d'électricité par combustion [161]

Les chaudières locales, fabriquées par des équipementiers locaux sont généralement de petite ou moyenne taille avec une capacité d'environ 4 kg/heure de combustibles, mais leur rendement reste relativement faible, autour de 20 % pour les modèles non calorifugés. Elles sont utilisées par certaines unités agroindustrielles telles que les huileries, et les unités de transformation d'anacarde pour la production de la chaleur. En revanche, les chaudières importées, comme celles utilisées par la SN Citec et la SN SOSUCO, ont des capacités et des rendements beaucoup plus élevés, étant essentielles pour les grandes unités industrielles. À la SN Citec, deux chaudières sont utilisées pour convertir les coques de coton en chaleur et en électricité. La première, de type BABCOCK, a une capacité de 8 tonnes par heure et est utilisée pour les processus internes. La seconde, de type MOCK, a une capacité de 15 tonnes par heure et alimente une turbine pour la production d'électricité. De même, à la SN SOSUCO, deux chaudières sont employées : l'une avec une capacité de 24 tonnes par heure et l'autre avec une capacité de 38 tonnes par heure. Ces chaudières sont essentielles pour la production de chaleur et d'électricité nécessaires aux opérations de l'usine.

Les principaux combustibles utilisés dans ces chaudières incluent les tourteaux de karité, les coques d'anacarde, les résidus agricoles, la bagasse, et les coques de graines de coton. Le coût d'investissement pour ces technologies varie considérablement : les chaudières de grande capacité nécessitent entre 30 et 50 millions de FCFA, tandis que les chaudières locales plus petites peuvent coûter à partir de 3 millions de FCFA. Pour les technologies de cogénération, l'investissement oscille entre 1 300 000 et 3 280 000 FCFA par kW électrique installé. Les avantages de ces technologies sont multiples. Elles créent des emplois, réduisent les coûts d'accès à l'électricité, augmentent l'autonomie énergétique et contribuent à la protection de l'environnement en réduisant les déchets et la déforestation.

III.2. Foyer à balle de riz

Ces petits foyers de fabrication locale sont spécialement conçus pour valoriser la balle de riz ainsi que d'autres combustibles poudreux tels que les copeaux et la sciure de bois. Composés de plaques de métal assemblées par soudure, ces foyers sont adaptés pour accueillir différents types de marmites, comme illustré dans la Figure 15 ci-dessous.



Figure 15: Foyer à balle de riz

Pour les utiliser, la balle de riz est placée à l'intérieur du foyer et allumée à travers les ouvertures prévues à cet effet. Lors de l'utilisation, lorsque l'intensité de la flamme diminue, il est nécessaire d'agiter les braises à l'aide d'une tige métallique introduite dans les orifices du foyer. Cela permet aux cendres de tomber, libérant ainsi de l'espace pour ajouter davantage de combustible afin de maintenir le feu actif. Cette technologie est principalement employée par les centres d'étuvage de riz et dans certains foyers domestiques.

Les coûts d'investissement associés à cette technologie sont relativement faibles, variant entre 25 000 et 75 000 FCFA l'unité, selon la taille et la qualité des matériaux utilisés. L'utilisation de ces foyers présente plusieurs avantages environnementaux et socio-économiques. En effet, elle permet de préserver les ressources forestières en remplaçant le bois

de chauffe par la balle de riz et d'autres résidus agricoles, tout en améliorant le revenu des opérateurs des centres d'étuvage qui réduisent ainsi leurs dépenses en bois.

III.3. Le pyrolyseur H2CP (High calorific cashew pyrolyser)

Développée en 2012 par l'ONG Nitidae pour des unités de transformation d'anacarde au Burkina Faso, cette technologie vise à valoriser les coques d'anacarde en chaleur et en biochar. La Figure 16 illustre la photo d'une installation de pyrolyseur H2CP.



Figure 16 : Pyrolyseur H2CP couplé à une chaudière

Fabriquée localement, elle est simple à exploiter et économiquement viable [162]. Initialement conçue pour la valorisation des coques d'anacarde, cette technologie s'étend désormais à toutes les filières nécessitant de l'énergie thermique, telles que le séchage de mangue, les huileries, et d'autres industries non alimentaires. Elle peut facilement être adaptée pour répondre à différents procédés, y compris la pyrolyse, la carbonisation, et la production de briquettes de charbon. Les rendements en gaz et en biochar sont estimés à environ 80% et 15%, et la capacité de production varie en fonction de la taille du four [162]. Cette technologie est largement adoptée dans les unités agroindustrielles de la zone de Bobo-Dioulasso. Les coûts d'investissement dépendent de la taille de l'équipement et se situent généralement entre 2 500 000 FCFA et 4 000 000 FCFA. Son utilisation permet de réduire les déchets et la désertification tout en améliorant les performances économiques des unités concernées.

III.4. Les Carbonisateurs

Les petits carbonisateurs représentent des technologies de fabrication locale utilisées spécifiquement pour la pyrolyse des coques d'anacarde. Introduite 2017 à la faveur du projet Switch Africa Green, cette technologie vise à valoriser les coques d'anacarde en biochar. Le dispositif comprend un four métallique, une grille pour la récupération du liquide de coque de noix de cajou (CNSL), et une cheminée pour l'évacuation de la fumée, comme illustré dans la Figure 17.



Figure 17 : Carbonisateur [162]

Avec un rendement global estimé à environ 10%, la capacité d'un carbonisateur atteint environ 100 kg de coques par jour. Le biochar produit peut être directement utilisé ou transformé en briquettes. Les coûts d'investissement sont d'environ 200 000 FCFA l'unité. Cependant, cette technologie reste peu développée en raison de son coût d'investissement relativement élevé. Pour une exploitation rentable, une batterie de 10 carbonisateurs est recommandée, représentant un investissement total de 2 000 000 FCFA, ce qui est souvent hors de portée pour de nombreux exploitants. De plus, le développement d'un marché pour le biochar constitue un défi supplémentaire à surmonter pour la pleine adoption de cette technologie.

En dépit de ces défis financiers, l'utilisation de cette technologie présente plusieurs avantages socio-économiques et environnementaux significatifs. Tout d'abord, elle contribuerait à réduire les volumes de déchets en valorisant les coques d'anacarde plutôt que de les laisser comme déchets non utilisés. De plus, elle pourrait stimuler les revenus des associations féminines impliquées dans la production de biochar et de briquettes, en offrant une nouvelle source de revenus provenant de la vente de ces produits. Enfin, l'adoption de cette technologie pourrait créer des emplois supplémentaires, en particulier dans les zones rurales où

la production d'anacardes est souvent concentrée, contribuant ainsi à dynamiser l'économie locale.

III.4. Les briqueteuses

Au Burkina Faso, il existe plusieurs initiatives de production de briquettes de biomasse utilisant diverses technologies. Les principales sont les presses manuelles, les presses motorisées, et les presses industrielles. Les presses manuelles à cric hydraulique et les presses motorisées, illustrées dans la Figure 18, ont été développées par l'ONG Nitidae.



Figure 18 : a) Presse manuelle et b) Presse motorisée

Elles permettent la production de briquettes à partir du tourteau de karité et du charbon de coque issus de la pyrolyse. Ces presses sont largement utilisées par les groupements de femmes et dans les unités de transformation artisanales et semi-industrielles de karité. La presse manuelle a une capacité de production de 160 kg de briquettes par jour, avec un rendement de 20 kg/heure. En comparaison, la presse motorisée produit environ 200 kg de briquettes par heure, soit dix fois plus que la presse manuelle. Les briquettes produites sont principalement utilisées pour les besoins de cuisson dans les foyers. Le coût d'investissement pour une presse manuelle est de 300 000 FCFA, tandis que celui pour une presse motorisée varie entre 1 000 000 FCFA et 1 500 000 FCFA.

Les presses industrielles, qui sont importées, ont des capacités de production allant de 1 à 2 tonnes de briquettes par heure. Le coût d'investissement pour ces machines est d'environ 6 millions de FCFA toutes taxes comprises. En raison de leur coût élevé d'investissement et d'exploitation, ces technologies sont encore très peu utilisées au Burkina Faso.

L'utilisation de briqueteuses pour la production de briquettes présente plusieurs avantages. Elle permet de réduire l'utilisation de bois de chauffe, particulièrement dans les unités de transformation de karité, favorisant ainsi la préservation de l'environnement. De plus, cette

activité crée des emplois et contribue à l'économie locale en développant une filière de production de charbon biologique.

La densification de la biomasse présente aussi des enjeux pour la logistique. Elle permet de réduire le volume du matériau tout en augmentant sa densité énergétique. Ce processus facilite le transport et le stockage en diminuant les coûts liés à la manutention et au déplacement des matières volumineuses sur de longues distances. En effet, une biomasse densifiée, sous forme de briquettes occupe moins d'espace, optimisant ainsi la capacité de chargement et réduisant les besoins en infrastructures de stockage.

III.5. La gazéification

La gazéification a été expérimentée au Burkina Faso à travers plusieurs projets et centres de recherche, tels que l'organisation néerlandaise de développement (SNV-Burkina Faso) avec le projet Gazoriz à Bama, l'ONG Atmosfair à Pô, et le laboratoire biomasse énergie et efficacité énergétique (LabEREE) à l'institut 2iE à Ouagadougou.

Parmi ces projet, on compte le projet Gazoriz dont l'objectif était d'améliorer la compétitivité du riz national et les conditions de vie des étuveuses de riz à Bama en introduisant des technologies et moyens adéquats pour la transformation du riz [163]. Dans ce cadre, un gazéificateur de balle de riz couplé à un alternateur de 40 KVA (25 kWe) a été installé pour la production d'électricité, permettant d'alimenter les décortiqueuses et autres équipements de la chaîne de transformation, qui auparavant fonctionnaient au diesel ou à l'électricité fournie par la coopérative d'électricité locale (COOPEL). Une autre installation comprenait deux mini gazéificateurs alimentant deux chaudières de 80 kW thermique pour la production de vapeur, utilisée pour étuver le riz paddy dans une batterie de huit marmites, remplaçant ainsi les foyers à balle de riz.

L'ONG Atmosfair avait mis en place un système de gazéification d'une puissance de 22 kW à Pô, destiné à fournir de l'électricité au centre médical avec antenne chirurgicale (CMA) de la ville. Quant à celui proposé par le LabEREE, il est à des fins expérimentales pour mieux comprendre la technologie et optimiser ses performances. La Figure 19 illustre quelques technologies de gazogènes utilisées sur le terrain.



Figure 19 : Quelques gazogènes utilisés : a) gazogène à Bama ; b) gazogène au LabEREE et c) gazogène à Po

Ces différentes technologies valorisent les résidus agricoles (tiges de cotonnier, de mil, de sorgho, etc.) et les résidus agroindustriels comme la balle de riz. Leur rendement en syngas est estimé entre 67 et 75%. Toutefois, ces systèmes nécessitent des investissements importants. Par exemple, pour le projet Gazoriz, le système de production d'électricité a coûté plus de 55 millions de FCFA, et celui de production de vapeur plus de 33 millions de FCFA [163].

L'utilisation de ces technologies offre de multiples avantages, notamment l'amélioration des conditions de travail des femmes en évitant leur exposition aux flammes et à la fumée, la préservation de l'environnement, la réduction de la dépendance énergétique, et l'amélioration du rendement de production des unités agroindustrielles.

III.6. Les biodigesteurs

La technologie de biodigesteur est bien développée au Burkina Faso, principalement grâce au Programme National de Bio digesteurs (PNB-BF). Cette technologie est déployée en milieu rural et péri-urbain, permettant de diversifier les sources d'énergie en fournissant du biogaz aux ménages et aux agro-industriels. Le biogaz produit est généralement utilisé pour la cuisson et l'éclairage.

Les bio digesteurs au Burkina Faso sont construits à partir de matériaux locaux par des maçons burkinabés, selon des modèles à dôme fixe et à dôme flottant, avec des volumes allant de 4 à 10 m³. Certains agro-industriels, tels que Gebana Afrique à Bobo-Dioulasso, ont expérimenté cette technologie pour valoriser les déchets de mangue. A la date du 31 Aout 2023, 16 140 biodigesteurs avaient été installés dans le pays.

Les biodigesteurs peuvent traiter divers types de déchets, notamment les déjections animales issues de l'élevage et les résidus agroalimentaires comme le tourteau de karité et les déchets de mangue. Cette technologie est l'une des plus maîtrisées au Burkina Faso. Les besoins

d'investissement varient en fonction de la taille du digesteur, de la nature et de la quantité de biomasse à traiter, ainsi que de l'application finale du biogaz. Les coûts d'investissement se situent entre 100 000 FCFA et 3 500 000 FCFA pour les bio digesteurs à dôme flottant et fixe. La plus grande installation de bio digesteurs au Burkina Faso est la centrale Faso Biogaz, avec une capacité de production installée de 275 kW. Les avantages socio-économiques et environnementaux de cette technologie sont nombreux. Par exemple, le PNB-BF a permis de former plus de 383 maçons et 150 entrepreneurs ruraux, et de créer 8 coopératives de maçons. Il a contribué à préserver 311 hectares de forêt et à séquestrer plus de 17 500 tonnes de CO₂ [164]. En outre, l'utilisation de bio digesteurs aide à lutter contre les maladies respiratoires liées à l'utilisation du bois comme combustible.

III.7. Les Foyers améliorés

Les foyers améliorés sont des équipements de cuisson offrant des rendements énergétiques supérieurs aux foyers traditionnels. Ils optimisent le transfert de chaleur à la marmite par convection et rayonnement, permettant une réduction de la consommation de combustibles allant jusqu'à 40 % par rapport aux foyers traditionnels [165]. Cette technologie a été introduite par l'État burkinabé pour réduire la consommation de bois de chauffe, face à la forte demande de combustibles. Plusieurs modèles de foyers améliorés ont été développés : le foyer Ouaga métallique, le foyer Burkina Mixte, le foyer multi-marmite, le foyer à 3 pierres amélioré, le foyer en céramique et le foyer Sewa.

Le foyer Ouaga métallique est la première génération de foyers améliorés métalliques. De forme cylindrique et fabriqué en tôle, il vise à offrir une grande surface de contact entre la marmite et la source de chaleur. Le foyer Burkina Mixte, développé par l'Institut Burkinabé de l'Énergie, est un modèle à usage mixte permettant l'utilisation du bois et du charbon de bois. Conçus en tôle, ces foyers sont fabriqués en fonction de la taille de la marmite à utiliser. Une des contraintes à la diffusion des foyers améliorés était que chaque ménage devait se doter d'au moins deux foyers améliorés pour la cuisine ou un foyer pour chaque taille de marmite, posant un défi économique et entravant leur diffusion massive. Pour répondre à ce défi, un modèle multi-marmite a été proposé. Il permet l'utilisation de plusieurs tailles de marmites et est le modèle le plus développé auprès des artisans.

Le foyer en céramique, fabriqué par des potiers avec de l'argile cuite à haute température, présente de très bonnes performances énergétiques et est plus économique que les autres foyers améliorés. Quant au foyer Sewa, originaire du Kenya, il est moins connu au

Burkina Faso. Conçu en métal avec une chambre de combustion en céramique qui joue le rôle d'isolant, ce foyer est très économe en charbon de bois (30%).

Le Tableau 4 ci-dessous présente les caractéristiques des différents foyers améliorés.

Tableau 4 : Caractéristiques des foyers améliorés (adapté de [166])

Modèle	Images	Matériaux utilisés	Rendement thermique (%)	Economie combustible (%)	Avantages
Ouaga métallique		Tôle	30	35	Grande surface de contact
Burkina mixte		Tôle	Bois = 35 Charbon de bois = 40 - 50	35	Polyvalence d'utilisation
Multi marmite		Tôle	25	30 - 35	Utilisation de plusieurs tailles de marmites
Céramique		Argile cuite à haute température	35	40	Haute efficacité énergétique, économique
Pierres améliorées		Argile, bouse de vache, paille	25	25 - 30	Economique, économe en combustible
Sewa		Tôle et argile cuite à haute température	50	30 - 40	Haute performance énergétique, économe en combustible

Ces foyers améliorés offrent diverses solutions pour améliorer l'efficacité énergétique et réduire la consommation de bois, tout en étant adaptés aux besoins économiques et pratiques des ménages burkinabés. Ils permettent également de lutter contre la pauvreté et de préserver

l'environnement. Cependant, la principale difficulté est l'inorganisation de la chaîne de valeur car les foyers améliorés ne dispose pas de chaîne d'approvisionnement dédiée [167]. Cela a conduit à l'introduction sur le marché de foyers de mauvaise qualité, au manque de réseaux de distribution permanents et d'entreprises pour assurer le service après-vente. En outre, le prix élevé des foyers améliorés et la résistance culturelle à leur adoption constituent des obstacles supplémentaires.

IV. Analyse financière des filières bioénergies au Burkina Faso

IV.1. Filière bois-énergie

L'analyse économique de la filière bois-énergie au Burkina Faso révèle une série de coûts et de bénéfices répartis de manière inégale parmi les différents acteurs impliqués. Les coûts de production incluent la collecte du bois, son transport vers les zones de transformation ou d'utilisation, ainsi que les frais de distribution. L'exploitation du bois procure un bénéfice net d'environ 50 700 FCFA pour le bûcheron sur la durée trimestrielle de la campagne d'exploitation [158].

Les différentes étapes de la filière montrent une répartition inégale de la valeur ajoutée. La valeur ajoutée pour le commerçant grossiste-transporteur est de 4 925 FCFA par an, comparée à 1 600 FCFA au niveau de la production. Le bénéfice moyen du grossiste-transporteur durant la campagne est d'environ 995 555 FCFA, avec une valeur ajoutée de 1 810 FCFA par stère de bois. Le bénéfice net mensuel moyen à ce niveau est de 27 769 FCFA. Pour compenser les revenus plus faibles, de nombreux détaillants associent la vente de charbon de bois à leur activité principale. Cependant, le maillon détaillant génère moins de revenus pour l'économie nationale comparé aux grossistes. La répartition de la valeur ajoutée est donc de 19% pour les producteurs, 22% pour les détaillants et 59% pour les grossistes.

Les prix du bois-énergie fluctuent en fonction de la disponibilité locale de la ressource, de la demande sur le marché et de la concurrence avec d'autres sources d'énergie telles que le charbon, le gaz et l'électricité. Entre 1985 et 1995, le prix du bois pour les consommateurs a augmenté de 28,54%, principalement en raison de l'élargissement des zones de collecte, ce qui a triplé les coûts de transport [168]. Cette augmentation reflète la raréfaction des ressources et souligne l'urgence de renforcer les moyens de contrôle et de définir des niveaux d'application efficaces et efficaces.

En résumé, bien que la filière bois-énergie présente des opportunités économiques significatives, sa rentabilité et sa durabilité dépendent de plusieurs facteurs, y compris

l'efficacité des chaînes logistiques, la régulation des prix, et la mise en place de politiques publiques favorables.

IV.2. Filières de valorisation énergétique des résidus agricoles et agroindustriels

L'analyse économique des filières biomasse agricole et agroindustrielle au Burkina Faso révèle une opportunité prometteuse mais complexe. Les résidus agricoles, tels que les pailles de céréales, les tiges de coton, et les résidus agroindustriels comme la canne à sucre, les coques d'anacarde et les déchets de mangue, offrent une source abondante et peu coûteuse de biomasse. Cependant, il n'existe pas encore de marché structuré pour ces résidus, et ils ne sont généralement pas vendus. Certaines industries concluent des partenariats pour se débarrasser de leurs déchets à un coût de 4000 à 8000 FCFA/tonne selon la taille de l'usine [169].

Bien que les résidus agroindustriels soient souvent donnés gratuitement, la biomasse agricole peut avoir des coûts associés. Par exemple, la SN Citec a proposé un prix de 45 FCFA/kg pour les tiges de cotonnier broyées, et le projet Gazoriz a proposé 16 400 FCFA/tonne pour les balles de riz [170]. Ces prix comprennent les coûts de récolte, de collecte et de transport de la biomasse.

La rentabilité des filières dépend de plusieurs facteurs techniques, économiques, institutionnels, socioculturels et organisationnels. Cependant, la logistique reste l'un des principaux défis pour la viabilité de ces filières. Les parts des principaux maillons de la logistique dans le coût de revient total de la biomasse au Burkina Faso sont respectivement de 15,29% pour la collecte, 31,85% pour le transport, 42,04% pour le prétraitement et 10,83% pour le stockage [66]. Il apparaît clairement que la maîtrise de ces facteurs est une nécessité pour une exploitation efficace et réussite de ces ressources. En outre, la fluctuation des prix du pétrole, le coût des technologies de valorisation, la concurrence des sources d'énergie alternatives, affectent également la viabilité économique de ces filières.

Bien que la demande pour l'énergie issue de la biomasse soit en croissance, ce secteur doit surmonter plusieurs défis. Contrairement au gaz butane domestique et au carburant à la pompe qui bénéficient de subventions et de soutiens publics [171]–[173], tout comme le secteur du solaires [174], il y a très peu de mécanismes de soutien pour l'énergie produite à partir de résidus. De plus, la disponibilité des résidus est influencée par les risques climatiques, ce qui accroît l'incertitude dans ce secteur. Cela souligne la nécessité de mettre en place des politiques publiques spécifiques, incluant des incitations fiscales et des subventions pour encourager et soutenir la filière de la biomasse énergie.

V. Défis et perspectives de développement des filières bioénergies

Les filières bioénergies au Burkina Faso font face à de nombreux défis. En ce qui concerne la filière bois-énergie, les difficultés incluent l'application inefficace des lois et règlements, entraînant des infractions sur les prix et les volumes produits, ce qui mène à la surexploitation des forêts et à la déforestation. Le manque de solutions de remplacement pour le bois de cuisine, la diminution de la production due à la déforestation et au changement climatique, ainsi que le faible développement des forêts privées sont également des problèmes majeurs. Les perspectives pour cette filière incluent l'amélioration de l'efficacité énergétique grâce à de nouvelles technologies (comme les foyers améliorés) pour réduire la demande, le développement de nouvelles sources d'énergie (biogaz, biochar, etc.) pour substituer le bois, et la promotion des investissements privés dans la foresterie privée. Ces initiatives nécessitent une amélioration des cadres réglementaires, notamment une relecture de la structure des prix pour améliorer la rentabilité de la filière.

Les filières biomasse agricoles et agroindustrielles rencontrent principalement des défis logistiques et organisationnels. Les coûts élevés des chaînes d'approvisionnement, liés à une mauvaise planification et à une structuration inadéquate des acteurs, rendent ces filières moins compétitives. De plus, les techniques de collecte et de transformation des résidus sont souvent rudimentaires et inefficaces. Ces filières manquent également de soutien institutionnel et financier pour se développer à grande échelle. Cependant, avec une gestion adéquate et des investissements ciblés, ces filières peuvent devenir une composante clé de la stratégie énergétique du Burkina Faso, contribuant à la réduction de la pauvreté, à la création d'emplois, et à la transition vers une économie verte et durable. La valorisation des résidus à grande échelle pourrait également améliorer la résilience des communautés rurales face aux changements climatiques.

Conclusion

L'analyse des filières bioénergies au Burkina Faso montre l'importance croissante de ce secteur pour répondre aux défis énergétiques du pays. La filière bois-énergie demeure prédominante en raison de la faible disponibilité des solutions alternatives et de son utilisation traditionnelle dans les ménages ruraux et urbains. Cependant, la surexploitation des ressources forestières contribue fortement à la désertification, soulignant la nécessité de pratiques de gestion durable. Pour pallier à cette situation, la filière biomasse agricole-énergie offre un potentiel considérable et une alternative grâce à l'utilisation des résidus agricoles. Cette filière pourrait non seulement répondre aux besoins énergétiques mais aussi contribuer à la gestion

des déchets agricoles. De même, la filière biomasse agroindustrielle-énergie, en exploitant les sous-produits des industries telles que la transformation du coton et des fruits, peut fournir une source d'énergie renouvelable et contribuer à la valorisation des déchets industriels. Bien qu'encore en développement, les cultures énergétiques représentent une opportunité pour diversifier les sources de bioénergie et promouvoir l'agriculture durable. Toutefois, leur expansion doit être soigneusement planifiée pour éviter les conflits d'usage des terres et garantir la sécurité alimentaire.

Les technologies de conversion actuellement employées au Burkina Faso, allant des méthodes traditionnelles de combustion aux techniques modernes telles que la gazéification et la digestion anaérobie, montrent une diversité d'approches pour valoriser les ressources en biomasse. Cependant, pour maximiser l'efficacité énergétique et minimiser les impacts environnementaux, il est essentiel de bien identifier le potentiel des différents résidus disponibles, afin de mieux dimensionner les installations. Une évaluation rigoureuse de ce potentiel permet non seulement d'optimiser l'usage des ressources, mais aussi de s'assurer que les capacités d'installation sont adaptées aux flux de biomasse disponibles sur le long terme.

Les filières bioénergies dans le pays font face à des défis importants, notamment le besoin d'un cadre réglementaire et politique favorable, l'accès aux financements, le renforcement des capacités techniques et institutionnelles, ainsi que l'acceptation sociale des nouvelles technologies. De plus, une organisation efficace des filières est nécessaire pour garantir un approvisionnement fiable et un fonctionnement harmonisé des acteurs. La réussite de ces filières repose donc sur plusieurs facteurs clés : l'adéquation des technologies aux spécificités des ressources locales, une évaluation précise des coûts pour éviter des échecs technologiques coûteux, et une structuration solide des chaînes d'approvisionnement, essentielle à la durabilité des projets.

Le développement des filières de bioénergie au Burkina Faso nécessite une approche intégrée et concertée. Une stratégie nationale claire, appuyée par des politiques cohérentes et des investissements ciblés, sera déterminante pour faire de ce secteur un levier du développement durable.

Dans le chapitre suivant, nous aborderons l'évaluation de la disponibilité de la biomasse pour la production d'énergie, une étape clé pour mieux dimensionner les projets et assurer leur succès.

Chapitre 3 : Evaluation de la disponibilité de la biomasse pour la production d'énergie au Burkina Faso

Comme expliqué dans le chapitre précédent, la bioénergie représente une opportunité pour la production d'énergie renouvelable au Burkina Faso. Cependant la construction de filières bioénergie durable nécessite une adéquation entre les besoins en énergie de chaque région et les ressources disponibles. Ce chapitre propose une analyse de la disponibilité de la biomasse pour identifier les ressources les plus adaptées à la production d'énergie. La démarche développée ici comprend une évaluation du potentiel global de biomasse, en tenant compte des différentes sources disponibles, telles que les résidus agricoles et les déchets agroindustriels. Ensuite, nous examinerons la répartition géographique de ces types de biomasse pour identifier les zones les plus favorables à leur valorisation énergétique.

A l'aide d'une approche d'aide à la décision multicritère, nous déterminerons les biomasses les plus appropriées pour à la production d'énergie, en s'appuyant sur six critères principaux : la disponibilité et l'accessibilité de la biomasse (DA), les utilisations concurrentes (UC), le potentiel de pollution (PP), l'impact économique (IE), le contenu énergétique (EC) et la disponibilité des technologies appropriées (DT). Enfin, une étude de sensibilité sera menée pour évaluer l'impact des variations des principaux critères sur la robustesse des résultats obtenus.

I. Approche pour l'évaluation du potentiel de biomasse agricole et agroindustrielle au Burkina Faso

Cette section décrit la méthodologie utilisée pour évaluer le potentiel des principaux résidus agricoles et agro-industriels du Burkina Faso.

Les résidus de cultures sont définis comme les parties non comestibles des plantes laissées dans les champs après la récolte. Ils peuvent également inclure les déchets produits par les usines de conditionnement ou rejetés lors du processus de conditionnement des cultures [175]. La quantité de résidus agricoles produite dépend de plusieurs facteurs tels que les conditions agro-climatiques, le type de culture et la zone de culture. Les principales cultures agricoles au Burkina Faso, en termes de superficie cultivée et de capacité de production, sont les cultures céréalières et les cultures de rente. Le Tableau 5 présente les principales spéculations et les différents résidus générés.

Tableau 5 : Principales cultures et sous-produits au Burkina Faso

Types de culture	Résidus ou sous-produits
Maïs	Raffles, Tiges et feuilles
Riz	Pailles, balles
Mil	Tiges, épis
Sorgho	Tiges, épis
Fonio	Paille
Coton	Tiges, coques des graines
Sésame	Tiges
Arachides	Fanes, coques
Soja	Fanes
Voandzou	Fanes
Igname	Epluchures
Niébé	Fanes

Les résidus agro-industriels regroupent les déchets ou sous-produits générés par les activités de transformation et de conditionnement des produits agricoles dans les industries agroalimentaires. Les principaux résidus agroindustriels rencontrés au Burkina Faso sont la balle de riz, les coques d’anacarde, les résidus du karité (coques, tourteaux et boues de barattage), les coques de graines de coton, la bagasse de canne à sucre, les coques d’arachide et les résidus de mangue (noyaux et épluchures).

Ces différents résidus sont généralement utilisés comme combustible de façon traditionnelle par la combustion pour les besoins d’énergie domestique, soit comme aliments pour le bétail, ou laissés sur les champs et brûlés. Cependant, ils constituent une ressource intéressante pouvant être valorisée pour la production d’énergie. Leur utilisation dans ce contexte alors nécessite une connaissance de leur potentiel réellement disponible et exploitable.

L’évaluation du potentiel énergétique des résidus prend en compte plusieurs paramètres essentiels, tels que la quantité brute des résidus produits, la proportion nécessaire à laisser sur les champs pour garantir la durabilité de l’exploitation (pour les résidus agricoles), ainsi que les autres utilisations concurrentes. Les quantités de biomasse sont déterminées en calculant le

potentiel théorique, le potentiel disponible et le potentiel énergétique [159], [176]. Les étapes de l'évaluation sont illustrées dans la Figure 20 ci-dessous.

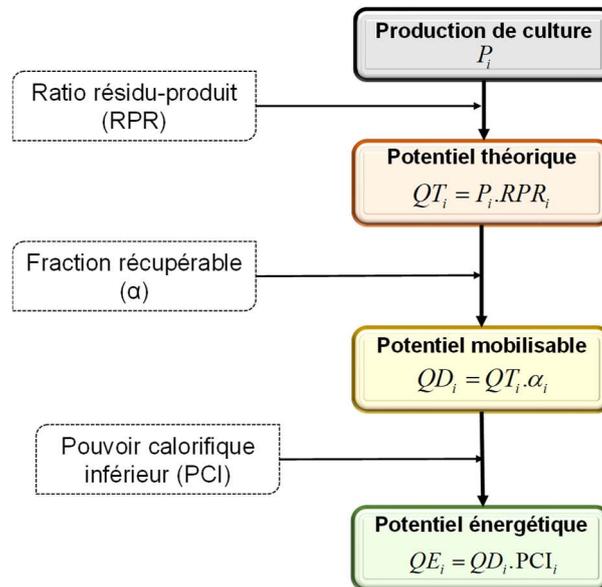


Figure 20: Etapes pour la détermination du potentiel énergétique des résidus agricoles et agro-industriels

I.1. Potentiel théorique des résidus

Le potentiel théorique désigne la quantité maximale brute de biomasse disponible après la récolte des produits ou leurs transformations. Ce potentiel est calculé en multipliant le ratio résidu/produit (RPR) par la production brute de la culture avant sa transformation pour les résidus agricoles, et après la transformation pour les résidus agro-industriels [176], [177]. Le RPR, qui est influencé par les pratiques agricoles, le rendement des cultures et les conditions pédoclimatiques, représente le rapport entre la quantité de résidus générée et la quantité de produit récolté [178].

Faute de données spécifiques aux cultures au Burkina Faso, les RPR utilisés dans la littérature pour les régions sahéliennes de l'Afrique de l'Ouest ont été adoptés. Le Tableau 6 ci-dessous synthétise les ratios résidus/produits considérés pour cette évaluation.

Tableau 6 : Ratio Résidu-Produits (RPR) de quelques cultures [153], [154], [170], [173], [174], [181]

Cultures	Résidus	RPR
Mil	Tiges	3,8
Maïs	Rafles	0,65
	Tiges et feuilles	1,5
Riz	Paille	2,8
Sorgho	Tiges	3
Coton	Tiges	2
Arachide	Fanes	2,2
Sésame	Tiges	1,5

Le potentiel théorique pour une culture i considérée est déterminé suivant l'équation (2) ci-dessous.

$$QT_i = P_i \cdot RPR_i \quad (2)$$

Avec : QT_i la quantité de résidus produite par la culture i après la récolte en tonne,

P_i la quantité de produit brut obtenu de la culture i après la récolte en tonne et,

RPR_i le ratio résidu/produit de la culture i

Pour les cultures évaluées (sorgho, mil, maïs, riz, coton, arachide et sésame), les données de production nationale et régionale proviennent des rapports du ministère en charge de l'agriculture [182], [183] et de l'Institut National de la Statistique et de la Démographie (INSD) [184]. Les moyennes de production nationale et régionale de ces cultures ont été calculées pour la période de 2018 à 2022 et sont résumées dans le Tableau 7 ci-dessous.

Tableau 7 : Production agricole moyenne nationale des cultures étudiées en tonne sur la période de 2018 à 2022

Régions	Sorgho	Mil	Maïs	Riz	Coton	Arachide	Sésame
Boucle du Mouhoun	312 078	287 990	241 671	63 824	179 468	60 602	56 223
Cascades	17 628	4 863	203 890	41 718	46 684	29 245	26 684
Centre	25 670	6 584	26 590	7 932	1	7 389	2 956
Centre-Est	119 187	27 292	137 224	58 316	41 681	47 662	21 556
Centre-Nord	169 361	67 903	12 312	13 163	276	22 701	8 171
Centre-Ouest	214 584	71 354	159 359	20 832	29 284	59 618	38 385
Centre-Sud	95 876	29 126	102 052	23 160	25 502	39 687	19 047
Est	224 129	71 877	91 624	50 876	44 002	45 767	60 299
Hauts-Bassins	123 815	37 508	559 181	6 9147	263 239	46 988	17 191
Nord	137 908	79 624	16 924	11 690	0	33 007	2 988
Plateau Central	109 908	28 704	42 059	13 231	3 456	16 298	11 460
Sahel	73 129	186 418	3 998	2 717	0	5 703	3 113
Sud-Ouest	106 892	30 776	146 729	14 378	52 038	18 937	4 620
Nationale	1 730 163	930 017	1 743 613	390 984	685 630	433 604	27 2697

Pour les résidus agro-industriels, les RPR présentés dans le Tableau 8 ont été utilisés. Les données de production ont été collectées à partir d'une veille bibliographique et auprès de certaines structures et associations d'interprofessionnelles comme l'Association interprofessionnelle mangue du Burkina (APROMAB), la Professionnelle de la Transformation de la Mangue du Burkina (PTRAMAB) ou l'Association Nationale des Transformateurs d'Anacarde du Burkina (ANTA-BF).

Tableau 8: RPR de quelques produits évalués[177], [181], [185]

Produits	Résidus	Ratio de transformation
Anacarde	Coques	2,1
Arachide	Coques	0,4
Riz	Balle	0,21
Canne à sucre	Bagasse	0,23

Au Burkina Faso, la majorité des mangues transformées sont utilisées pour produire des mangues séchées et de la purée de mangue. En l'absence de données précises sur la proportion des autres produits, seuls ces deux produits, présentés dans le Tableau 9 ont été utilisés pour estimer les résidus de mangue.

Tableau 9: Ratios pour la transformation de la mangue fraîche en mangue séchée et purée [186]

Produits	Ratio Fraîche-transformée
Mangue séchée	20 kg : 1 kg
Purée	2 kg : 1 kg

Les données montrent que la production de 1 kg de mangues séchées nécessite 20 kg de mangues fraîches, générant ainsi une quantité importante de déchets à gérer. De même, pour produire 1 kg de purée de mangue, il faut 2 kg de mangues fraîches. Les résidus de mangue sont constitués des noyaux et des épiluchures, représentant respectivement 39 % et 61 % de la masse totale de ces résidus [187].

Les données moyennes nationales et par région des cinq dernières années (2018 – 2022) sur les quantités transformation des produits étudiés sont consignées dans le Tableau 10 ci-dessous.

Tableau 10 : Quantités moyennes des produits transformés entre 2018 – 2022 par région en tonne [184], [188], [189]

Produits	Mangue séchée	Purée de mangue	Anacarde	Riz	Arachide	Canne à sucre
Boucle du Mouhoun				63824	60602	
Cascades	740,37		2711,6	41718	29245	500261,6
Centre	247,86		903,88	7932	7389	
Centre-Est				58316	47662	
Centre-Nord				13163	22701	
Centre-Ouest			129,12	20832	59618	
Centre-Sud				23160	39687	
Est				50876	45767	
Hauts-Bassins	2221,11	4230,6	9038,89	69147	46988	
Nord	9,657			11690	33007	
Plateau Central				13231	16298	
Sahel				2717	5703	
Sud-Ouest			129,127	14378	18937	
Nationale	3219	4230,6	12912,7	390984	433604	500261,6

Les données présentées illustrent les quantités moyennes de produits agricoles produits (Tableau 7) et transformés localement (Tableau 10) au Burkina Faso au cours des cinq dernières années (2018-2022). Une variation en dents de scie est observée dans la production de riz, d'arachide et d'autres produits agricoles selon les régions. Cette situation peut être attribuée à plusieurs facteurs : le faible rendement des cultures, une mauvaise pluviométrie, et surtout, la

situation sécuritaire actuelle du pays, qui rend la production pratiquement impossible dans certaines zones.

Par ailleurs, on note une augmentation significative des volumes de transformation des mangues et des noix de cajou par rapport aux années antérieures. Cette hausse est due, entre autres, à la modernisation et à l'augmentation des unités de transformation, à la bonne organisation des acteurs dans les différentes filières, et surtout, à la volonté de transformer localement les produits agricoles pour créer de la valeur ajoutée avant l'exportation. Cette dynamique répond également à la demande croissante du marché local et international.

I.2. Potentiel disponible ou mobilisable

La fraction du potentiel théorique qu'il est possible de prélever sans affecter les utilisations actuelles des différents producteurs de la biomasse et en respectant les droits d'accès et d'appropriation est appelée potentiel mobilisable ou disponible. Il est calculé à partir l'équation (3) ci-dessous :

$$QD_i = QT_i \cdot \alpha_i \quad (3)$$

Avec : QD_i le potentiel disponible des résidus de la culture i en tonne et

α_i la fraction récupérable basée sur plusieurs hypothèses d'utilisation des résidus.

Pour la production d'énergie à partir des résidus, une culture est considérée avantageuse si elle a une production importante de résidus, une faible concurrence par rapport aux utilisations et peu exploitée ou valorisée [190]. Les principales utilisations potentielles de la biomasse sont l'alimentation (humaine et animale), la bio fertilisation (amendement des sols), la production de matériaux (bois d'œuvre et le bois d'industrie) et la production d'énergie (biocarburants, chaleur, électricité). La Figure 21 illustre la hiérarchie des utilisations de la biomasse.

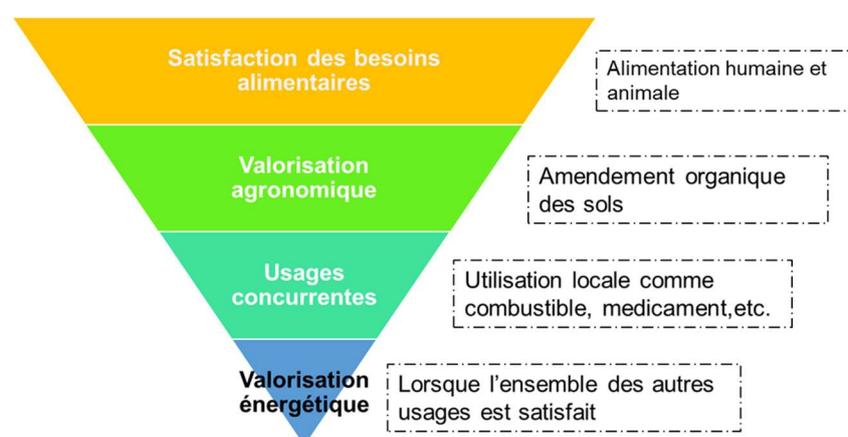


Figure 21 : Hiérarchisation des usages de la biomasse (adaptée de [191])

Ces usages sont potentiellement en concurrence, ce qui souligne la nécessité de les articuler autour d'enjeux environnementaux et socio-économiques. Ces utilisations concurrentes pourraient réduire la quantité de biomasse disponible pour la production de bioénergie [187], [192]. La durabilité de l'utilisation énergétique de la biomasse est possible que si le rendement énergétique est optimisé et que les différents usages sont bien articulés.

Selon les données de la FAO sur l'état des lieux et perspectives pour l'élevage des résidus agricoles et des sous-produits agro-industriels en Afrique de l'Ouest [160], plusieurs résidus de culture sont entièrement destinés à l'alimentation du bétail. Il s'agit des fanes des légumineuses et des épluchures des tubercules. Le Tableau 11 montre les proportions d'usages des différents résidus au Burkina Faso. En outre, on remarque que certains résidus agro-industriels sont déjà utilisés comme combustibles dans certaines unités agro-industrielles. Par exemple, la bagasse est entièrement exploitée par la SN SOSUCO, et les coques d'anacarde sont également de plus en plus utilisées dans les unités de transformation d'anacarde et de séchage de mangue.

Tableau 11 : Proportions d'usage des résidus agricoles et agroindustriels au Burkina Faso [159], [180]

Résidus	Proportion utilisée (%)	Utilisation
Tiges de coton	0	-
Tiges de mil et sorgho	100	Combustible, compostage, aliment bétail
Rafles et tiges de maïs	100	Combustible, compostage, aliment bétail
Fanes et coques d'arachide	100	Combustible, compostage, aliment bétail
Balle de riz	80	Combustible, litière
Coques d'anacarde	20	Combustible
Résidus de mangue	0	-
Bagasse de canne à sucre	100	Combustible

Des données du Tableau 11, seules les tiges de cotonnier, les résidus de mangue (noyaux et épluchures), 20% de la balle de riz et 80% des coques d'anacarde sont potentiellement disponibles pour une valorisation énergétique. Dans la suite des travaux, seuls ces résidus seront considérés. Toutefois, la matière organique du sol étant essentiel pour apporter des nutriments aux plantes et préserver les propriétés physiques du sol, retirer la totalité des résidus peut provoquer l'érosion et le compactage du sol [193]. C'est pourquoi il est nécessaire de laisser une portion de ces résidus sur place dans les champs. La quantité à laisser varie en fonction du rendement des cultures, de la qualité du sol et des méthodes de récolte utilisées [187]. Dans plusieurs travaux, cette quantité a été estimée à 0,75 t/ha [194], [195], tandis que d'autres

recommande 30% [196], [197]. La FAO recommande de laisser 25% pour les résidus agricoles et 0% pour les résidus agroindustriels [198]. Dans cette étude, les valeurs recommandées par la FAO sont considérées pour les calculs.

I.3. Potentiel énergétique

Le potentiel énergétique correspond au contenu énergétique des résidus du fait de leur pouvoir calorifique inférieur (PCI) et de leur teneur en matière sèche. Il est déterminé suivant l'équation (4) ci-dessous :

$$QE_i = QD_i \cdot PCI_i \quad (4)$$

Avec QE_i le potentiel énergétique brut des résidus de la culture i en MJ et

PCI_i le pouvoir calorifique inférieur des résidus de la culture i en MJ/kg.

Le Tableau 12 résume les PCI de quelques résidus de cultures et agroindustriels étudiés.

Tableau 12 : PCI des résidus étudiés

Résidus	PCI (MJ/kg)
Tiges de coton	17 [169]
Balle de riz	14,9 [39], [199]
Coques d'anacarde	21,3 [38], [200]
Epluchures de mangue	15,89 [201]
Noyaux de mangue	18,01 [202]

II. Analyse de la disponibilité de la biomasse en fonction de la répartition géographique

Cette section présente les résultats obtenus pour l'évaluation de la disponibilité des résidus agricoles et agroindustriels au Burkina Faso. Elle offre une analyse détaillée de la disponibilité de ces résidus ainsi que de leur répartition géographique sur le territoire national.

II.1. Résultats sur le potentiel théorique des résidus

La Figure 22 présente les résultats du potentiel théorique moyen des résidus agricoles et sur la période de 2018 à 2022 pour les 13 régions au Burkina Faso.

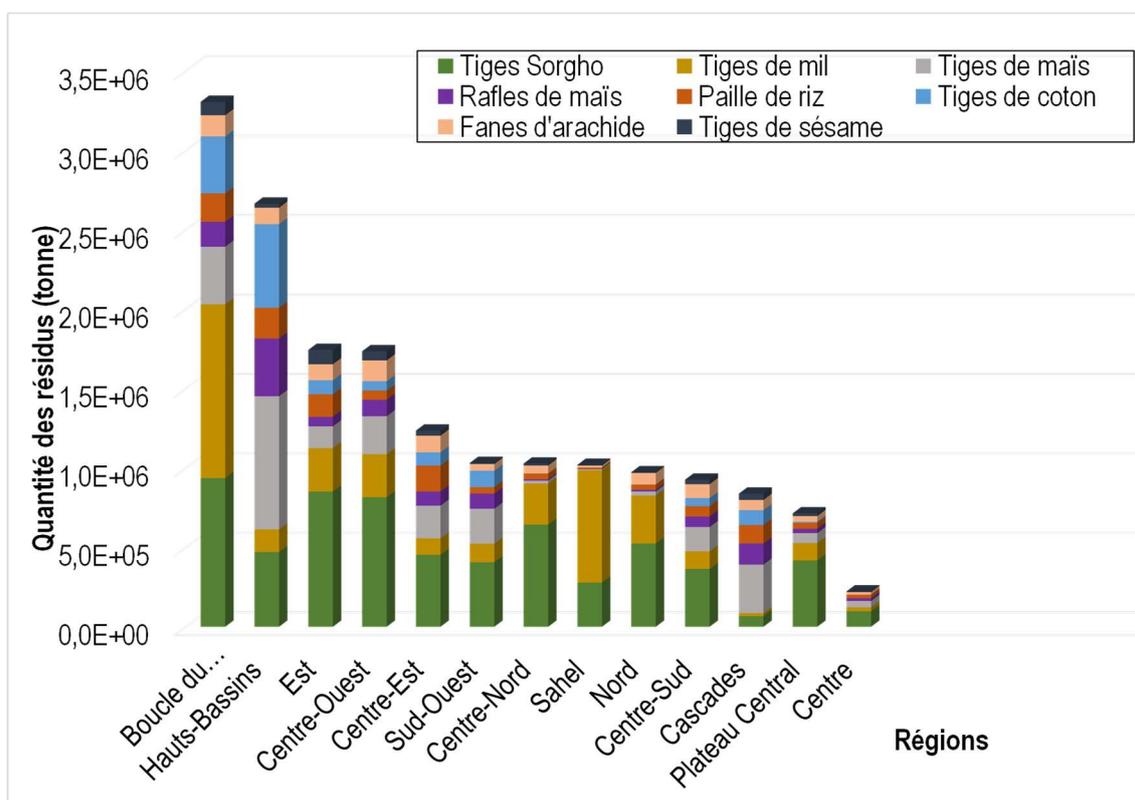


Figure 22: Potentiel théorique des résidus agricoles dans les 13 régions du Burkina Faso.

La répartition des différents résidus agricoles montre une diversité notable selon la région. Cette variabilité peut être attribuée aux fluctuations significatives de la quantité de résidus, lesquelles dépendent de la production agricole. La production est influencée par divers facteurs tels que les conditions agro-climatiques et pédologiques des différentes régions, les techniques agricoles adoptées et la nature des résidus considérés [203], [204]. De plus, les cultures de base varient selon les régions. Par exemple, une culture considérée comme une céréale de base dans une région est généralement produite en grande quantité pour répondre aux besoins de la population. L'analyse des résultats révèle une large domination des tiges de sorgho dans presque toutes les régions, soulignant leur importance dans l'agriculture burkinabè. Le sorgho est un aliment de base dans plusieurs régions, surtout en milieu rural. La production élevée de cette denrée pour satisfaire les besoins alimentaires génère une quantité importante de tiges de sorgho, représentant ainsi 37% des résidus agricoles au niveau national. Les tiges de mil et de maïs sont également présentes en quantités significatives, bien que faibles comparées aux tiges de sorgho, représentant respectivement 20% et 15% du total national des résidus agricoles. Certains résidus, tels que les tiges de coton, les fanes d'arachide et les tiges de sésame, sont moins répandus et varient davantage selon les régions. Les proportions des différents types de résidus agricoles pour chaque région sont présentées dans la Figure 23.

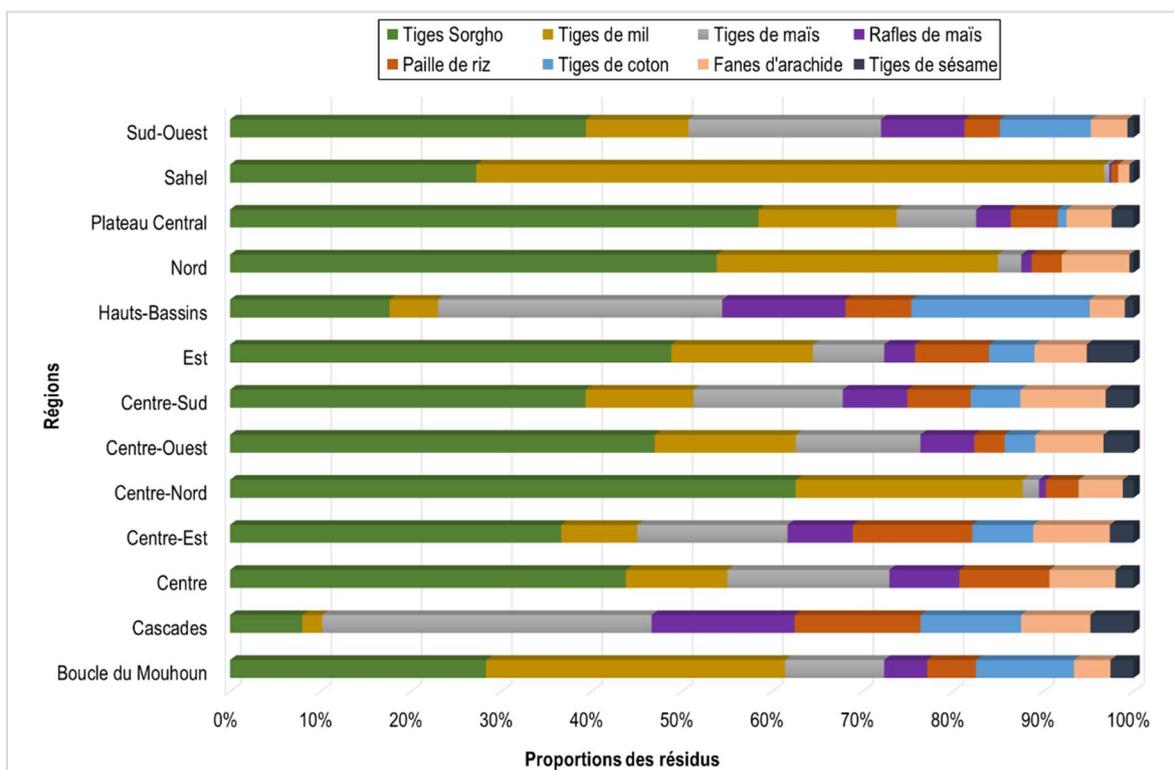


Figure 23: Proportions des résidus par région

Par exemple, les régions des Hauts-Bassins et de la Boucle du Mouhoun montrent une plus grande diversité de résidus agricoles, incluant des proportions notables de paille de riz et de tiges de coton. Dans les Hauts-Bassins, ces résidus représentent respectivement 7% et 20% des résidus agricoles, tandis que dans la Boucle du Mouhoun, ils représentent 5% et 11%. Sur le plan national, la contribution de chaque région dans le potentiel national est illustrée par la Figure 24.

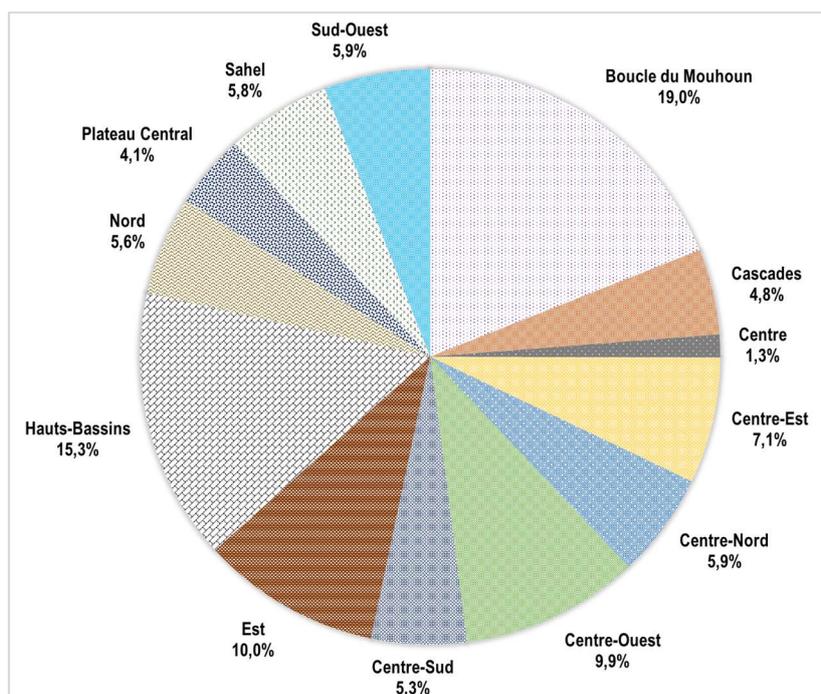


Figure 24: Part de chaque région dans le potentiel national

Les trois premières régions de production de résidus agricoles au Burkina Faso sont la Boucle du Mouhoun, en première position avec une contribution de 19%, suivie de la région des Hauts-Bassins avec 15,3%, et de la région de l'Est avec 10%. Ce sont également les régions les mieux arrosées du pays. Globalement, la production moyenne de ces cinq dernières années (2018-2022) est en hausse par rapport à la période précédente, principalement en raison de l'augmentation de la production de sorgho (41,81%) et de riz (12,28%) [205]. A la suite de ces trois régions viennent respectivement le Centre-Ouest avec 9,9%, du Centre-Est avec 7,1%, le Centre-Nord et du Sud-Ouest avec chacune 5,9%, le Région du Sahel avec 5,8%, le Nord avec 5,6%, le Centre-Sud avec 5,3%, les Cascades 4,8%, le Plateau-Central 4,1% et enfin la région du centre avec 1,3%.

En ce qui concerne les résidus agro-industriels, les résultats de la disponibilité théorique sont présentés dans la Figure 25.

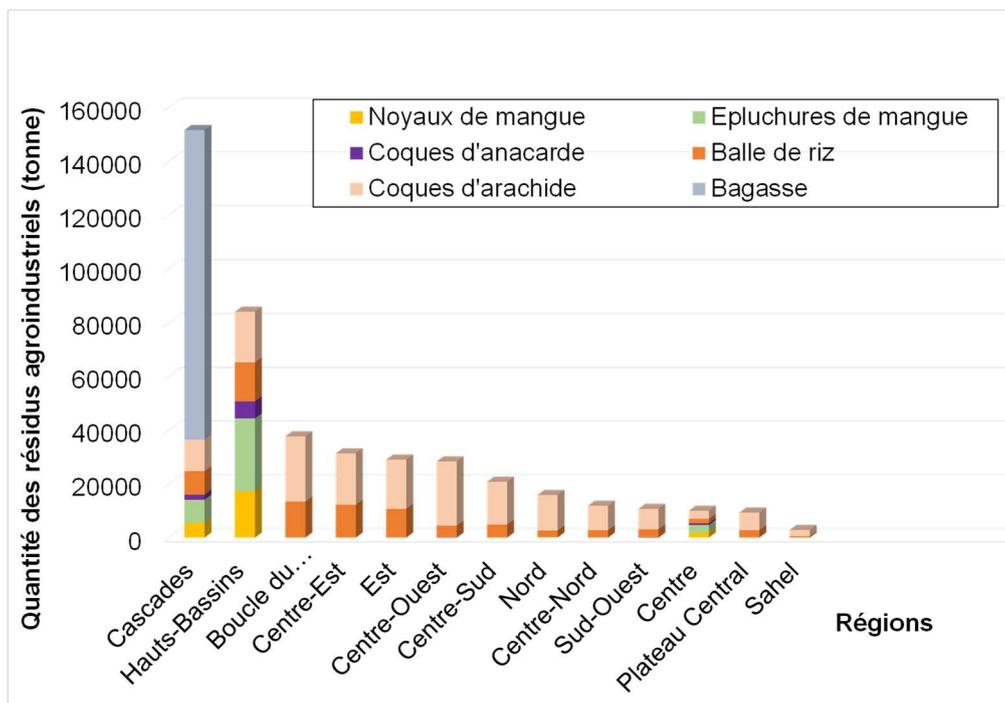


Figure 25: Potentiel théorique des résidus agro-industriels par région

Ces résultats montrent une répartition disproportionnée des résidus agro-industriels selon les régions, due à une distribution inégale des unités de transformation et au faible développement industriel. La majorité des régions manquent d'unités de transformation des produits agricoles, entraînant souvent l'exportation des produits à l'état brut.

A l'exception de la région des Cascades, les résidus agro-industriels sont principalement constitués de coques d'arachide et de balles de riz. Cependant, la mobilisation des coques d'arachide est difficile en raison de leur dispersion géographique. En dehors des coques d'arachide, la bagasse de canne à sucre est le principal résidu agro-industriel du Burkina Faso. Elle est produite dans la région des Cascades, où se trouve l'unique usine sucrière du pays, la SN SOSUCO, avec un potentiel moyen d'environ 115 060 tonnes entre 2018 et 2022.

Dans les régions des Hauts-Bassins, du Centre et des Cascades, on observe un potentiel significatif de coques d'anacarde et de résidus de mangue, en raison de la concentration des unités de transformation de ces produits dans ces régions. Par exemple, les Hauts-Bassins assurent près de 70% de la transformation de la mangue au niveau national, suivis par les Cascades (23%), le Centre (7,7%) et la région du Nord (0,3%) [189]. Pour la transformation de la noix de cajou, 80,94% des 21 unités de transformation existantes se trouvent dans les Hauts-Bassins, 14,28% dans les Cascades et 4,76% dans le Centre [188]. Paradoxalement, les principales zones de production de la noix de cajou sont les Cascades (42%), le Sud-Ouest (33%), les Hauts-Bassins (22%), le Centre (2%) et d'autres régions (1%) [188]. Les produits ne

sont donc généralement pas transformés dans leurs zones de production. Le potentiel moyen de résidus de mangue au niveau national est estimé à environ 63 276,3 tonnes (24 677,7 tonnes de noyaux et 38 598,5 tonnes d'épluchures), dont près de 70% proviennent des Hauts-Bassins. Les coques d'anacarde sont estimées à environ 9 038,8 tonnes, dont près de 6 327,22 tonnes provenant des Hauts-Bassins. La forte disponibilité des résidus dans les Hauts-Bassins s'explique par le fait que cette région est la capitale économique du pays, abritant de nombreuses industries agroalimentaires et disposant d'infrastructures que la plupart des autres régions ne possèdent pas. Globalement, la production des résidus agroindustriels a augmenté en raison de l'augmentation des capacités de transformation induite par les nouvelles politiques incitatives à la transformation locale des produits. Par exemple, la capacité de transformation de l'anacarde est passée de 13 500 tonnes par an en 2015 à 40 000 tonnes par an en 2021 [188]. Le Conseil Burkinabè de l'Anacarde (CBA) prévoit une augmentation à 90 000 tonnes par an dans les prochaines années pour répondre à la forte demande du marché en amandes. Cela signifie que le potentiel de coques d'anacarde augmentera considérablement dans les années à venir. De plus, la transformation des mangues au Burkina Faso est une activité en plein essor, avec des capacités de transformation en constante augmentation, en raison du potentiel du marché local et international.

II.2. Résultats sur le potentiel disponible des résidus

En tenant compte des usages concurrentiels des résidus agricoles au Burkina Faso, il apparaît que seules les tiges de cotonnier sont disponibles pour la production d'énergie. Concernant les résidus agro-industriels, seules la balle de riz, les coques d'anacarde et les résidus de mangue peuvent être exploités à des fins énergétiques. Le potentiel mobilisable de ces résidus est présenté dans la Figure 26 ci-dessous.

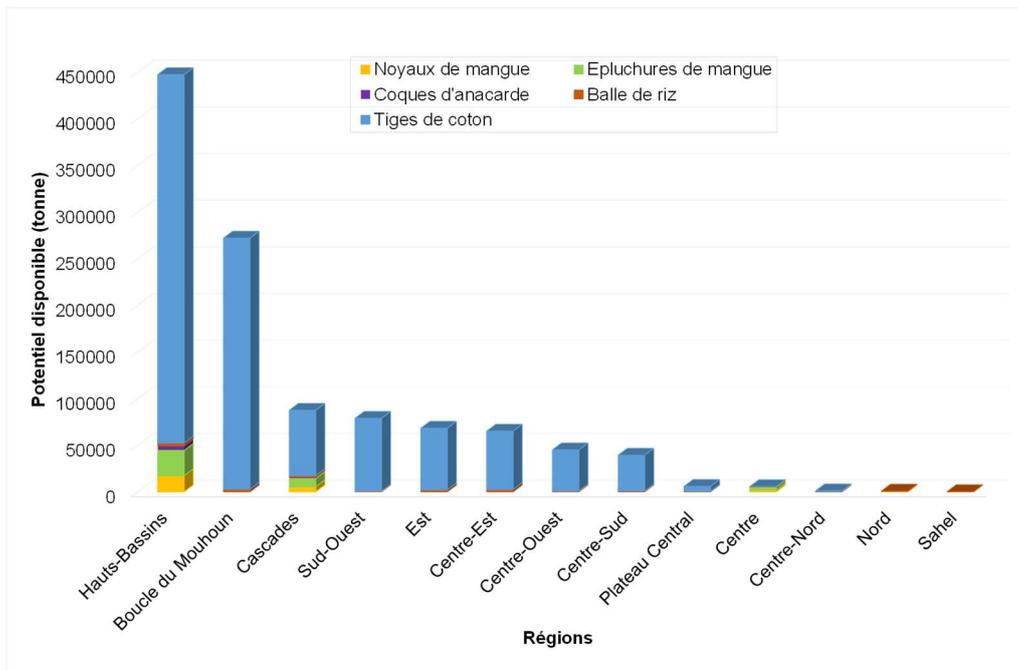


Figure 26: Potentiel disponible ou mobilisable des résidus agricoles et agroindustriel par région

L'analyse du graphique révèle que les tiges de coton représentent la plus grande part des résidus dans presque toutes les régions, avec des quantités particulièrement élevées dans la Boucle du Mouhoun (269 202 t), les Cascades (70 026 t), les Hauts-Bassins (394 858,5 t) et le Sud-Ouest (78 057 t). Les principales régions de forte potentialité de résidus agricoles et agro-industriels sont, par ordre d'importance, la région des Hauts-Bassins, la Boucle du Mouhoun, le Sud-Ouest et les Cascades. La région des Hauts-Bassins arrive en première position avec un potentiel total d'environ 447 140,8 t, dont 394 858,5 t de tiges de cotonnier. En plus de la quantité importante de tiges de coton, cette région produit également 17 283,4 t de noyaux de mangue, 27 033 t d'épluchures de mangue, 5 261,7 t de coques d'anacarde et 2 904,1 t de balles de riz. Cette forte potentialité est due à la forte concentration des unités agro-industrielles dans la région surtout dans la ville de Bobo-Dioulasso, la capitale économique du pays et à son statut de première région cotonnière du Burkina Faso. En deuxième position, la Boucle du Mouhoun dispose essentiellement de tiges de coton (269 202 t) et de balles de riz. La région du Sud-Ouest occupe la troisième place avec un potentiel principalement constitué de tiges de coton (78 057 t), ainsi que de petites quantités de balles de riz (603,8 t) et de coques d'anacarde (72,3 t). La région des Cascades est en quatrième position, avec un potentiel important en tiges de coton (70 026 t) et également en résidus de mangue (noyaux : 5 486,1 t, épluchures : 8 580,8 t), coques d'anacarde (1 518,53 t) et balles de riz (1 752,15 t).

Le potentiel national moyen des résidus est estimé à environ 1 115 375,24 tonnes pour la période de 2018 à 2022. Les balles de riz représentent 1,5 % de ce potentiel global, étant présentes en

quantités modestes dans la plupart des régions, mais pratiquement absentes dans le Centre-Est, le Nord et le Plateau Central. Les coques d’anacarde et les résidus de mangue, concentrés dans les Cascades et les Hauts-Bassins, constituent respectivement 0,6 % et 5,7 % du total des résidus.

II.3. Résultats sur le potentiel énergétique des résidus

Le potentiel énergétique étant fonction du pouvoir calorifique et de la quantité des résidus utilisés, il varie en fonction de la culture. Les résultats du potentiel énergétique des résidus agricoles et énergétiques sont consignés dans le Tableau 13 ci-dessous.

Tableau 13: Potentiel énergétique moyen des résidus disponibles au Burkina Faso entre 2018 et 2022 en tonne équivalent pétrole (tep).

	Noyaux de mangue	Épluchures de mangue	Coques d'anacarde	Balle de riz	Tiges de coton	Total
Boucle du Mouhoun				918,64	105257,98	106176,63
Cascades	2351,57	3245,14	769,81	621,35	28332,52	35320,38
Centre	787,26	1086,42	256,60	118,14	0,61	2249,03
Centre-Est				868,56	25296,20	26164,76
Centre-Nord				196,05	167,50	363,55
Centre-Ouest			36,66	310,27	17772,46	18119,39
Centre-Sud				344,95	15477,16	15822,11
Est				757,75	26704,81	27462,56
Hauts-Bassins	7408,32	10223,39	2566,02	1029,88	159759,75	180987,36
Nord	30,67	42,33		174,11		247,11
Plateau Central				197,06	2097,45	2294,51
Sahel				40,47		40,47
Sud-Ouest			36,66	214,15	31581,86	31832,67
National	10577,82	14597,27	3665,74	5823,33	416109,45	450773,62

L’examen des résultats du potentiel énergétique des résidus par région montre que la région des Hauts-Bassins regorge du plus gros potentiel estimé à 180 987,36 tep. Les tiges de cotonnier sont les plus grandes contributrices avec environ 159 759,75 tep suivies des épluchures de mangues 10 223,39 et des noyaux de mangues 7 408,32 tep. Elle est suivie par la Boucle du Mouhoun avec un potentiel de 106 176,63 tep, des Cascades avec 35 320,38 tep et du Sud-Ouest avec un potentiel énergétique de 31 832,67 tep. Dans toutes ces régions, les tiges de

cotonnier sont les principaux résidus contributeurs du potentiel énergétique. Les potentiels dans les autres régions restent non moins négligeables et montrent une diversité de sources de résidus, indiquant des opportunités pour des projets d'énergie renouvelable locaux.

Le potentiel énergétique total moyen des résidus agricoles et agro-industriels au Burkina Faso est estimé à 450 773,62 tep sur la période de 2018 à 2022. Ce potentiel est dominé par les tiges de cotonnier avec 416 109,45 tep suivies des épluchures et noyaux de mangue, de la balle de riz et des coques d'anacarde avec respectivement 14 597,27 tep, 10 577,82 tep, 5 823,33 tep et 3665,74 tep. Ces résultats montrent que le Burkina Faso pourrait envisager de développer des infrastructures pour exploiter ce potentiel, notamment dans les régions des Hauts-Bassins, de la Boucle du Mouhoun et des cascades où les potentiels sont les plus importants. Encourager l'utilisation des différentes sources de résidus disponibles dans chaque région pourrait être une stratégie pour une plus grande indépendance énergétique et une réponse aux enjeux climatiques.

III. Sélection de biomasse adaptée pour la production d'énergie

III.1. Critères et méthodes de sélection de la biomasse

Dans la littérature très peu d'étude se sont intéressées à la sélection des résidus de cultures et agroindustriels pour des fins de bioénergie. Pourtant, autrefois sous-exploitée, la biomasse agricole et agroindustrielle suscite un grand intérêt, notamment pour l'élevage et l'énergie domestique. Cet intérêt croissant pourrait compromettre ou limiter la disponibilité de la biomasse pour des valorisations énergétiques utilisant des technologies modernes. Pour des projets de bioénergie rentables et viables, il est très important d'élaborer des critères d'évaluation prioritaires afin de faire le meilleur choix possible de la biomasse à utiliser [206]. L'établissement de ces critères aide à identifier et éliminer les obstacles au développement des énergies renouvelables [207]. Ces critères doivent prendre en compte les facteurs économiques, environnementaux, sociaux et techniques et leur importance relative doit être déterminée. De nombreux travaux ont identifié divers critères pour la sélection de la biomasse, souvent en mettant l'accent sur la durabilité [208]. Par exemple, une étude de Doukas et al., [209] a identifié six facteurs influençant la disponibilité de la biomasse, tels que la demande alimentaire future et la disponibilité des terres. Un cadre de critères a été établi, incluant des thèmes comme les émissions de gaz à effet de serre et la biodiversité pour la sélection de la biomasse au Pays-Bas [210]–[212]. Par ailleurs, dans les travaux de Hoogwijk et al., [213] en Grèce, des études ont également intégré des critères techniques pour une évaluation plus efficace. Dans d'autres régions, comme la Thaïlande et l'Europe, des critères spécifiques ont été utilisés pour sélectionner la biomasse, prenant en compte l'efficacité, les coûts et les impacts

environnementaux [214], [215]. L'examen de la littérature révèle une pluralité de critères pour la sélection des biomasses appropriées. Cependant il est nécessaire de noter que ces critères sont généralement spécifiques à chaque région et projet, et doivent donc être adaptés au contexte spécifique de chaque analyse. Face à cette diversité des critères, les méthodes d'aide à la décision multicritère (MADMC) sont généralement utilisées pour résoudre ces problèmes complexes [208], [216]. Il donne un aperçu sur les critères et les méthodes MADMC dans sa section 2. On distingue deux grandes familles de modèles : les modèles simples (AHP, TOPSIS, PROMETHEE, etc.) et les modèles hybrides (combinaison de plusieurs MADMC).

Les modèles simples tels que AHP, TOPSIS, ELECTRE, etc., sont les plus utilisés pour les problèmes de décision, bien qu'ils présentent des limites [35,36]. Par exemple, la méthode AHP (Analyse Hiérarchique des Procédés) peut être imprécise lorsque le nombre de critères et d'alternatives est important ; il dépend de données qualitatives. La méthode de la technique d'ordre de préférence par similarité avec la solution idéale (TOPSIS), quant à elle, peut présenter des imprécisions dans la corrélation des critères. Certaines méthodes comme ELECTRE et PROMETHEE, nécessitent des outils supplémentaires pour finaliser les calculs. Chaque méthode simple a ses avantages et ses inconvénients. Pour améliorer leurs performances, certains auteurs préconisent leur hybridation c'est à dire la combinaison de deux ou plusieurs méthodes afin d'exploiter les avantages de chacune [217]. Une étude comparative entre AHP, TOPSIS et AHP-TOPSIS (méthode hybride) a montré que la méthode hybride était la plus efficace pour la classification, suivie de AHP et enfin de TOPSIS. En terme de temps d'exécution, TOPSIS était la plus efficace, suivie de la combinaison AHP-TOPSIS et enfin de AHP [218]. Les méthodes simples prises individuellement sont souvent moins efficaces que les méthodes hybrides [38]. La combinaison de méthodes simples permet de surmonter leurs limites et d'améliorer la précision des résultats. Cependant, la complexité des problèmes oblige souvent les chercheurs à rechercher des méthodes plus souples et plus simples.

Dans ce travail, visant à déterminer la biomasse la plus appropriée pour la production de la bioénergie au Burkina Faso, l'approche hybride AHP-TOPSIS a été adoptée. Sur la base d'une revue de littérature approfondie et des avis d'experts, six critères d'évaluation ont été définis pour analyser les alternatives potentielles. Ces critères prennent en compte les questions environnementales, techniques et socio-économiques. Il s'agit de critères globaux sous lesquels d'autres critères ou sous-critères peuvent être développés. Le Tableau 14 décrit les critères utilisés.

Tableau 14: Critères de sélection de la biomasse retenus pour l'évaluation

Critères	Description
Disponibilité et accessibilité de la biomasse (DA)	La biomasse sélectionnée doit être disponible en volume suffisant, sur des sites de production accessibles avec des possibilités d'augmentation du volume de production sur une courte période
Utilisation concurrente (UC)	La sélection d'une biomasse pour la production de l'énergie ne doit pas menacer ni l'approvisionnement en nourriture, ni les autres utilisations locales (approvisionnement énergétique, médicaments, matériaux de construction)
Potentiel de pollution (PP)	La valorisation de la biomasse sélectionnée doit contribuer à la réduction des incidences négatives de l'accumulation de cette biomasse sur l'eau, le sol, l'air et la biodiversité.
Impact économique (IE)	L'utilisation de la biomasse sélectionnée doit contribuer à réduire les pertes et manques à gagner et favoriser le développement de l'économie locale
Contenu énergétique de la biomasse (CE)	La quantité d'énergie récupérée lors la valorisation de la biomasse sélectionnée doit être intéressante
Disponibilité des technologies appropriées (DT)	La biomasse pour laquelle il existe des technologies de valorisation matures est préférée

En rappel, les résultats de l'évaluation des résidus au Burkina Faso ont montré que cinq résidus étaient disponibles pour une exploitation à des fins énergétiques. Il s'agit des tiges de cotonnier, des résidus de mangue (noyaux et épluchures) de la balle de riz et des coques d'anacarde. Ces cinq biomasses seront utilisées comme alternatives afin de déterminer la plus appropriée en fonction des critères prédéfinis et des technologies de valorisation existantes.

III.2. Collecte des données

Les données utilisées ont été recueillies par des entretiens à travers des questionnaires adressés à des experts dans le domaine de la bioénergie et par une analyse rigoureuse de la littérature. Cette approche a permis d'identifier six critères clés (voir Tableau 14) pouvant potentiellement impacter la sélection de la source de biomasse au Burkina Faso. Une fois les critères définis, des questionnaires (**Annexe 1**) ont été conçus et envoyés aux experts. Ceux-ci ont évalué les différents critères en utilisant l'échelle fondamentale de comparaison par paires de Saaty (Tableau 15). La méthodologie AHP a ensuite été appliquée afin d'évaluer l'importance relative de chaque critère.

Tableau 15: Echelle fondamentale de comparaison par paires de Saaty [219]

Langage	Abréviation	Valeur correspondante
Egaux	E	1
Modérément important	W	3
Plus important	FS	5
Vraiment plus important	VS	7
Absolument plus important	AS	9
Valeur intermédiaires	-	2, 4, 6, 8

Pour l'évaluation des alternatives, les données de la disponibilité (DA) sont tirées des résultats de l'évaluation des résidus effectuée précédemment. Les utilisations concurrentielles (UC) sont extraites de la littérature et des entretiens menés auprès des acteurs sur le terrain. La disponibilité des technologies (DT) provient d'un inventaire des technologies présentes dans le pays pour chaque type de biomasse. Les technologies identifiées sont la combustion, la gazéification, la pyrolyse, la méthanisation, le briquetage, le four à balle de riz et les petits carbonisateurs (Voir Chapitre 3, point III). Les contenus énergétiques (CE) des résidus sont issus de la littérature, tandis que l'impact économique (IE) est obtenu grâce à l'évaluation des experts. Le potentiel de pollution (PP) est déterminé en évaluant le potentiel de réchauffement global (PRG) des gaz à effet de serre (GES) produits lors de l'élimination d'une kilotonne de chaque résidu sur une année.

Au Burkina Faso, les tiges de cotonnier sont généralement brûlées dans les champs à l'approche de la saison hivernale, ce qui est une source importante d'émissions de méthane, de monoxyde de carbone, d'oxyde nitreux et d'oxyde d'azote [220]–[222]. Pour l'évaluation des GES, seuls le méthane (CH₄) et le protoxyde d'azote (N₂O) sont pris en compte [223]. Leurs différentes émissions sont déterminées suivant l'équation (5) [223]–[226].

$$Emission = Q_i * FE_i \quad (5)$$

Où *Emission* est la quantité de CH₄ ou de N₂O émise, *Q_i* est la quantité de biomasse brûlée, *FE_i* le facteur d'émission et *i* le type de biomasse brûlé.

Dans cette étude, l'évaluation est réalisée sur une unité de biomasse pour maintenir l'indépendance des critères. Les FE considérés sont de 3,3g/kg pour le méthane [227] et de 0,07 g/kg pour le N₂O [223].

Pour les résidus agroindustriels, le mode de traitement le plus répandu au Burkina Faso est généralement la mise en décharge [162]. Cette méthode engendre une forte production de méthane en raison de la dégradation de la matière organique par les micro-organismes. L'émission du méthane dans ces conditions est déterminée suivant l'équation (6).

$$CH_4(kton / an) = Q * MDF * DOC * DOC_F * F * 16 / 12 \quad (6)$$

Avec Q la quantité de biomasse mise en décharge, prise pour une unité, MDF est le facteur de correction du méthane, qui corrige la fraction des déchets se décomposant dans des conditions anaérobies ; il a été pris comme 0,4 [226]. DOC est la fraction de carbone organique dégradabile, fixé à 0,15 pour les épluchures de mangue (valeur par défaut pour les déchets alimentaires), 0,5 pour la balle de riz et les coques d'anacarde, et 0,43 pour les noyaux de mangue. DOC_F est la fraction de DOC qui est convertie en gaz de décharge, prise à la valeur par défaut de 0,77 [226]. F est la fraction de méthane dans le gaz de décharge, avec une valeur par défaut de 0,5 [223], [228].

Ensuite, les différents gaz ont été convertis en kilotonne équivalent CO_2 . Les PRG du méthane et de l'oxyde nitreux utilisés sont respectivement de 25 et 298 [224]. Concernant les attributs des critères, l'UC est meilleure lorsque sa valeur est plus petite, mais pour les autres critères, plus leur valeur est grande, mieux c'est.

III.3. Méthode AHP-TOPSIS

La méthode hybride AHP-TOPSIS est utilisée pour déterminer la meilleure alternative (biomasse). Les procédures de l'approche AHP-TOPSIS sont décrites dans la Figure 27.

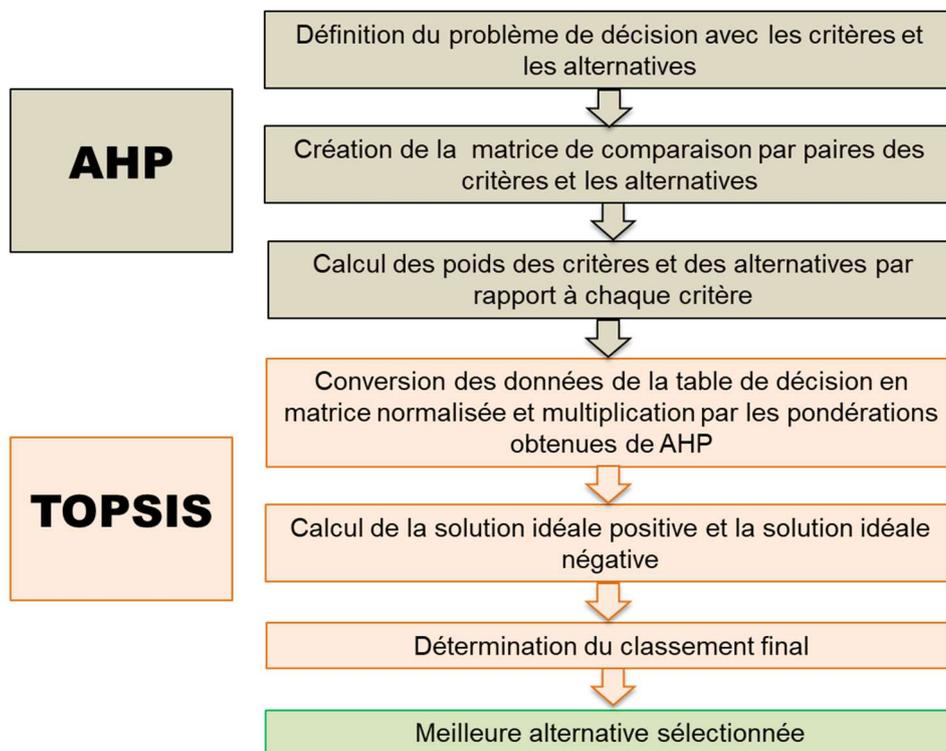


Figure 27: Etapes de l'application de la méthode AHP-TOPSIS (adaptée de [218])

La méthode AHP est utilisée pour fournir l'ordre et l'ampleur des préférences des critères ainsi que la cohérence des données. La matrice de comparaison a été remplie en utilisant la technique de la moyenne géométrique décrite par Buckley [69] pour mettre en commun les différents scores fournis par les experts. La formule est décrite par l'équation (7) ci-dessous.

$$ri = \left(\prod_{i=1}^m a_{ij} \right)^{1/m} \quad (7)$$

Où m est le nombre des répondants.

La consistance de la matrice utilisée est déterminée par le calcul du ratio de consistance RC suivant l'équation (8) ci-après définie par Saaty [219].

$$RC = IC / RI \quad (8)$$

La matrice du jugement est considérée cohérente si la valeur du $RC < 0,1$.

L'index de consistance CI est déterminé suivant l'équation (9).

$$IC = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (9)$$

Où λ_{\max} est déterminé en faisant la moyenne de la valeur du vecteur de cohérence et n représentant l'ordre de la matrice.

L'indice normalisée RI est fonction de l'ordre de la matrice (n) et est donné par le Tableau 16 ci-dessous.

Tableau 16 : Indices RI pour calculer le ratio de cohérence [229]

n	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
RI	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,54	1,56

TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) est une méthode dont le but est de pouvoir classer par ordre de choix un certain nombre d'alternatives sur la base d'un ensemble de critères favorables ou défavorables, développé par Hwang et Yoon [230]. Dans cette méthode, les critères peuvent être normalisés sous forme de matrice et leur valeur calculée à l'aide du concept de distance par rapport aux solutions idéales positives et idéales négatives. Une solution idéale positive est une solution qui fournit une valeur maximale pour chaque critère tandis que celle idéale négative fournit la valeur de l'attribut indésirable qui est la valeur la plus faible pour chaque critère. Le choix préféré est celui qui est le plus proche de la solution idéale positive et le plus éloigné de la solution idéale négative [215]. La méthode TOPSIS est utilisée dans le présent travail pour déterminer le classement final des alternatives en exploitant la pondération dérivée de AHP. Les principales étapes de la méthodologie de TOPSIS sont résumées dans la Figure 28 ci-dessous.

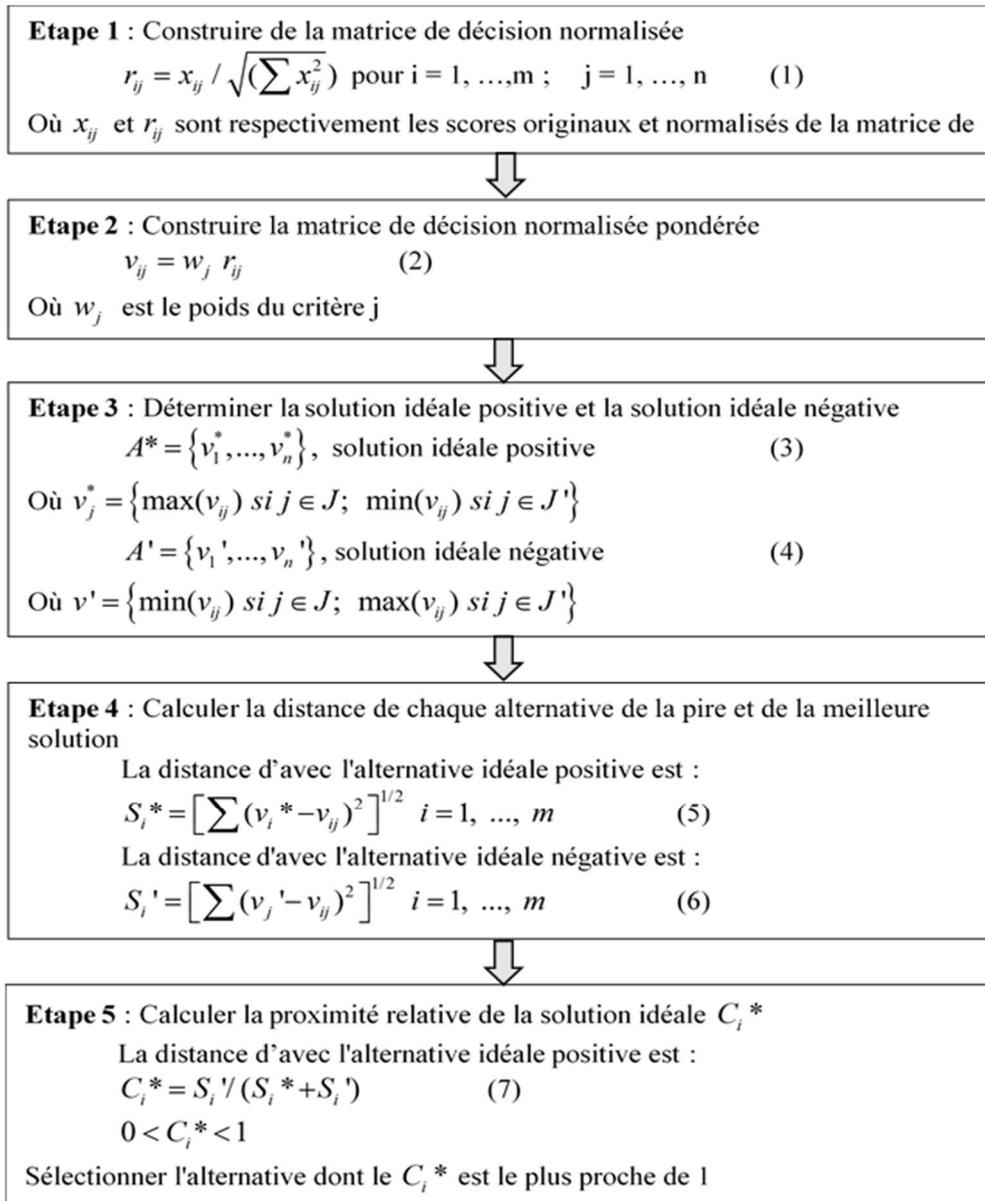


Figure 28: Principales étapes de la méthode TOPSIS

III.4. Etude de sensibilité

L'analyse de sensibilité est une étape fondamentale et obligatoire de l'aide à la décision multicritère, étant donné les incertitudes des données souvent utilisées [231]. Dans la plupart des cas, elle est utilisée pour mesurer les variations de la pondération des critères lors du classement des alternatives. Une solution est alors considérée comme stable si elle reste valable pour différentes variations. L'analyse de sensibilité permet ainsi de prendre des décisions précises [232].

Dans cette étude, la sélection de la biomasse appropriée est basée sur des critères dont les poids sont déterminés par l'analyse AHP. En raison de l'incertitude des données relatives à certains critères, un changement de poids est susceptible d'affecter le classement obtenu. Une analyse

de sensibilité est entreprise pour évaluer la robustesse du classement lorsque les poids des critères importants dans le modèle sont soumis à des variations.

IV. Résultats de la sélection de la biomasse

Cette section présente les différents résultats obtenus en implémentant la méthodologie décrite ci-dessus. Ces résultats concernent les poids des critères, le choix des alternatives (biomasses) et l'analyse de sensibilité.

IV.1. Pondération des critères

En rappel, six critères ont été considérés pour la sélection de la biomasse, à savoir la disponibilité et l'accessibilité de la biomasse (DA), les utilisations concurrentes (UC), le potentiel de pollution (PP), l'impact économique (IE), le contenu énergétique de la biomasse (EC) et la disponibilité des technologies appropriées (DT). Les critères ont été évalués à l'aide de l'approche AHP afin de déterminer leur ordre d'importance. La matrice de jugement des experts est présentée dans le Tableau 17.

Tableau 17 : Matrice de jugement des experts

Critères	DA	UC	PP	IE	CE	DT
DA	1	4,21	7,45	1,5	1,73	5,54
UC	0,24	1	2,82	3,41	0,81	1,34
PP	0,13	0,35	1	0,27	0,48	0,8
IE	0,67	0,25	3,70	1	0,91	1,5
CE	0,58	1,23	2,08	1,10	1	1
DT	0,18	0,75	1,25	0,67	1,00	1

Cette matrice est utilisée pour déterminer les poids des différents critères. Pour l'évaluation de l'indice de cohérence IC , λ_{\max} a été calculé. Les paramètres utilisés pour la détermination de la cohérence de la matrice sont consignés dans le Tableau 18.

Tableau 18: Paramètres de détermination de la consistance de la matrice

λ_{\max}	Index de cohérence	Ratio de consistance	Index aléatoire
	$IC = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$	$RC = IC / RI$	$RI(n)$
6,509	0,102	0,082	1,24

A partir de ce qui précède, les poids des critères ont été déterminés et la Figure 29 illustre l'ordre d'importance des différents critères.

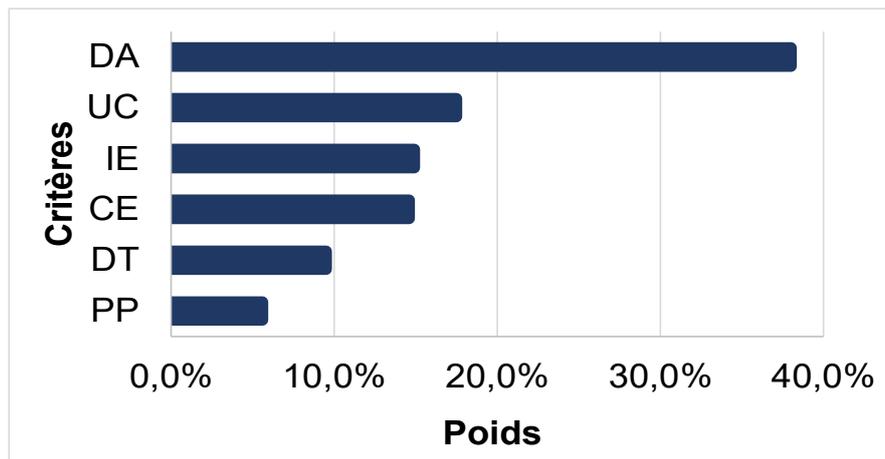


Figure 29: Ordre de priorité des critères

A l'issue de l'analyse des avis des experts, le critère DA (disponibilité et accessibilité de la biomasse) est le principal critère prioritaire selon les experts avec un poids de 38%. L'importance accordée à ce critère est justifiée par la nécessité de pouvoir répondre aux demandes des unités de valorisation. La dispersion spatiale et temporelle des ressources en biomasse sur le territoire national, ainsi que l'insuffisance des infrastructures routières peuvent considérablement entraver les chaînes d'approvisionnement. Des travaux antérieurs ont également souligné l'importance primordiale de ce critère [233]–[237]. Le deuxième critère jugé important par les experts est celui des utilisations concurrentes, avec un poids de 17,5%. Comme l'ont démontré D. Alfonso et al., [238], les utilisations concurrentielles de la biomasse sont des facteurs clés à prendre en compte dans l'exploitation de la biomasse, étant donné qu'elle reste encore largement utilisée dans les zones de production pour l'alimentation du bétail et l'approvisionnement en énergie. Une situation qui peut entraîner des perturbations dans la disponibilité ou des hausses de prix de la biomasse. Les résultats de l'analyse d'experts ont également attribué une importance significative au critère de l'impact économique, qui arrive en troisième position avec un poids de 14,9 %. Les préoccupations relatives aux coûts d'investissement, à la rentabilité et aux éventuelles incitations financières pour les investisseurs peuvent expliquer l'importance accordée à ce facteur par les experts. Le contenu énergétique (CE) est considéré comme le quatrième facteur clé, selon les experts. Ce critère a un impact significatif sur les coûts de conversion et les rendements, il a été également jugé prioritaire dans les travaux de P. Jusakulvijit et al., [233]. En revanche, comme les résultats obtenus par S. Firouzi et al., [239], [240], les critères liés à l'environnement (PP) et aux technologies de conversion (DT) sont considérés comme moins importants. Cette faible importance accordée à ces critères pourrait s'expliquer par une compréhension moins avancée des enjeux

environnementaux par les experts et par la disponibilité relative des technologies de conversion de la biomasse.

IV.2. Résultats sur le choix de la biomasse

Les biomasses évaluées dans ce travail sont les tiges de cotonnier (TC), la balle de riz (BR), les coques d'anacarde (CA), les épiluchures de mangue (EM) et les noyaux de mangue (NM). Les données utilisées dans l'analyse de ces alternatives sont présentées dans le Tableau 19.

Tableau 19 : Données des différentes alternatives (biomasses)

Poids	0,38	0,175	0,056	0,149	0,146	0,095
Critères	<i>DA</i>	<i>UC</i>	<i>PP</i>	<i>IE</i>	<i>CE</i>	<i>DT</i>
Unités	<i>Tonne</i>	<i>%</i>	<i>KtCO_{2eq}/an</i>	-	<i>MJ/kg</i>	-
TC	1 028 446,5	0	0,12	15,1	16,300	5,000
BR	16 421,33	80	2,874	36	14,900	4,000
CA	7231,11	20	2,874	28,1	21,300	5,000
EM	38 598,54	0	0,862	11,7	13,16	1,000
NM	24 677,75	0	2,472	9	18,010	5,000

Sur la base de ces données, l'analyse par AHP-TOPSIS a permis d'obtenir les résultats ci-après (Tableau 20)

Tableau 20 : Classement des biomasses

Résidus	Proximité relative C* (%)	Rang
Tiges de cotonnier (TC)	85,2	1
Noyaux de mangue (NM)	31,9	2
Epluchures de mangue (EM)	31,2	3
Coques d'anacarde (CA)	28,5	4
Balle de riz (BR)	18,2	5

Les résultats indiquent que les tiges de cotonnier ($C^* = 0,852$), les noyaux de mangue ($C^* = 0,319$), et les épiluchures de mangue ($C^* = 0,312$) sont les trois meilleures ressources de biomasse pour la production durable de bioénergie au Burkina Faso, en fonction des six critères précédemment définis. Cette performance des tiges de cotonnier s'explique par la grande disponibilité (1 028 446,5 t) et la quasi-absence d'usages concurrents (0%) pour cette ressource. Il en est de même pour les résidus de mangue, tels que les noyaux et des épiluchures qui présentent également peu d'usages concurrents. La balle de riz (BR) ($C^* = 0,182$) est classée dernière dans cette analyse. Ces résultats reflètent les observations sur le terrain, où la balle de riz est largement utilisée dans le secteur de l'élevage, réduisant sa disponibilité pour une utilisation énergétique à grande échelle. Au cours de ces dernières années, l'intérêt des unités

agro-industrielles s'est porté sur les coques d'anacarde (CA). Auparavant inexploitées, ces coques sont désormais utilisées comme combustible dans les unités de traitement des noix de cajou et de séchage des mangues ; elles sont également envisagées pour la production de biochar dans certaines initiatives locales. Ces utilisations concurrentes réduisent la disponibilité de la ressource, bien qu'une partie importante (80%) reste encore peu valorisée. Avec l'augmentation des capacités de production et de transformation, la gestion de ces déchets devient une priorité. Ces résultats soulignent également que les résidus présentant une faible compétitivité d'usages et une disponibilité élevée sont privilégiés.

IV.3. Résultats de l'analyse de sensibilité

Pour évaluer l'influence de la variation des critères « disponibilité et accessibilité de la biomasse » (DA) et « utilisation concurrente » (UC) sur la robustesse du classement obtenu, dix scénarios répartis en deux séries ont été élaborés et implémentés. Ces scénarios se concentrent principalement sur les variations de ces deux critères clés tout en gardant les autres critères constants. En effet, les critères de contenu énergétique de la biomasse (EC) et de potentiel de pollution (PP) ont été considérés comme n'étant pas soumis à l'incertitude. De même, les critères de l'impact économique (IE) et de disponibilité des technologies appropriées (DT), ayant une faible pondération ont été considérés peu influents sur le classement et maintenus constants. Les deux séries des dix scénarios sont décrits comme suit :

Série 1 : le poids de l'utilisation concurrente (UC) a été maintenu constant à 17,5 %, et la disponibilité et l'accessibilité de la biomasse (DA) ont été modifiées avec un pas de 10 ; avec des valeurs allant de 8 % à 48 %.

Série 2 : la disponibilité et l'accessibilité de la biomasse (DA) ont été maintenues constantes à 38%, et l'utilisation concurrente (UC) a été modifiée de 7,8% avec un pas de 10 jusqu'à 47,5%. Les résultats des différents scénarios pour les deux séries sont résumés dans Tableau 21 .

Tableau 21 : Résultats de l'analyse de sensibilité des différents scénarios suivant les deux séries

Séries	Poids des critères						Rang des alternatives				
	DA (%)	UC (%)	PP (%)	IE (%)	CE (%)	DT (%)	TC	BR	CA	EM	NM
Série 1	8		5,6	14,9	14,6	9,5	1 ^{er}	5 ^e	2 ^e	4 ^e	3 ^e
	18		5,6	14,9	14,6	9,5	1 ^{er}	5 ^e	4 ^e	3 ^e	2 ^e
	28	17,5	5,6	14,9	14,6	9,5	1 ^{er}	5 ^e	4 ^e	3 ^e	2 ^e
	38		5,6	14,9	14,6	9,5	1 ^{er}	5 ^e	4 ^e	3 ^e	2 ^e
	48		5,6	14,9	14,6	9,5	1 ^{er}	5 ^e	4 ^e	3 ^e	2 ^e
Série 2		7,5	5,6	14,9	14,6	9,5	1 ^{er}	3 ^e	2 ^e	5 ^e	4 ^e
		17,5	5,6	14,9	14,6	9,5	1 ^{er}	5 ^e	4 ^e	3 ^e	2 ^e
	38	27,5	5,6	14,9	14,6	9,5	1 ^{er}	5 ^e	4 ^e	2 ^e	3 ^e
		37,5	5,6	14,9	14,6	9,5	1 ^{er}	5 ^e	4 ^e	2 ^e	3 ^e
		47,5	5,6	14,9	14,6	9,5	1 ^{er}	5 ^e	4 ^e	2 ^e	3 ^e

Les résultats de la première série montrent que les tiges de coton (TC) sont classées en première position dans tous les scénarios, suivies par les noyaux de mangue en deuxième position. Les noyaux de mangues perdent leur deuxième place et occupent le troisième rang au profit des coques de noix de cajou qui se classent deuxième dans le premier scénario. L'épluchures quant à elles perdent dans ce scénario la troisième place et occupent la quatrième au profit des noyaux de mangue avant de regagner le troisième rang dans le second scénario. Ceci indique que la classification des épluchures est très sensible aux utilisations concurrentes (CU). En effet, dans l'évaluation initiale, ces résidus ne faisaient pas l'objet d'autres utilisations. L'application d'une utilisation élevée de 17,5 % à ces résidus a entraîné la réduction leur disponibilité. Il apparaît donc que la valorisation des résidus de mangues est soumise à un risque si les utilisations concurrentes augmentent de 7,5 % au moins comme le montre le Tableau 21.

Une variation du critère UC (utilisation concurrente) avec le critère DA (disponibilité de la biomasse) constant comme dans la série 2 a comme conséquences : les noyaux de mangue (NM) et les épluchures de mangue (EM) perdent leur deuxième et troisième place dans le premier scénario au profit des coques d'anacarde (CA). Ceci s'explique également par le fait que ces biomasses n'ont pas été utilisées dans d'autres usages concurrents en plus de leur disponibilité relativement faible. L'introduction de nouveaux usages a donc un impact sur la disponibilité de ces biomasses et donc sur le classement. Il apparaît également que les critères d'utilisation concurrente (UC) et de disponibilité de la biomasse (DA) ne sont pas les seuls à intervenir dans le classement, mais qu'il s'agit d'une combinaison de différents critères.

Lors de la sélection des biomasses, les critères de disponibilité et d'utilisation concurrente ne suffisent pas à eux seuls pour garantir un choix optimal. Il est essentiel de prendre en compte l'ensemble des critères afin d'optimiser la prise de décision.

Le classement des autres biomasses reste pratiquement constant dans plus de la moitié des dix scénarios étudiés, ce qui illustre la robustesse du classement obtenu par l'analyse AHP-TOPSIS.

Conclusion

Ce chapitre a permis d'évaluer le potentiel théorique, mobilisable et énergétique des résidus agricoles et agro-industriels au Burkina Faso. Les résultats montrent que parmi les nombreux résidus agricoles disponibles au Burkina Faso, seules les tiges de coton sont disponibles en quantités significatives pour la valorisation énergétique, avec un potentiel mobilisable d'environ 1 028 446,5 tonnes. Le potentiel global de l'ensemble des résidus agricoles et agro-industriels disponibles dans le pays est estimé à environ 1 115 375,24 tonnes. Les tiges de cotonnier représentent près de 92% de ce potentiel. Les résidus agro-industriels, bien que minoritaires, comprennent 0,6% de coques de noix de cajou, 1,5% de balles de riz et 5,7% de résidus de mangues.

La répartition géographique de ces résidus montre une concentration importante dans la région des Hauts-Bassins, avec un potentiel d'environ 447 140,84 tonnes, soit 40,1% du total national. Les autres régions se répartissent comme suit : la Boucle du Mouhoun (24,4%), Cascades (7,8%), Sud-Ouest (7,1%), Est (6,1%), Centre-Est (5,8%), Centre-Ouest (4%), Centre-Sud (3,5%), Centre et Plateau Central (0,5% chacune), Centre-Nord et Nord (0,1% chacune), et le Sahel, 0,01%. Les tiges de cotonnier sont les principaux résidus dans toutes les régions, tandis que les résidus agro-industriels sont principalement disponibles dans les Hauts-Bassins et les Cascades. Le potentiel énergétique des différents résidus représente 5265,3 GWh soit 2.82 fois le besoin moyen en électricité du pays estimé à 1866,8 GWh entre 2018 et 2022.

Au regard de la grande diversité des ressources, la sélection de la biomasse la plus appropriée est nécessaire pour une meilleure valorisation. Une évaluation basée sur six critères principaux à savoir la disponibilité et l'accessibilité de la biomasse, l'utilisation concurrente, le potentiel de pollution, l'impact économique, le contenu énergétique de la biomasse et la disponibilité de technologies appropriées pour la valorisation a été proposée. L'évaluation de ces critères à l'aide de la méthode AHP a montré que les critères les plus décisifs étaient la disponibilité de la biomasse avec un poids d'environ 38 % et l'utilisation concurrente de pondération 17,5 %. L'utilisation de la méthode hybride AHP-TOPSIS a permis de classer les

différents résidus en fonction de ces critères, révélant que les tiges de coton sont les plus appropriées, suivies des noyaux de mangue, des épiluchures de mangue, des coquilles de noix de cajou et des balles de riz.

La robustesse de ce classement a été vérifiée par une analyse de sensibilité sur les variations des deux critères principaux. Ces résultats pourraient servir de base aux décideurs dans la sélection de la biomasse pour établir des systèmes de bioénergies viables. Les résultats soulignent que la disponibilité des ressources et leur acheminement vers les unités de valorisation sont essentiels pour la réussite des filières de bioénergies. Cela requiert non seulement une disponibilité des ressources sur le lieu de production, mais aussi une logistique bien structurée. Cette structuration logistique intègre les coûts d'acheminement, les moyens de collecte et de transport, ainsi que les éventuels prétraitements nécessaires pour garantir une biomasse de qualité, adaptée aux technologies de conversion.

Dans cette perspective, le chapitre suivant aborde la modélisation mathématique des chaînes d'approvisionnement en biomasse, une étape cruciale pour optimiser l'organisation logistique et les coûts. Il propose une approche permettant de concevoir et d'évaluer différentes configurations de la chaîne, afin d'assurer un approvisionnement efficace et durable pour la production de bioénergies.

Chapitre 4 : Modélisation mathématique des chaînes d’approvisionnement en biomasse pour la production des bioénergies

Une fois le potentiel de biomasse disponible pour la valorisation identifiée, il est indispensable de définir les canaux de distribution adéquats pour livrer la biomasse au bon moment dans l’unité de valorisation adéquate. Ainsi, le développement efficace des filières bioénergies repose non seulement sur la disponibilité des ressources et des technologies, mais également sur la conception et l'optimisation des chaînes d'approvisionnement en biomasse. Ce chapitre est dédié à la modélisation mathématique de ces chaînes d'approvisionnement, un élément clé pour garantir une production de bioénergie viable et durable au Burkina Faso.

Dans un premier temps, la définition du problème sera abordée. Cette section identifiera les principaux défis et contraintes liés à l'approvisionnement en biomasse, tels que la localisation des sources de biomasse, la logistique de transport ainsi que les exigences de production de la bioénergie.

Ensuite, la formulation mathématique du problème sera détaillée. Cette section présentera le modèle mathématique élaboré pour modéliser les chaînes d'approvisionnement en biomasse. Les différentes variables, paramètres et contraintes seront définis, et les objectifs du modèle seront présentés. L'accent sera mis sur la représentation des flux de biomasse, l'optimisation des coûts, la minimisation des impacts environnementaux, et la maximisation de la création d’emplois.

La dernière partie du chapitre se concentrera sur l'approche de résolution adoptée pour le modèle formulé. Cette section décrira les méthodes et algorithmes utilisés pour résoudre le modèle mathématique, ainsi que les outils logiciels employés.

I. Description du problème

Les unités agro-industrielles du Burkina Faso sont confrontées à des défis majeurs en matière d’énergie et de gestion des déchets. Certaines industries agroalimentaires comme les unités de transformation de mangue ont des fortes demandes en chaleur, généralement satisfaites à partir du gaz butane, qui est une source fossile. A ce niveau, deux types de séchoirs sont généralement utilisés à savoir, les séchoirs de type attesta et les séchoirs de type tunnel. Les séchoirs de type attesta sont les plus utilisés en raison de leur coût relativement faible par rapport aux tunnels. Cependant, la production d’une tonne de mangues séchées avec un séchoir attesta consomme environ 541 kg de gaz butane soit environ 45 bouteilles de 12 kg, tandis

qu'avec un séchoir tunnel, la même production nécessite environ 216 kg de gaz butane, soit environ 18 bouteilles de 12 kg.

Le prix d'une bouteille de gaz de 12 kg étant de 5 500 FCFA [171], le coût du gaz pour produire une tonne de mangues séchées varie entre 99 000 et 247 500 FCFA selon la technologie de séchoir utilisée. Le coût élevé du gaz et les difficultés d'approvisionnement liées aux fréquentes pénuries perturbent le bon fonctionnement de la filière. Ces contraintes contribuent à réduire les capacités d'exploitation de ces unités et limitent leur compétitivité. Par ailleurs, la gestion des quantités importantes des résidus produits reste un défi majeur pour ces unités et pour les municipalités. De nombreuses unités déversent toujours leurs déchets dans des décharges non contrôlées, causant des problèmes environnementaux et sanitaires. Une des solutions à ces problèmes consiste à réutiliser ces résidus, ainsi que ceux générés par l'agriculture, pour produire l'énergie nécessaire grâce à des technologies modernes de conversion. Cela permettrait de réduire la dépendance vis-à-vis du réseau national et d'améliorer la gestion des déchets. Cette problématique conduit à l'étude de modèles de configuration des chaînes d'approvisionnement afin d'exploiter efficacement ces ressources pour la production d'énergie durable. L'étude se concentre sur la partie amont des chaînes logistiques de biomasse, incluant les activités de collecte, le transport, le prétraitement et la conversion de la biomasse en bioénergie.

Le processus implique des installations de production de bioénergies de technologies et de tailles variées couramment utilisées dans le pays, ou implantées dans des localités stratégiques pour répondre aux besoins énergétiques des agro-industriels. Ces installations exploitent de la biomasse produite par les unités de transformation agroalimentaire (résidus) et de l'agriculture (biomasse agricole) approvisionnées auprès des producteurs. Les emplacements des différents sites de biomasses sont supposés connus. Les résidus de transformation agroalimentaire peuvent être valorisés selon deux types de circuits : circuit court et circuit long (Figure 30).

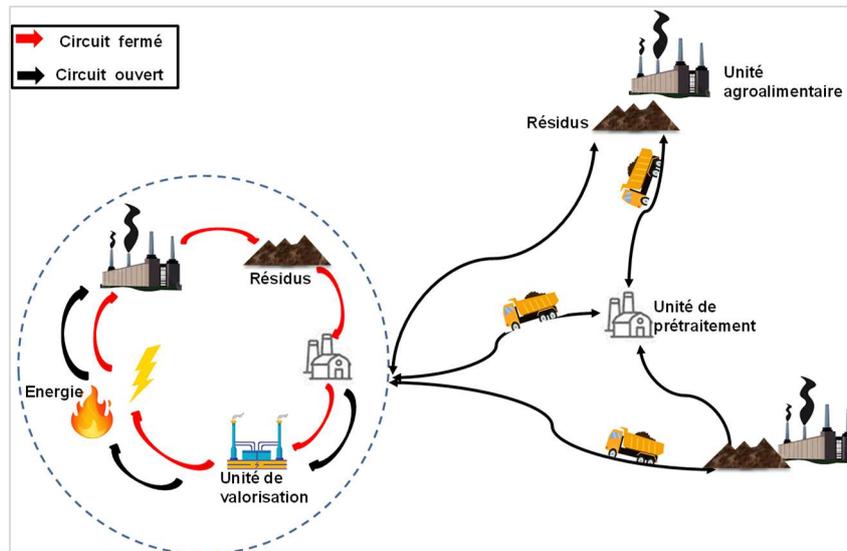


Figure 30 : Les différents circuits de valorisation des résidus agroindustriels

- **Circuit court ou boucle fermée** : L'unité agroindustrielle produit des résidus qu'elle valorise directement sur place, sans besoin de les vendre ou de les transporter ailleurs.
- **Circuit long ou boucle ouverte** : L'unité peut vendre ses résidus à d'autres structures, ou inversement, acheter des résidus produits par une autre unité. Cette option permet de mutualiser les ressources entre différentes unités agroindustrielles, souvent avantageuse lorsque la demande en résidus dépasse la capacité de production d'une seule source.

Les résidus peuvent être valorisés sous forme brute, comme la balle de riz, ou être soumis à divers types de prétraitements ; c'est le cas pour les coques d'anacarde, les tiges de cotonnier et les résidus de mangues. Parmi les formes de prétraitement, on peut distinguer des procédés comme le séchage pour réduire l'humidité et faciliter le stockage, le broyage pour réduire la taille des particules et en faciliter la manipulation, ou la densification (par exemple, sous forme de briquettes ou de granulés) pour augmenter la densité énergétique et optimiser le transport. Le choix entre valorisation brute ou prétraitement dépend des exigences spécifiques à l'unité de valorisation, mais aussi de la logistique et des coûts associés à chaque option. C'est donc un facteur important pour garantir l'efficacité et la durabilité de toute chaîne d'approvisionnement en bioénergie.

Dans cette étude, les opérations de prétraitement ont été sélectionnées en fonction des spécificités de chaque type de résidu, afin d'optimiser leur valorisation énergétique et leur compatibilité avec les technologies de conversion existantes sur le terrain et décrites dans le chapitre 3. Ainsi, les prétraitements identifiés sont :

- **Le broyage des tiges de cotonnier et des résidus de mangue** : cette opération est nécessaire pour réduire la taille de ces matériaux volumineux et fibreux. Le broyage

facilite le transport et améliore la densité de la biomasse, ce qui augmente son efficacité dans les processus de conversion. Ce traitement est particulièrement adapté aux tiges de cotonnier, aux noyaux de mangue et aux épiluchures, car il permet de réduire les coûts de logistique et d'optimiser l'efficacité des opérations en aval.

- **Le pressage des coques d'anacarde** : les coques d'anacarde contiennent un liquide corrosif, le Cashew Nut Shell Liquid (CNSL), qui peut endommager les technologies de conversion si elles sont utilisées directement dans les chaudières, les pyrolyseurs ou les gazogènes. Le pressage permet d'extraire ce liquide avant conversion, rendant les coques moins corrosives pour les étapes de transformation énergétique. En plus de prévenir la corrosion, cette opération améliore la qualité de la biomasse tout en permettant la valorisation du CNSL comme sous-produit.

Les technologies de prétraitement évaluées sont présentées dans l'**Annexe 2**.

Ces prétraitements sont réalisés à l'aide de technologies de capacités variées, sélectionnées pour répondre aux besoins en quantité de chaque biomasse. Le transport de la biomasse est ensuite assuré entre les sites de production, les sites de prétraitement, et les installations de conversion, en utilisant différents moyens de transport selon la localisation et les quantités.

I.1. Critères d'optimisation

Afin de garantir une durabilité et une efficacité des chaînes d'approvisionnement, leur optimisation doit prendre en compte les critères économiques, environnementaux et sociaux. Sur le plan économique, il est essentiel de réduire les coûts de production, de transport et de traitement de la biomasse pour rendre les projets économiquement viables et attrayants pour les investisseurs. Cela implique le choix de technologies rentables, une gestion efficace des ressources pour minimiser les pertes et maximiser la production, ainsi que la réalisation d'économies d'échelle pour réduire les coûts unitaires. Dans le but de la minimisation des coûts totaux de la chaîne d'approvisionnement, les principaux coûts impliqués sont :

- le coût de la récolte/collecte de la biomasse ;
- le coût d'achat de la biomasse;
- le coût du transport de la biomasse et des produits intermédiaires;
- le coût du prétraitement de la biomasse;
- le coût de la conversion de la biomasse en énergie finale (chaleur, électricité).

Certains de ces coûts comme le transport, le prétraitement et la conversion sont constitués de coûts fixes et coûts variables.

Le critère environnemental vise à réduire l'empreinte carbone de la chaîne d'approvisionnement. L'objectif est de minimiser les émissions de gaz à effet de serre (GES) associées aux activités des différents maillons de la chaîne de production et d'approvisionnement en bioénergie. Il s'agit principalement des émissions liées au transport de la biomasse (prétraitée ou non), aux opérations de prétraitement et à la conversion de la biomasse. Ces émissions sont évaluées à l'aide de facteurs d'émission dépendant des technologies employées et des quantités de biomasses traitées.

Le développement des chaînes d'approvisionnement de la biomasse revêt une grande importance sociale, car il génère des bénéfices significatifs pour les communautés locales [241]. Dans la littérature, divers indicateurs sociaux ont été proposés pour évaluer l'impact de ces chaînes, notamment le nombre d'emplois créés [113], la qualité des emplois créés [242], la santé publique [142], l'impact sur la sécurité alimentaire [243], et la contribution au développement local [244]. Cependant, le critère social reste peu étudié, souvent jugé difficile à évaluer [145], [245], [246]. Parmi ces indicateurs, le plus couramment utilisé est le nombre d'emplois créés [242].

Dans cette étude, le critère social est évalué en fonction du nombre d'emplois créés. En effet, l'installation d'unités de valorisation de la biomasse permet de générer des emplois locaux tout au long de la filière, ce qui soutient directement l'économie locale, améliore les conditions de vie et encourage le développement des zones rurales, où la biomasse est souvent produite. Cet indicateur est également utile pour comparer différentes configurations logistiques, en mesurant de manière objective l'impact social. De plus, la création d'emplois favorise l'acceptation sociale des projets, car elle génère des opportunités économiques directes et indirectes dans les services locaux et chez les fournisseurs.

Enfin, cet objectif de maximiser le nombre d'emplois créés s'aligne avec les priorités des décideurs politiques, qui valorisent les projets capables de répondre aux défis de chômage et de réduction de la pauvreté. Intégrer les dimensions sociale, économique et environnementale permet ainsi de développer des chaînes d'approvisionnement de biomasse qui soient à la fois rentables, écologiquement durables et socialement bénéfiques.

I.2. Hypothèses et limites du problème

Les activités de la chaîne d'approvisionnement de la biomasse comportent de nombreux facteurs incertains notamment la disponibilité et la saisonnalité de la biomasse (rendement agricole, conditions météorologiques, les pratiques de cultures), la qualité de la biomasse (humidité, contenu énergétique, composition), les conditions de stockages (humidité,

température), les performances des technologies de prétraitement et de conversion (rendement, fiabilité, coûts), la fluctuation des coûts de transport et de collecte qui rendent souvent les modèles d'optimisation complexes et difficiles à résoudre. Les hypothèses et limites simplificatrices suivantes ont été adoptées :

- i) Dans le modèle, la quantité de biomasse disponible et la demande en énergie sont supposées connues et fixes.
- ii) L'horizon temporel évalué est d'une année
- iii) La demande en produit fini (électricité ou chaleur) doit être totalement satisfaite.
- iv) Les acteurs de la chaîne d'approvisionnement disposent des ressources nécessaires pour livrer les matériaux à destination sans avoir à partager les ressources d'autres parties impliquées.
- v) Les fluctuations des coûts unitaires de production et logistiques sont négligeables, tout comme la perte de masse de la biomasse pendant le transport. Cette simplification permet de se concentrer sur les dimensions plus générales de l'optimisation, telles que la conception stratégique des chaînes logistiques, la sélection des sites de production, des technologies de prétraitement et de conversion, et les schémas de transport globaux.
- vi) Chaque installation de bioénergie est conçue pour répondre aux besoins énergétiques spécifiques d'une seule unité agroindustrielle. La demande annuelle en énergie de cette unité est connue et considérée comme fixe, ce qui implique que l'approvisionnement en biomasse fonctionne selon un système de flux tiré.
- vii) Bien que le séchage de la biomasse soit souvent nécessaire, les coûts liés à cette étape sont supposés négligeables, car nous supposons que les biomasses, sont séchées à l'air libre sous le soleil.

I.3. Système modélisé, attributs et complexité du modèle

La Figure 31 illustre la superstructure de la chaîne d'approvisionnement en biomasse étudiée, où plusieurs étapes et processus interconnectés sont impliqués dans la conversion de la biomasse en produits finaux tels que l'électricité et la chaleur. Ce type de chaîne d'approvisionnement est complexe, impliquant un nombre élevé de variables à optimiser pour atteindre une production efficace et durable.

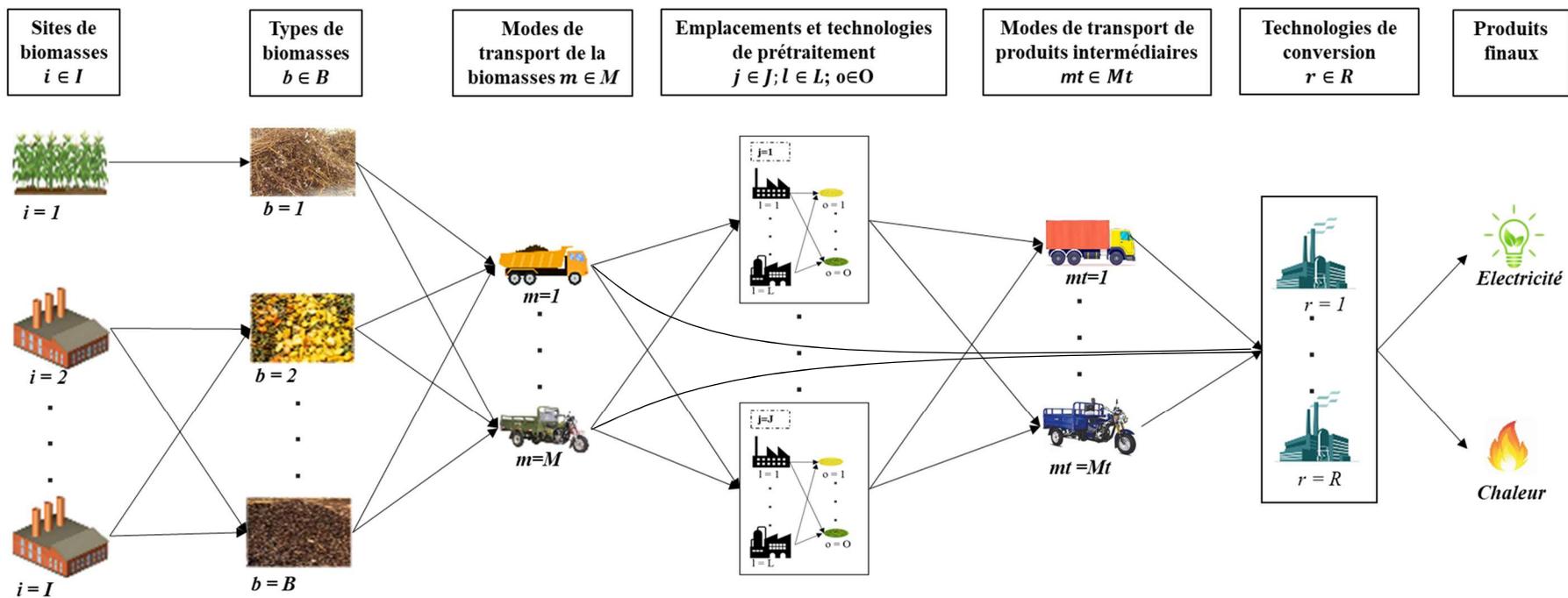


Figure 31 : Superstructure de la chaîne d’approvisionnement

Dans ce système, les biomasses proviennent soit des champs (biomasse agricole) soit des unités de transformation agroalimentaire (résidus agro-industriels). Elles sont ensuite transportées vers des sites de valorisation pour être converties en énergie (chaleur, électricité). La biomasse brute peut également être prétraitée avant conversion. Ainsi, le modèle prend en compte différents types de biomasse b (résidus agricoles ou de la transformation agroalimentaire), chacun ayant des caractéristiques spécifiques et provenant de divers sites de production i (champs ou unités agroalimentaires). Ces biomasses brutes sont transportées par différents moyens m vers des sites de prétraitement j , ou directement vers des sites de conversion k . Celles qui passent par les centres de prétraitement sont transformées en produits intermédiaires o à l'aide de diverses technologies de prétraitement l , de capacités g . Les biomasses ne nécessitant pas de prétraitement, ainsi que les produits intermédiaires, sont livrés dans les sites de conversion k , où ils peuvent être convertis en différents produits finis e par l'intermédiaire de technologies de conversion r avec des capacités d . Le transport des produits intermédiaires est assuré par des moyens de transport mt . Ce processus vise à optimiser l'efficacité de la chaîne d'approvisionnement tout en tenant compte des spécificités logistiques et technologiques de chaque étape

Le modèle proposé vise à déterminer, en fonction des critères d'optimisation et du type de biomasse considéré :

- la quantité de biomasse nécessaire ainsi que les sites de production potentiels (champs ou unités industrielles) à exploiter ;
- l'emplacement optimal des sites de prétraitement et de conversion ;
- les capacités optimales des technologies de prétraitement et de conversion à installer;
- l'état et les quantités de biomasses à transporter, ainsi que la configuration optimale du réseau d'approvisionnement.

La complexité du modèle découle de plusieurs facteurs interdépendants. En effet, le caractère « multi-objectif » du modèle nécessite l'optimisation simultanée de plusieurs critères souvent conflictuels (minimisation des coûts économiques, réduction de l'impact environnemental et maximisation des bénéfices sociaux). Ce caractère multidimensionnel oblige à explorer un espace de solutions plus vaste pour trouver la solution optimale, ce qui accroît la complexité du problème. Ensuite, le nombre élevé d'entités et de niveaux dans le réseau contribue également à cette complexité. Le système intègre un nombre important de sites de production, de technologies, de moyens de transport, de centre de prétraitement et de sites

de conversion, chacun offrant une diversité de choix possibles. Le nombre total de combinaisons possibles augmente de manière exponentielle avec chaque ajout de site ou de technologie, rendant la résolution du problème difficile.

Chaque technologie ou moyens de transport a des limites spécifiques sur les quantités de biomasse pouvant être traitées ou transportées. Respecter ces contraintes tout en optimisant les autres critères impose des contraintes supplémentaires, compliquant davantage la recherche de solutions. Ce problème comprend des décisions stratégiques et tactiques dont la combinaison dans un cadre unique nécessite une évaluation simultanée de nombreux facteurs à plusieurs niveaux de la chaîne d'approvisionnement. L'interconnexion de ces niveaux de décision augmente également la complexité du modèle.

Enfin, la nature combinatoire du problème implique l'existence d'un très grand nombre de configurations possibles pour les installations et les flux de biomasse. Cette combinatoire complexe agrandit l'espace de solutions potentielles à explorer et rend difficile la recherche de solutions optimales. En outre, ce problème est classé NP-difficile, car il peut être réduit à d'autres problèmes NP-difficiles comme le problème de localisation d'installations à capacité finie et le problème de transport multi-échelons [149]. Le temps de calcul nécessaire pour trouver une solution exacte dans ce type de problème augmente de manière exponentielle avec la taille du problème. Cela rend les problèmes de grande taille difficilement solvables de manière exacte dans des délais raisonnables.

II. Formulation mathématique

Le problème posé a été modélisé sous forme de programme linéaire à nombre entier mixte (MILP). Les principaux composants du modèle sont les ensembles, les paramètres, les fonctions objectifs et les contraintes. Ces différents éléments sont décrits en détail dans les sections suivantes.

II.1. Les ensembles

Les ensembles sont des collections d'éléments qui définissent les indices sur lesquels les variables, les paramètres, et les contraintes du modèle sont basés. Ils permettent de structurer et d'organiser les données du problème, facilitant ainsi la modélisation et la compréhension du problème. Le Tableau 22 présente les ensembles du problème.

Tableau 22 : Nomenclature des ensembles

Ensembles	Descriptions	Indices
<i>I</i>	Ensemble de sites de production de la biomasse (champs et unité agroindustriels)	<i>i</i>
<i>B</i>	Ensemble de types de biomasse (tiges de coton, coques d'anacarde, etc.,)	<i>b</i>
<i>J</i>	Ensemble de sites de prétraitement de la biomasse en produits intermédiaires	<i>j</i>
<i>K</i>	Ensemble de sites de conversion de la biomasse en produits finis	<i>k</i>
<i>R</i>	Ensemble des technologies de conversions de la biomasse	<i>r</i>
<i>D</i>	Ensemble des capacités des technologies de conversion de la biomasse	<i>d</i>
<i>L</i>	Ensemble des technologies de prétraitement de la biomasse	<i>l</i>
<i>G</i>	Ensemble des capacités des technologies de prétraitement	<i>g</i>
<i>O</i>	Ensemble des produits intermédiaires	<i>o</i>
<i>E</i>	Ensemble des produits finaux	<i>e</i>
<i>M</i>	Ensemble des modes de transport pour la biomasse brute	<i>m</i>
<i>Mt</i>	Ensemble des modes de transport pour les produits intermédiaires	<i>mt</i>
<i>P</i>	Ensemble des niveaux de localisation du prétraitement	<i>p</i>

II.2. Les Paramètres

Les paramètres sont des valeurs constantes utilisées dans le modèle. Ils représentent des données connues et fixes qui ne changent pas au cours de l'optimisation. Les paramètres définissent les conditions et les restrictions du modèle et sont souvent issus de données empiriques ou de spécifications du problème. Les paramètres du modèle sont décrits dans le Tableau 23 ci-dessous.

Tableau 23 : Nomenclature des paramètres du modèle

Paramètres	Descriptions	Unités
Sb_{bi}	Quantité de biomasse <i>b</i> disponible sur le site de production <i>i</i>	Tonne (t)
$xblp_{blp}$	Paramètre binaire indiquant le choix du niveau de localisation et la technologie de prétraitement pour la biomasse <i>b</i>	
f_{or}	Paramètre binaire indiquant le choix de la technologie de conversion <i>r</i> en fonction du type de produit intermédiaire <i>o</i>	

fbk_{bk}	Paramètre binaire indiquant si la biomasse brute b doit être directement envoyée sur le site de conversion k	
crc_b	Coût unitaire de la collecte de la biomasse b	FCFA/t
$Pbio_b$	Prix unitaire de la biomasse b	FCFA/t
d_{ij}	Distance entre la source de production i de la biomasse et le site de prétraitement j	km
d_{jk}	Distance entre le site de prétraitement j et le site de conversion ou l'installation k	km
τ	Coefficient de tortuosité de la route représentant le rapport entre la longueur réelle de la route et la distance en ligne droite entre son point de départ et son point d'arrivée.	
Cpr_l	Coût unitaire d'exploitation du prétraitement par la technologie de prétraitement l	FCFA/t
ct_m	Coût unitaire du transport de la biomasse b par le mode de transport m	FCFA/km.t
ct_{mt}	Coût unitaire du transport des produits intermédiaires o par le mode de transport mt	FCFA/km.t
$Cfpr_{lg}$	Coût fixe annualisé de la technologie de prétraitement l de capacité g	FCFA
Pr_m	Coût fixe annualisé du moyen de transport m	FCFA
Pr_{mt}	Coût fixe annualisé du moyen de transport mt	FCFA
HOJ	Nombre de jours de travail par an	jours
$Ccov_r$	Coût unitaire de la conversion de la biomasse par la technologie r	FCFA/t
CF_{rd}	Coût fixe annualisé de la technologie de technologie de conversion r de capacité g	FCFA
F_{maint}	Facteur de coût de la maintenance en fonction du coût d'investissement	%
Kap_{lg}	Capacité de la technologie de prétraitement l de capacité g installée	t/an
Cap_{rd}	Capacité de la technologie de conversion r de capacité d installée	t/an
$Demand_{ek}$	Demande annuelle en produit fini e en k	Unité du produit

C_{men}	Coût unitaire de la manutention	FCFA/t
OH_{imj}	Temps nécessaire pour livrer la biomasse transportée de la source de production i au site de prétraitement j par le mode de transport m	Heure (h)
OH_{jmtk}	Temps nécessaire pour livrer les produits intermédiaires du site de prétraitement j par le mode de transport mt au site de conversion k	Heure (h)
OH_{imk}	Temps nécessaire pour livrer la biomasse transportée de la source de production i au site k par le mode de transport m	Heure (h)
OH_{imtk}	Temps nécessaire pour livrer les produits intermédiaires du site i par le mode de transport mt au site de conversion k	Heure (h)
Q_{v_m}	Volume maximal du mode de transport m	m^3
$Q_{v_{mt}}$	Volume maximal du mode de transport mt	m^3
Q_{m_m}	Capacité de poids maximale du mode de transport m	t
$Q_{m_{mt}}$	Capacité de poids maximal du mode de transport mt	t
I_m	Facteur d'émission PRG généré par l'utilisation du mode de transport m	teqCO ₂ /t.km
I_{mt}	Facteur d'émission PRG généré par l'utilisation du mode de transport mt	teqCO ₂ /t.km
I_l	Facteur d'émission PRG généré par l'utilisation de la technologie de prétraitement l	teqCO ₂ /t
I_{re}	Facteur d'émission PRG généré par l'utilisation de la technologie de conversion r pour produire le produit e	teqCO ₂ /t
$P_{inst_{rd}}$	Capacité de la technologie de conversion r de capacité d installée	MW
EF_r	Facteur d'emplois générés lié à l'utilisation de la technologie r	emplois
RM	Facteur de multiplication régional utilisé pour calculer le nombre d'emplois créés	
$No_{p_{lg}}$	Main d'œuvre nécessaire pour le fonctionnement de la technologie de prétraitement l de capacité g	

II.3. Les variables du modèle

Ce sont les éléments du modèle que l'on cherche à déterminer pour optimiser l'objectif. Elles représentent les décisions à prendre et peuvent varier pour trouver la solution optimale.

Les variables peuvent être continues, discrètes (entiers) ou binaires. Les variables du modèle sont consignées dans le Tableau 24.

Tableau 24 : Variables du modèle

Variables binaires	
T_{krd}	Indique si la technologie de conversion r de capacité d doit être installée en k , oui 1 ; sinon 0
$Yp_{p\lg}$	Indique si la technologie de prétraitement l de capacité g doit être installée au niveau p , oui 1 ; sinon 0
Tj_j	Indique si le un prétraitement est effectué au centre de prétraitement j , oui 1 ; sinon 0
Variables entières	
$NVij_{imj}$	Nombre de voyages nécessaire pour transporter la biomasse de i à j via le mode de transport m (voyage/jour)
$NVjk_{jmtk}$	Nombre de voyages nécessaire pour transporter les produits intermédiaires de j à k via le mode de transport mt (voyage/jour)
$NVimk_{imk}$	Nombre de voyages nécessaire pour transporter la biomasse de i à k via le mode de transport m (voyage/jour)
$NVimtk_{imtk}$	Nombre de voyages nécessaire pour transporter les produits intermédiaires de i à k via le mode de transport mt (voyage/jour)
$NVehij_{imj}$	Nombre de modes de transport m nécessaire pour transporter la biomasse de i à j par jour
$NVehjk_{jmtk}$	Nombre de modes de transport mt nécessaire pour transporter les produits intermédiaires de j à k par jour
$NVehimk_{imk}$	Nombre de modes de transport m nécessaire pour transporter la biomasse de i à k par jour
$NVehimtk_{imtk}$	Nombre de modes de transport mt nécessaire pour transporter les produits intermédiaires de i à k par jour
Variables continues	
$Q_{bimjp\lg}$	Quantité totale de biomasse b transportée entre i et j via le mode de transport m pour être prétraitée par la technologie l de capacité g en tonne
$Q_{ip_{bip\lg}}$	Quantité de biomasse b disponible en i si le prétraitement de la biomasse à lieu en i en tonne
$Q_{ik_{omikrd}}$	Quantité de produits intermédiaires transportés de i à k si le prétraitement a été effectué dans les sites de production i en tonne.

$U_{omtjkrd}$	Quantité totale de produits intermédiaires o transportés entre j à k via le mode de transport mt pour être convertie par la technologie r de capacité d en tonne
E_{kjrd}	Quantité totale de produit final produit en k par l'intermédiaire de la technologie de conversion r de capacité d (unité du produit finale)
TV_{bmikrd}	Quantité totale de biomasse brute b transportée directement à l'aide des moyens de transport m entre les sites i et les sites k en tonne.
TVW_{bmikrd}	Quantité totale massique de biomasse b transportée par jour ente i et k via le mode de transport m pour être convertie avec la technologie r de capacité d (en t/jour)
TVV_{bmikrd}	Quantité totale volumique de biomasse b transportée par jour ente i et k via le mode de transport m pour être convertie par la technologie r de capacité d (en t/jour)
FWB_{bimjlg}	Quantité totale de biomasse b transportée par jour ente i et j via le mode de transport m pour être prétraitée avec la technologie l de capacité g (en t/jour)
FWO_{omtjkd}	Quantité totale de produits intermédiaires o transportée par jour entre j et k via le mode de transport mt pour être transformée avec la technologie de conversion r de capacité d (en t/jour)
FVB_{bimjlg}	Volume total de biomasse b transporté par jour ente i et j via le mode de transport m pour être prétraité avec la technologie l de capacité g (m^3 /jour)
FVO_{omtjkd}	Volume total de produits intermédiaires o transporté par jour entre j et k via le mode de transport mt pour être transformée avec la technologie de conversion r de capacité d (m^3 /jour)

II.4. Les fonctions objectifs

Comme mentionné plus haut, trois fonctions objectifs sont étudiées dans ce problème à savoir la fonction objectif économique, la fonction objectif environnementale et la fonction objectif sociale.

II.4.1. Fonction objectif économique

L'objectif de cette fonction est de minimiser la coût total $Cost$, qui représente la somme des coûts élémentaires C_c associés aux différentes activités de la chaîne d'approvisionnement de la biomasse. Cette fonction est formulée suivant l'équation (10) ci-dessous.

$$Min Cost = \sum_{c \in C} C_c \quad (10)$$

Ces coûts élémentaires comprennent l'acquisition de la biomasse, les dépenses liées à la récolte/collecte de la biomasse, les coûts fixes et variables du transport de la biomasse et des

produits intermédiaires, les coûts fixes et variables du prétraitement et de la conversion de de la biomasse et le coût de la maintenance.

Le coût associé à la récolte/collecte de la biomasse dépend du flux de biomasse ($Q_{bimjplg}$) entre les sites de production et de prétraitement, de la quantité de biomasse (TV_{bmikrd}) transportée directement des sites de production vers les sites de conversion et du coût unitaire de collecte (crc_b) de chaque biomasse. Il est calculé selon l'équation (11).

$$C_1 = \sum_{bimjlg} Crc_b * Q_{bimjlg} + \sum_{bmikrd} Crc_b * TV_{bmikrd} \quad (11)$$

Le coût d'achat de la biomasse est défini en fonction du flux de biomasse (Q_{bimjlg}) entre les sites de production de la biomasse et les sites de prétraitement, de la quantité directement exploitée (TV_{bmikrd}) ainsi que du coût unitaire d'achat ($Pbio_b$) de chaque type de biomasse. Sa formulation est donnée par l'équation (12) ci-dessous.

$$C_2 = \sum_{bimjlg} Pbio_b * Q_{bimjlg} + \sum_{bmikrd} Pbio_b * TV_{bmikrd} \quad (12)$$

Les coûts du prétraitement se composent d'une partie fixe et d'une partie variable. La partie variable dépend de la quantité de biomasse brute (Q_{bimjlg}) prétraitée et du coût unitaire de l'opération de prétraitement (Cpr_l). La partie fixe est liée au coût d'achat annualisé ($Cfpr_lg$) de la technologie de prétraitement. Le coût total du prétraitement est donné par l'équation (13).

$$C_3 = \sum_{bimjlg} Cpr_l * Q_{bimjlg} + \sum_{jlg} Cfpr_lg * Yp_{plg} \quad (13)$$

Les coûts de transport sont constitués à la fois des coûts fixes et des coûts variables. Les coûts variables concernent le transport de la biomasse brute des sites de production vers les sites de prétraitement, de la biomasse brute transportée des sites de production vers les sites de conversion, et des produits intermédiaires transportés vers les sites de conversion. Ils sont établis en fonction du coût unitaire de transport (ct_{mt} pour les produits intermédiaires et ct_m pour la biomasse brute), de la distance parcourue (d_{ij} pour distance sites de production – sites de prétraitement, d_{ik} pour distance sites de production – sites de conversion et d_{jk} pour distance sites de prétraitement - site de conversion), du coefficient de tortuosité de la route (τ) et de la quantité totale de biomasse transportée (Q_{bimjlg} pour biomasse à prétraiter, TV_{bmikrd} pour biomasse convertie directement sans prétraitement et U_{ojmkrd} pour produits intermédiaires). Les coûts fixes, eux, dépendent des coûts annuels des moyens de transport utilisés (Pr_m et Pr_{mt}).

Les équations (14) et (15) déterminent respectivement les coûts de transport de la biomasse brute et ceux de la biomasse prétraitée (produits intermédiaires).

$$C_4 = \sum_{bijm|g} ct_m * d_{ij} * \tau * Q_{bijm|g} + \sum_{bmikrd} ct_m * d_{ik} * \tau * TV_{bmikrd} + \sum_{imj} Pr_m * NVeh_{imj} + \sum_{imk} Pr_m * NVeh_{imk} \quad (14)$$

$$C_5 = \sum_{ojmkrd} ct_{mi} * d_{jk} * \tau * U_{ojmkrd} + \sum_{jmtk} Pr_{mi} * NVeh_{jmtk} \quad (15)$$

Les coûts liés à la conversion de la biomasse englobent les coûts fixes annualisés des technologies de conversion utilisées ainsi que les coûts opérationnels de conversion, notamment la main d'œuvre requise. Dans le cadre de cette étude, les coûts des équipements sont calculés selon le modèle de la « loi des puissances », qui repose sur une analogie avec le coût d'une unité de référence utilisant des procédés identiques mais ayant une capacité de production différente. Cela permet d'extrapoler les données de coût d'une échelle à une autre en utilisant un coefficient de mise à l'échelle [170]. Le coût d'investissement nécessaire des équipements est alors déterminé suivant l'équation (16) [247]–[250].

$$C_{eq} = C_{ref} * (Q / Q_{ref})^\theta \quad (16)$$

Avec C_{ref} coût de l'équipement de l'unité de référence, Q la capacité de l'unité à installer, Q_{ref} la capacité de l'équipement de l'unité de référence et θ le coefficient d'échelle.

Les coûts de la conversion peuvent ainsi être évalués suivant l'équation (17) ci-dessous. Il dépend de la quantité de biomasse exploitée (U_{ojmkrd} pour les produits intermédiaires et TV_{bmikrd} pour la biomasse brute convertie directement), du coût unitaire de conversion (C_{cov_r}) et du coût annualisé (CF_{rd}) de la technologie de conversion (T_{krd}) considérée.

$$C_6 = \sum_{omjkrd} C_{cov_r} * U_{omjkrd} + \sum_{krd} CF_{rd} * T_{krd} \quad (17)$$

Le coût de la maintenance de l'installation est calculé sur la base des facteurs de coûts liés aux coûts d'investissement en raison de manque de données sur les coûts individuels des équipements. L'équation (18) définit les coûts liés à la maintenance.

$$C_7 = C_{eq} * F_{maint} \quad (18)$$

II.4.2. Fonction objectif environnemental

L'équation (19) décrit la fonction objectif environnementale examinée dans cette étude. Elle a pour but d'évaluer la performance environnementale de la chaîne d'approvisionnement

en minimisant l'ensemble des gaz à effet de serre (GES) émis lors des différentes opérations dans la chaîne.

$$GES = \sum_{bimjlg} I_m * Q_{bimjlg} * d_{ij} * \tau + \sum_{omtjkrd} I_{mt} * U_{omtjkrd} * d_{jk} * \tau + \sum_{bimjlg} I_l * Q_{bimjlg} + \sum_{ekrd} I_{re} * U_{omtjkrd} \quad (19)$$

Cette équation quantifie les émissions des GES générés au cours du transport de la biomasse et des produits intermédiaires, ainsi que durant la phase de prétraitement et de la conversion. Les émissions sont calculées en utilisant les facteurs d'émission spécifiques à chaque technologie et à chaque mode de transport, en tenant compte de la quantité de biomasse traitée à chaque étape du processus.

II.4.3. Fonction objectif sociale

Le développement des technologies de valorisation de la biomasse impacte la création d'emplois tout au long de la chaîne de valeur, engendrant diverses catégories d'emplois. Ceux-ci sont classés selon la chaîne de valeur technologique, l'impact économique, la nature territoriale, et la stabilité dans le temps. Les emplois technologiques incluent la recherche et développement (R&D), la fabrication, la distribution, le développement des projets, la construction et installation (C&I), et l'exploitation et maintenance (O&M) [251]. L'Agence Internationale pour les énergies renouvelables (IRENA) les classe en trois groupes : emplois directs (liées à la conception et exploitation des projets), emplois indirects (fournitures d'équipements et services), et en emplois induits (créés dans d'autres secteurs grâce à la richesse générée).

Concernant la nature territoriale et la stabilité, les emplois R&D et fabrication sont considérés stables mais peuvent être créés hors du territoire du projet, tandis que les emplois C&I sont temporaires mais souvent locaux, et les emplois de l'O&M sont locaux et stables [252].

Deux méthodes principales sont utilisées pour évaluer le potentiel de création d'emplois : la matrice des entrées-sorties (I-O) et la méthode du facteur d'emploi [253], [254]. La méthode I-O quantifie l'impact sur l'emploi en considérant les interactions sectorielles. Pour l'utiliser, il est essentiel de disposer de nombreuses données et une analyse détaillée des relations intersectorielles. La méthode du facteur d'emploi, plus simple et transparente, utilise des indicateurs tels que les emplois par mégawatt ou les emplois-années par mégawatt (emplois-années/MW).

En raison du manque de données fiables, l'analyse de l'impact social dans cette étude se concentre sur les emplois directs créés pendant l'exploitation des systèmes de production, utilisant la méthode du facteur d'emploi. La fonction sociale est établie suivant l'équation (20).

$$Jobs = \sum_z P_z * EF_z \quad (20)$$

Où z représente chaque maillon considéré dans la chaîne d'approvisionnement.

EF_z est l'intensité d'emploi pour un maillon z donnée de la chaîne d'approvisionnement (emplois ou emplois-années par unité de capacité).

P_z est la puissance référencée pour le maillon z (puissance installée pour les étapes liées à la fabrication, puissance cumulée pour les étapes d'exploitation et d'entretien et puissance fabriquée pour les étapes de fabrication des composants)

EF_z est déterminé suivant l'expression (21) ci-dessous [252].

$$EF_z = EF_{z,base} * \left(\frac{P_{cumulée_z}}{P_{cumulée_{z,base}}} \right)^{-\alpha} \quad (21)$$

Avec $EF_{z,base}$ est le facteur d'emploi considéré comme le cas de référence, $P_{cumulée_{z,base}}$ est la puissance installée pour une étape i donnée obtenue empiriquement. α est le facteur de correction à la courbe d'apprentissage de la technologie étudiées.

Pour pallier au manque de données dans le cas d'étude, les facteurs de correction pour les installations de valorisation de la biomasse ont été considérés identiques à ceux utilisés pour les installations des centrales photovoltaïques. Ces facteurs ont été fixés à 0,56 pour la construction & installation et à 0,42 pour l'opération & maintenance [255].

II.5. Les contraintes du modèle

Les contraintes sont des conditions qui doivent être respectées pour que la solution soit considérée comme valide. Elles représentent les limites et les restrictions du système modélisé. Les contraintes assurent que les solutions proposées respectent les réalités du problème. L'ensemble des contraintes qui décrivent le modèle est présenté ci-dessous.

II.5.1. Les contraintes de flux de matières

Les équations (22), (23), (24) et (25) définissent respectivement les quantités totales de biomasse brute et de biomasse prétraitée exploitées en fonction des quantités journalières et du nombre total de jours de travail estimé par an.

$$Q_{bmijplg} = FWB_{bmijplg} * HOJ * xblp_{blp} \quad \forall b, m, i, p, l, g \quad (22)$$

$$U_{omtjkrd} = FWO_{omtjkrd} * HOJ * f_{or} \quad \forall o, mt, j, k, r, d \quad (23)$$

$$Qik_{omtikrd} = QWO_{omtikrd} * HOJ * f_{or} \quad \forall o, mt, i, k, r, d \quad (24)$$

$$TV_{bmikrd} = TVW_{bmikrd} * HOJ * fbk_{bk} \quad \forall b, m, i, k, r, d \quad (25)$$

II.5.2. Les contraintes de capacité

La contrainte exprimée dans l'équation (26) stipule que la biomasse totale fournie par un site d'approvisionnement en biomasse ne doit pas excéder la quantité de biomasse disponible sur ce site. Les équations (27) et (28) garantissent que la quantité de biomasse b fournie au site de prétraitement j et la quantité de produit intermédiaire o livrée au site de conversion k sont limitées par les capacités respectives des technologies de prétraitement et de conversion disponible sur chacun des sites.

$$\sum_{mjlg} Q_{bmijplg} + Qip_{biplg} * xblp_{blp} \leq Sbi_{bi} * Yp_{plg} \quad \forall b, i, p, l, g \quad (26)$$

$$\sum_{pbim} Q_{bmijplg} \leq Kapj_{lg} * Tj_j \quad \forall j, l, g \quad (27)$$

$$\sum_{omij} U_{omijkrd} + \sum_{omti} Qik_{omtikrd} + \sum_{bmi} TV_{bmikrd} \leq Cap_{rd} * T_{krd} \quad \forall k, r, d \quad (28)$$

II.5.3. Les contraintes de conversion et d'équilibre des matériaux

Les équations (29) et (30) représentent les contraintes associées au prétraitement et à la conversion. Dans ces équations, rdp_{bol} représente le facteur de conversion de la biomasse b en produit intermédiaire o à travers la technologie de prétraitement l , tandis que rdm_{reo} désigne le facteur de conversion du produit intermédiaire o en produit fini e via la technologie de conversion r . La première équation assure que la quantité de produit intermédiaire (biomasse prétraitée) à transporter d'un site de prétraitement vers un site de conversion ne dépasse pas la quantité disponible sur le site de prétraitement. La seconde calcule la quantité de produit final obtenue en fonction de la quantité de biomasse (ou de produit intermédiaire convertie) et de l'efficacité de la technologie utilisée.

$$\sum_{mtrd} U_{omijkrd} \leq \sum_{miblg} Q_{bmijplg} * rdp_{bol} \quad \forall o, j, k, p \quad (29)$$

$$Ep_{ekrd} \leq \sum_{omij} U_{omijkrd} * rdm_{reo} + \sum_{bmi} TV_{bmikrd} * rdb_{ber} \quad (30)$$

$$\sum_{omti} Qik_{omtikrd} * rdm_{reo} \quad \forall e, k, r, d$$

II.5.4. Les contraintes de demande

L'équation (31), représente la contrainte de demande en produit fini e . Selon l'hypothèse iii), la demande en bioénergie doit être totalement satisfaite. Cela permet de garantir la performance, la fiabilité et l'efficacité globale de la chaîne logistique.

$$\sum_{rd} Ep_{ekrd} = Demand_{ek} \quad \forall e, k \quad (31)$$

II.5.5. Les contraintes de sélection de capacité et technologie de prétraitement et de conversion

Les contraintes exprimées par les équations (32), (33) et (34) établissent la règle selon laquelle on ne peut sélectionner qu'un seul niveau de prétraitement et sur chaque site de prétraitement et de conversion qu'une seule capacité et une seule technologie.

$$\sum_{rd} T_{krd} \leq 1 \quad \forall k \quad (32)$$

$$\sum_{lg} T_{jlg} \leq 1 \quad \forall j \quad (33)$$

$$\sum_{p1g} Y_{p1g} \leq 1 \quad (34)$$

II.5.6. Les contraintes liées au transport

Les contraintes liées au transport sont basées sur celles élaborées par How et al., [256] dans leur étude sur le transport. Les contraintes de temps de fonctionnement sont définies par les équations (35) à (38), où $OHMax$ représente la durée de fonctionnement par jour.

$$NV_{ij_{imj}} * OH_{imj_{imj}} \leq OHMax \quad \forall i, m, j \quad (35)$$

$$NV_{ik_{imk}} * OH_{imk_{imk}} \leq OHMax \quad \forall i, m, k \quad (36)$$

$$NV_{jk_{jmtk}} * OH_{jmtk_{jmtk}} \leq OHMax \quad \forall j, mt, k \quad (37)$$

$$NV_{imtk_{imtk}} * OH_{imtk_{imtk}} \leq OHMax \quad \forall i, mt, k \quad (38)$$

Les résidus agricoles et agro-industriels, en général, présentent une densité relativement basse [257]. Par conséquent, les moyens de transport sont souvent contraints soit par le volume ou soit par le poids. Dans cette étude, nous prenons en compte les contraintes de capacité liées à la capacité volumétrique des moyens de transport pour la biomasse agricole (équations (39) et (40)), ainsi que celles associées à la capacité massique de charge des modes de transport pour les biomasses agro-industrielles (équations (41) et (42)).

$$\sum_{ijbp1g} FWB_{binijp1g} / Dsb_b + \sum_{bikrd} TVW_{bmikrd} / Dsb_b \geq Qv_m \quad \forall m \quad (39)$$

$$\sum_{ojkrd} FWO_{ojmkrd} + \sum_{oikrd} QWO_{omtkrd} \geq Qvt_{mt} \quad \forall mt \quad (40)$$

$$\sum_{ijbp1g} FWB_{bimj1g} + \sum_{biklprd} TVW_{bmikrd} \geq Qm_m \quad \forall m \quad (41)$$

$$\sum_{ojkrd} FWO_{omtkrd} / Dso_o + \sum_{oikrd} QWO_{omtkrd} / Dso_o \geq Qmt_{mt} \quad \forall mt \quad (42)$$

Ces équations indiquent que les quantités de biomasse transportées chaque jour doivent être au moins égales à la capacité volumique ou massique de chaque moyen de transport utilisé ; cela garantit le remplissage de chaque moyen de transport utilisé.

Les équations (43) à (46) ont alors été utilisées pour déterminer le nombre de moyens de transport nécessaires pour le transport de la biomasse et des produits intermédiaires.

$$NVehij_{imj} \geq NVij_{imj} / NVMaxij_{imj} \quad \forall i, m, j \quad (43)$$

$$NVehjk_{jmtk} \geq NVjk_{jmtk} / NVMaxjk_{jmtk} \quad \forall j, mt, k \quad (44)$$

$$NVehimk_{imtk} \geq \sum_{ord} QWO_{omtkrd} * f_{or} / Qmt_{mt} * NVMaxik_{imtk} \quad \forall i, mt, k \quad (45)$$

$$NVehimk_{imtk} \geq \sum_{brd} TVW_{bmikrd} * fbk_{bk} / Qm_m * NVMaximk_{imtk} \quad \forall i, m, k \quad (46)$$

III. Approche de résolution

Le modèle proposé prend en considération simultanément les trois dimensions de la durabilité. Cette approche engendre un problème d'optimisation multi-objectifs [258]. La résolution de tels modèles est généralement ardue et complexe. Face à la nécessité de résoudre des problèmes complexes ou de prendre des décisions basées sur plusieurs critères, l'utilisation de méthodes structurées et efficaces devient essentielle [259].

Parmi les différentes méthodes disponibles, la méthode des sommes pondérées a été adoptée pour cette étude. Elle permet non seulement de générer plusieurs solutions en variant les poids de manière cohérente, mais aussi de fournir une solution unique qui reflète les préférences incorporées dans la sélection d'un ensemble de poids [260]. La méthode des sommes pondérées est une approche analytique puissante qui facilite la hiérarchisation et la comparaison des alternatives en prenant en compte différents facteurs pondérés. Elle constitue une base solide pour évaluer les options disponibles et prendre des décisions éclairées de manière systématique. Cette méthode permet d'exprimer un problème d'optimisation multi-objectif sous une forme mathématique simplifiée, se réduisant à un problème d'optimisation à objectif unique [258]. Cette fonction objectif unique est construite en agrégeant les fonctions objectifs individuelles

f_n , chacune pondérée par des coefficients (ω_n). Ainsi, la fonction objectif résultante prend la forme d'une somme pondérée. L'équation (47) illustre la forme générale du modèle :

$$\min \sum_{n=1}^N \omega_n * f_n(x) \quad (47)$$

Où $\omega_n \geq 0, \quad \forall n$

$\sum_{n=1}^N \omega_n = 1$. n étant le nombre d'objectifs.

Étant donné que les fonctions objectifs considérées peuvent avoir des dimensions ou des ordres de grandeur différents, comme c'est le cas ici, il est nécessaire de normaliser ces objectifs afin de les combiner pour former l'équation d'optimisation mono-objectif. Cette normalisation permet d'homogénéiser les objectifs pour qu'ils puissent être pondérés de manière appropriée dans la fonction objectif composite. Les poids utilisés dans cette pondération sont calculés comme suit : $\omega_n = \mu_n * \alpha_n$ où μ_n représente les poids attribués par le décideur et α_n sont les facteurs de normalisation [245], [261]. Différentes approches sont habituellement utilisées pour normaliser les fonctions objectifs : la normalisation par l'amplitude de la fonction objectif au point initial x_0 , la normalisation par le minimum des fonctions objectifs, et la normalisation par la différence entre les valeurs optimales aux points nadir et utopie [262]. La normalisation par le minimum des fonctions objectifs est celle choisie pour cette étude. Cette approche est jugée acceptable car les minimums des différentes fonctions objectifs étudiées sont tous différents de zéro. Elle est définie par l'équation (48) ci-dessous.

$$\alpha_n = 1 / f_n(x^{[n]}) \quad (48)$$

Où $x^{[n]}$ résolvant $\min_x \{f_i(x) : x \in \Omega\}$.

Appliquée au modèle développé dans ce travail, la fonction peut être reformulée comme présentée dans l'équation (49).

$$\text{Min Goba}l\text{Obj} = (\omega_{eco} * \alpha_{eco} * \text{Cost}) + (\omega_{env} * \alpha_{env} * \text{GES}) - (\omega_{soc} * \alpha_{soc} * \text{Jobs}) \quad (49)$$

Où ω_{eco} , ω_{env} , ω_{soc} représentent les poids des fonction objectifs économique, environnemental et sociale respectivement et,

α_{eco} , α_{env} , α_{soc} , les coefficients de normalisation des fonctions objectifs économique, environnementale et sociale respectivement.

Conclusion

Face aux enjeux énergétiques et environnementaux que connaissent les entreprises agro-industrielles au Burkina Faso, la réutilisation des résidus pour la production d'énergie apparaît comme une solution prometteuse. Elle permet de réduire la dépendance vis-à-vis du réseau national et de mieux gérer les déchets. Ce chapitre s'est concentré sur la modélisation des chaînes d'approvisionnement en biomasse, en englobant les activités de récolte/collecte de la biomasse, du transport, du prétraitement et de la conversion de la biomasse en bioénergie.

Les critères d'optimisation économique, environnemental et social ont été définis pour configurer des réseaux d'approvisionnement durables et efficaces. Les hypothèses et limites du problème ont été établies, et la complexité du système a été analysée, soulignant les défis posés par la nature multi-objectifs du modèle et les nombreux paramètres à considérer. La formulation mathématique du problème en termes de programmation linéaire en nombre entiers mixte (MILP) a été présentée, et la méthode somme pondérée envisagée pour la résolution a été décrite. Le modèle développé vise à déterminer une configuration optimale de la chaîne d'approvisionnement pour une exploitation durable des résidus agricoles et agroindustriels au Burkina Faso.

Chapitre 5 : Implémentation du modèle d'optimisation

Après la formulation du modèle mathématique dans le chapitre précédent, ce chapitre se concentre sur l'implémentation pratique du modèle proposé. L'objectif est de démontrer l'applicabilité et l'efficacité du modèle à travers un cas d'étude représentatif du contexte burkinabé.

La première section de ce chapitre décrit en détails le cas d'étude choisi. Cette section présente les caractéristiques spécifiques du site, les types de biomasse disponibles, les infrastructures existantes et les données contextuelles nécessaires pour la simulation. Elle vise à fournir une compréhension claire du scénario réel dans lequel le modèle d'optimisation sera appliqué.

La deuxième section est dédiée à la présentation des résultats obtenus et à leur discussion. Les solutions optimisées fournies par le modèle seront analysées en termes de coûts, de nombre d'emplois créés et d'impact environnemental.

I. Description du cas d'étude

Les visites de terrains effectuées dans la région des Hauts-Bassins ont révélé que les unités agroindustrielles présentes dans cette zone ont des besoins énergétiques distincts pouvant être satisfaits par la biomasse. Ces besoins varient en fonction des activités spécifiques de chaque unité. Par exemple, certaines unités, telles que les unités de séchage de mangue et de transformation d'anacarde, nécessitent principalement de la chaleur pour leur processus, tandis que d'autres, comme les rizeries, dépendent principalement de l'électricité.

En outre, les périodes d'activité de ces unités diffèrent considérablement. Certaines fonctionnent tout au long de l'année, tandis que d'autres ne sont opérationnelles que pendant une période limitée, généralement entre trois et quatre mois, en fonction de la disponibilité des matières premières. Par conséquent, ces unités produisent des résidus de biomasse dont la disponibilité varie également au fil du temps. On distingue ainsi des biomasses disponibles toute l'année, appelées « biomasse annuelles », et celles disponibles uniquement sur une courte période, désignées comme « biomasses saisonnières » dans la suite des travaux.

C'est dans ce contexte que s'inscrit le présent cas d'étude, qui se porte sur deux unités agroindustrielles situées à Bobo-Dioulasso, chef-lieu de la région des Hauts-Bassins au Burkina Faso (Figure 32). Ces unités exploitent la biomasse comme source d'énergie pour la production de la chaleur et de l'électricité pour leur autoconsommation. La première unité, utilise des biomasses annuelles telles que la balle de riz, les coques d'anacarde et les tiges de cotonnier. La seconde unité, quant à elle, se focalise sur la biomasse saisonnière, notamment les résidus

de mangue (noyaux et épluchures). La durée de fonctionnement de la première unité est de 11 mois (334 jours), tandis que la seconde fonctionne sur 3 mois (90 jours).

Pour les besoins de l'étude, ces deux unités sont considérées comme étant situées au même emplacement. L'objectif de l'étude est de simuler la production de chaleur et d'électricité dans chaque unité en fonction des différents types de biomasses disponibles, afin de déterminer le réseau d'approvisionnement optimal pour chaque type de biomasse en fonction du type d'énergie à produire. Les besoins énergétiques annuels des unités simulées sont estimés à 1210 MWh d'électricité et 1500 MWh de chaleur pour la première unité, et à 290 MWh d'électricité et 1050 MWh de chaleur pour la deuxième.

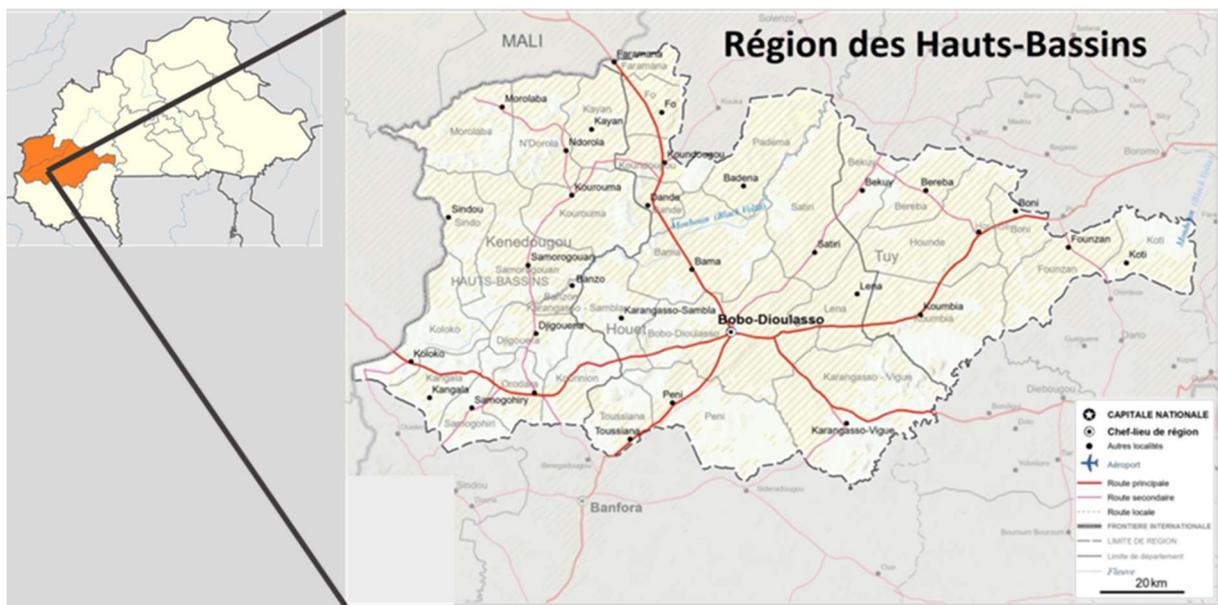


Figure 32 : Localisation de la région des Hauts-Bassins

Les échanges avec les industriels locaux ont révélé un intérêt marqué pour l'utilisation des tiges de cotonnier à des fins énergétiques, à condition qu'un prétraitement soit effectué avant livraison. La raison est que les caractéristiques des tiges de cotonnier rendent leur récolte complexe et coûteuse, augmentant les coûts d'approvisionnement et posant des défis majeurs pour leur utilisation à grande échelle. Bobo-Dioulasso, en tant que capitale économique du pays, abrite environ 80% des unités de transformation de la noix de cajou, avec des initiatives de valorisation des coques de cajou, telles que la production de briquettes, de cashew nutshell liquid (CNSL), et leur utilisation comme combustibles pour la production de la chaleur. Toutefois, les exploitants rencontrent des problèmes liés à la nature corrosive du CNSL contenu dans les coques, qui endommage les grilles des chaudières et des pyrolyseurs, entraînant des arrêts fréquents et des coûts d'exploitation supplémentaires. Le prétraitement de cette biomasse

par l'extraction du CNSL se présente comme une alternative intéressante pour l'exploitation de cette ressource. En outre, environ 70% des unités de transformation de la mangue sont également situées dans cette région, où les noyaux et épiluchures de mangue présentent un potentiel significatif pour la production de la bioénergie, bien que leur exploitation reste limitée. Les processus de transformation dans les différentes unités agroalimentaires ainsi que les étapes génératrices de résidus sont illustrés dans **l'Annexe 3**.

Enfin, l'utilisation de la balle de riz comme combustible a déjà été expérimentée, démontrant le potentiel de ces résidus pour la production de bioénergie dans la région. Au regard de ce qui précède, la région des hauts-Bassins, première productrice de résidus agricoles et agroindustriels au Burkina Faso, offre un contexte favorable pour cette étude.

I.1. Disponibilité et collecte de la biomasse

Les données sur la disponibilité de la biomasse proviennent de l'évaluation réalisée dans le chapitre 4 pour la région des Hauts-Bassins d'une superficie d'environ 25 344 km². Pour les besoins de la simulation, les coordonnées géographiques des fournisseurs de tiges de cotonnier ont été générées de façon aléatoire dans la zone d'étude. En effet, dans la filière coton au Burkina Faso, les producteurs sont organisés sur le terrain en groupements sous forme pyramidale avec à la base les groupements de producteurs de coton (GPC) et au sommet, l'union nationale des producteurs de coton (UNPCB) [263]. Les Groupements de Producteurs de Coton (GPC) assurent la collecte du coton et la vente auprès des sociétés cotonnières d'égrainage comme le montre la Figure 33.

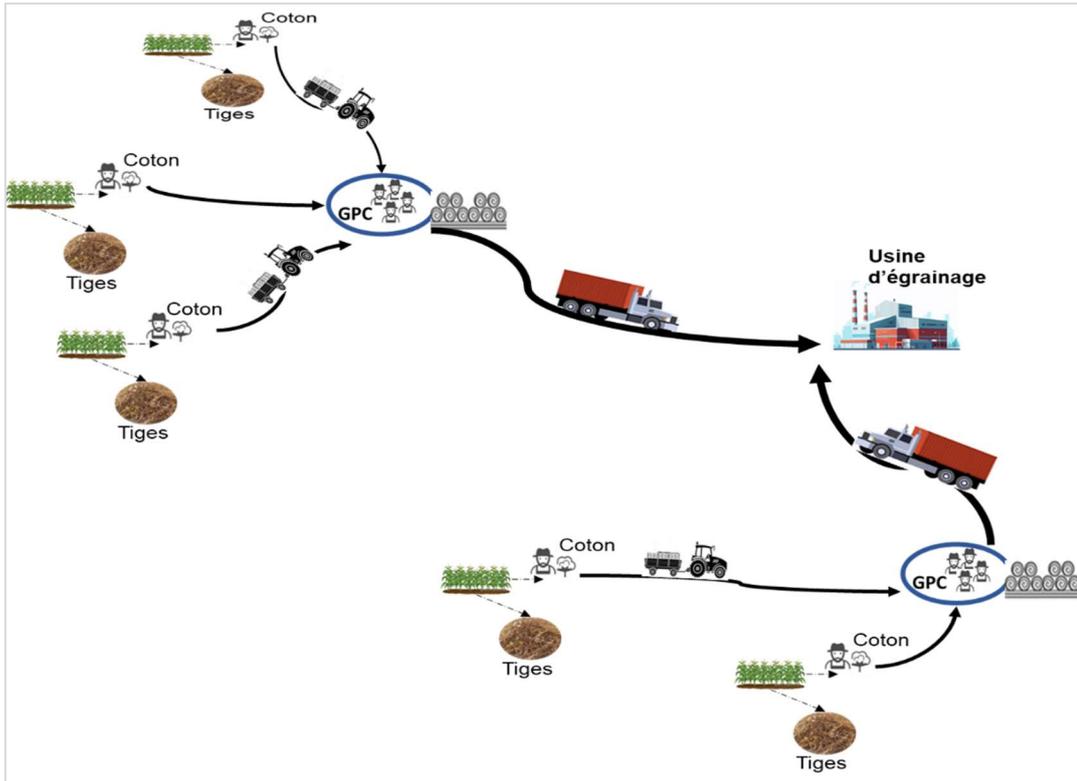


Figure 33 : Organisation des producteurs de la filière coton au Burkina Faso

La chaîne d'approvisionnement des tiges de cotonnier proposée s'appuie sur cette organisation existante de la filière, où les Groupements de Producteurs de Coton seront considérés comme les fournisseurs des tiges de cotonnier ; cela facilite la coordination avec les producteurs. Dans cette configuration, les producteurs individuels récoltent et acheminent les tiges au niveau de ces structures où elles seront pesées et vendues comme illustré dans la Figure 34 ci-dessous.

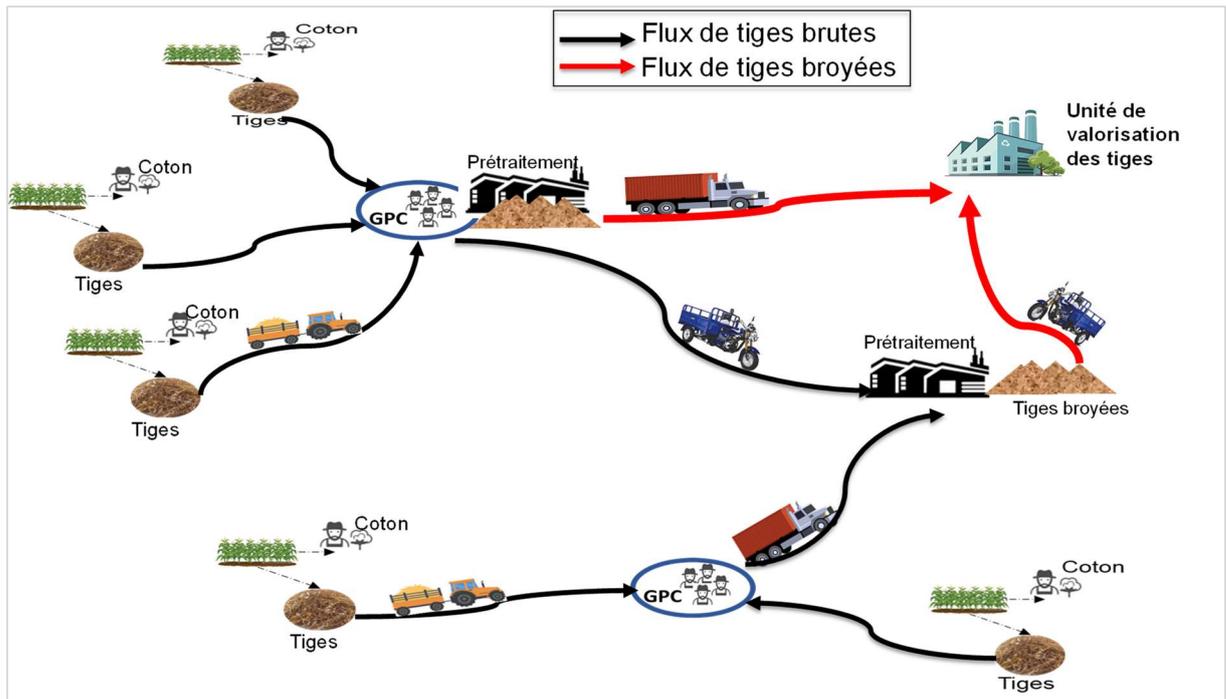


Figure 34 : Organisation du circuit d'exploitation des tiges de cotonnier

La région des Hauts-Bassins regroupe plus de 52% des 11 063 GPC que compte le pays. Les superficies exploitées par les GPC varient entre 15 et 125 hectares. Le rendement des tiges a été supposé à 2 tonnes par hectare [66]. Pour les besoins de l'étude, 98 GPC potentiels ont été retenus et la distribution aléatoire suivante des superficies a été considérée :

- 25% des GPC exploitent des superficies allant de 15 à 20 hectares
- 25% des GPC exploitent des superficies allant de 21 à 50 ha
- 40% des GPC ont des exploitations dont les superficies varient de 51 à 100 ha
- 10% des GPC exploitent des superficies allant de 101 à 125 ha

Pour la biomasse agroindustrielle, 22 sites potentiels ont été recensés : 11 pour les résidus de mangue, 6 pour les coques d'anacarde et 5 pour la balle de riz. Les configurations des chaînes d'approvisionnement associées aux différentes filières de résidus agroindustriels sont représentées dans les Figure 35, Figure 36 et Figure 37 respectivement.

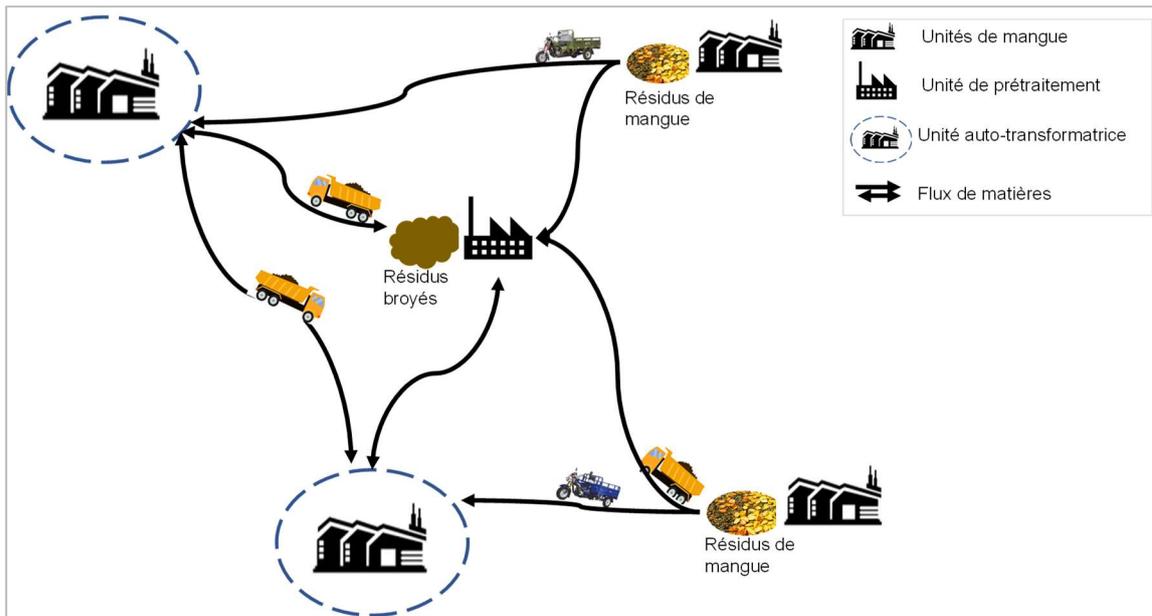


Figure 35: Configuration de la chaîne d’approvisionnement de la filière des résidus de mangue (noyaux et épluchures)

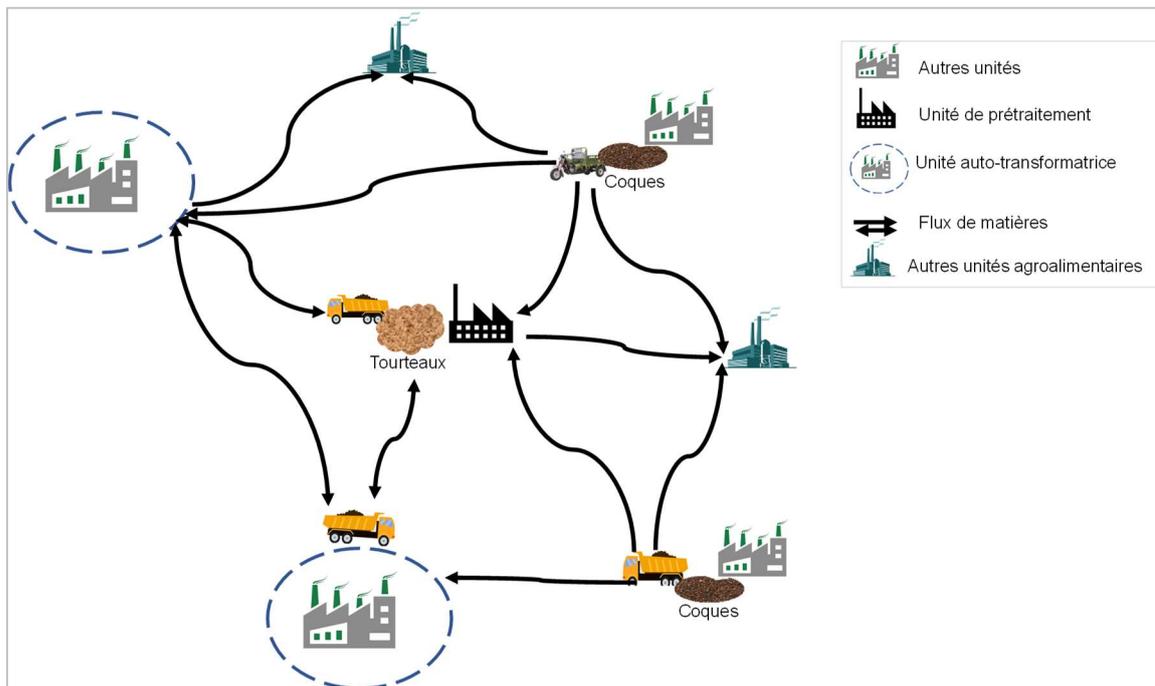


Figure 36: Configuration de la chaîne d’approvisionnement de la filière des coques d’anacarde

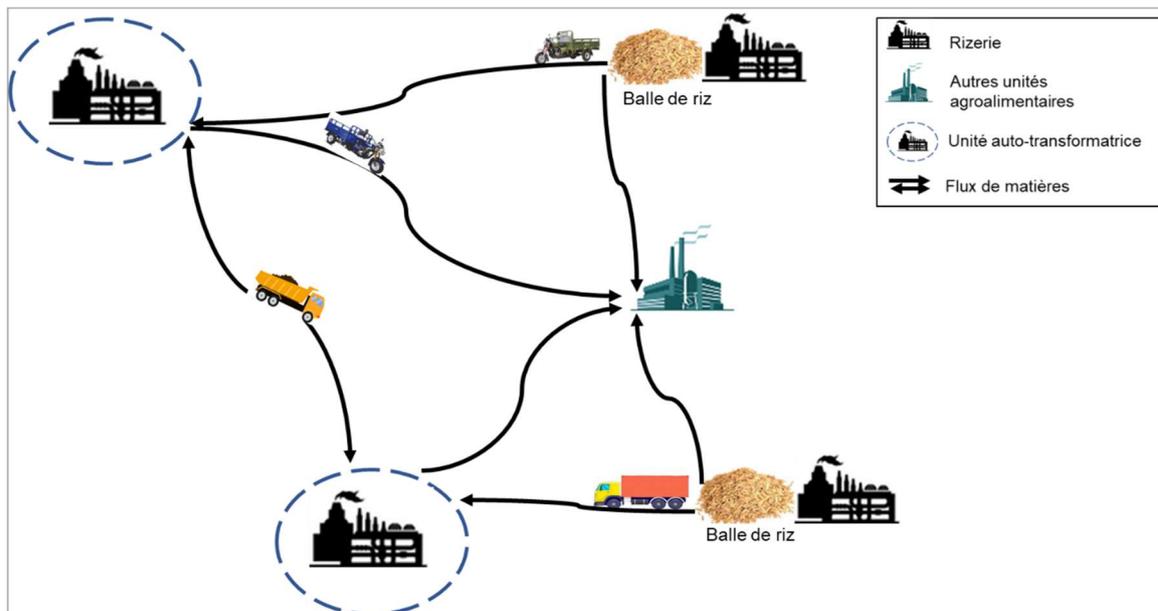


Figure 37: Configuration de la chaîne d’approvisionnement de la filière balle de riz

Les sites de biomasses sont identifiés de S1 à S120 avec S1 à S22 correspondent aux unités de transformation agroindustrielles et ceux allant de S23 à S120 représentant les Groupements de Producteurs de coton (GPC). La Figure 38 illustre la répartition des différents sites de biomasse dans la zone d’étude.

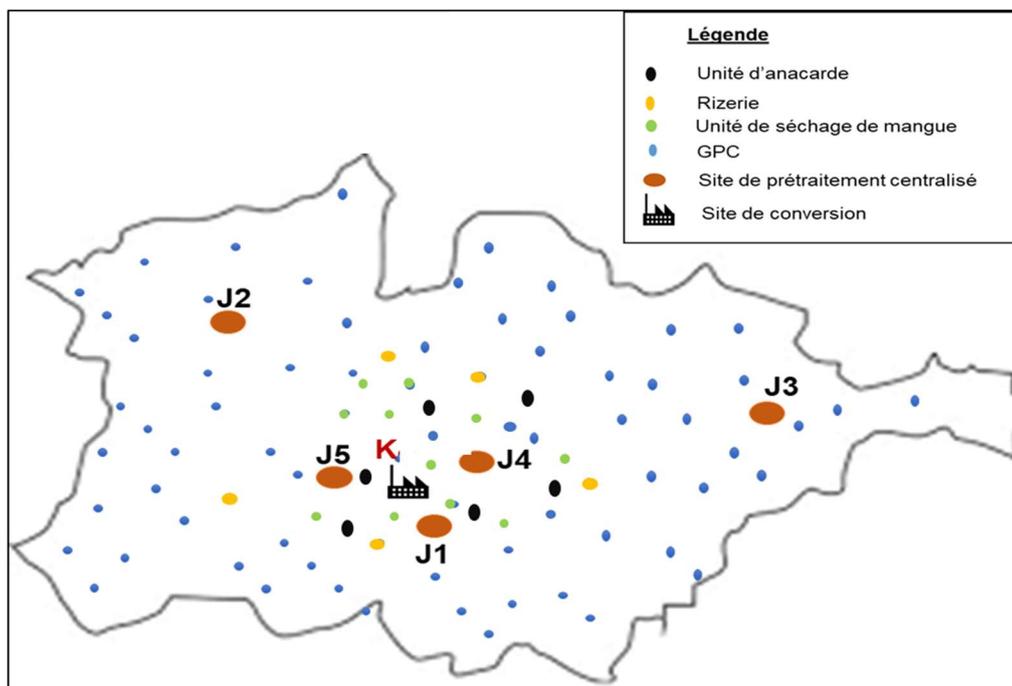


Figure 38 : Répartition des sites de production des biomasses dans la zone d’étude

Le réseau d’approvisionnement étudié est présenté en **Annexe 5.1**.

Faute de données sur les capacités réellement exploitées des unités agroindustrielles, une hypothèse de 70% d'exploitation des capacités maximales des unités installées a été considérée. Le Tableau 25 présente les capacités des unités et leurs potentiels en résidus.

Tableau 25 : Capacités des sites de production des résidus agro-industrielles.

Sites	Produits	Capacité théorique (t/an)	Potentiel en résidus (t)
S1	Mangue	18	342
S2	Mangue	40	760
S3	Mangue	45	855
S4	Mangue	100	1 900
S5	Mangue	50	950
S6	Mangue	450	8 550
S7	Mangue	300	5 700
S8	Mangue	70	1 330
S9	Mangue	50	950
S10	Mangue	60	1 140
S11	Mangue	30	570
S12	Anacarde	1 750	1 225
S13	Anacarde	8 400	5 880
S14	Anacarde	2 800	1 960
S15	Anacarde	420	294
S16	Anacarde	1 050	735
S17	Anacarde	1 050	735
S18	Riz paddy	2 887,5	1 876,87
S19	Riz paddy	2 100	1 365
S20	Riz paddy	1 169	759,85
S21	Riz paddy	2 450	1 592,5
S22	Riz paddy	1 732,5	1 126,12

Le prix d'achat des tiges de coton auprès des GPC est fixé à 10 000 FCFA la tonne, tandis que celui de la balle de riz est de 16 400 FCFA par tonne [170]. Les prix des résidus de noix de cajou sont fixés à 5 000 FCFA la tonne.

Pour le scénario de base, les résidus de mangue ne sont pas vendus conformément à ce qui est observé sur le terrain. Cependant, il est présumé que l'exploitation de ces résidus entrainera la création d'un marché où ces derniers pourraient être vendus. En raison de l'incertitude sur ces données, une analyse de sensibilité sera menée sur les possibles variations du coût de la biomasse. Les coûts de l'eau et l'électricité sont fixés à 1 104 FCFA par mètre cube pour l'eau, selon l'Office National de l'Eau et de l'Assainissement (ONEA) [264], et 130,24 FCFA par kWh pour l'électricité, selon la Société Nationale d'Electricité du Burkina Faso (SONABEL) [265]. Une journée de travail est équivalent à 8 heures et le coût journalier de la main d'œuvre est estimé à 1363,91 FCFA, correspondant au salaire minimum journalier des ouvriers agricoles [149].

I.2. Transport de la biomasse

Le transport de la biomasse entre les sites de production de la biomasse et les sites de prétraitement est assuré par un ensemble de moyens de transport et comprend des tricycles et des camions. Après prétraitement, le transport des produits intermédiaires vers les sites de conversion est assuré par un ensemble de moyens de transport constitué également de tricycles et de camions.

Aucun choix préalable n'est imposé sur le moyen de transport spécifique à utiliser entre ceux disponibles. Toutefois, les contraintes liées à la densité des biomasses permettent de déterminer le nombre et les types de véhicules nécessaires. Le Tableau 26 présente les densités des biomasses étudiées.

Tableau 26 : Densités des résidus étudiés

Caractéristiques	Densité (kg/m ³)
Tige de coton brutes	30,20 [266]
Tige de coton broyées	146,58 [266]
Coques d'anacarde	385 [169]
Tourteaux de coques d'anacarde	481[169]
Noyaux de mangue	1005 [202]
Balle de riz	97,33 [267]

En raison du manque de données fiables sur le réseau routier en milieu rural, la valeur du facteur de tortuosité a été estimée à 1,5 [268]. Les distances entre les différents sites sont indiquées dans l'Annexe 4. Les coûts unitaires de transport sont fixés à 52 FCFA/t.km

pour le camion et à 27 FCFA/t.km pour le tricycle [149]. Le Tableau 27 résume les principales caractéristiques des moyens de transport.

Tableau 27 : Caractéristiques des moyens de transport utilisés

Caractéristiques	Unité	Tricycle	Camion
Charge maximale	t	1	12
Volume maximal	m ³	2,6	51
Vitesse moyenne	km/h	40	50
Taux d'intérêt	%	10	10
Durée de vie	Années	5	10
Prix d'achat	FCFA	1 500 000	7 000 000
Coût opérationnel unitaire	FCFA/t.km	27	52
Facteur d'émission	kgeqCO ₂ /t.km	0,0963	0,0619

La charge maximale d'un tricycle est de 1 tonne avec un volume maximal de 2,6 m³. Le poids maximal de transport pour le camion est de 12 tonnes avec un volume maximale de 51 m³. Les vitesses moyennes sont respectivement de 40 km/h pour le tricycle et 50 km/h pour le camion. Les émissions des GES ont été déterminées à partir de la base de données «ecoinvent». Les facteurs d'émission sont de 0,0963 kgeqCO₂/t.km pour le tricycle et de 0,0619 kgeqCO₂/t.km pour le camion [149].

I.3. Prétraitement de la biomasse

Pour les tiges, le broyage a été l'option de prétraitement privilégiée. Ainsi, deux options ont été envisagées pour le prétraitement : dans la première option, le prétraitement peut être fait au niveau des groupements des producteurs de coton (GPC). Ces GPC étant situés souvent dans des zones n'ayant pas accès au réseau électrique, le prétraitement est réalisé au moyen de broyeurs thermiques fonctionnant au gasoil. Ainsi, chaque GPC est alors considéré comme un site potentiel de prétraitement. La deuxième option consiste en la mise en place d'unités de prétraitement centralisées dans les chefs-lieux des trois provinces de la région (Bobo-Dioulasso, Orodara, Houet), permettant d'utiliser des infrastructures et services existants, tels que l'accès à la main d'œuvre qualifiée et au réseau électrique. Les broyeurs envisagés ont des capacités potentielles allant de 0,2 à 4 t/h avec un palier de 0,2 t/h. Le broyage est également l'option de prétraitement retenue pour les résidus de mangue. A ce niveau, l'option retenue est de faire le prétraitement sur des sites centralisé uniquement.

Dans la région des Hauts-Bassins, la majorité des unités de transformation de l'anacarde sont concentrées dans la ville de Bobo-Dioulasso. Pour répondre aux défis posés par l'utilisation des coques butes, deux sites de prétraitement centralisés sont envisagés dans la ville pour la production des tourteaux (prétraitement). Ce prétraitement ne peut s'effectuer que dans ces installations centralisées, où l'utilisation de presses pour traiter les coques a été retenue comme technologie principale. Dans le cadre de l'implémentation du modèle, des presses avec des capacités allant de 0,2 à 4 tonnes par heure, avec un pas de 0,2 tonne/heure, ont été considérées. Le Tableau 28 résume les caractéristiques des différentes technologies de prétraitement considérées.

Tableau 28 : Caractéristiques des différentes technologies de prétraitement [269]

Technologies	Presse de coques	Broyeur
Capacité (t/h)	0,2 à 4	0,2 à 4
Rendement	0,75	0,98
Durée de vie (années)	10	10

Les émissions liées au prétraitement sont déterminées en fonction de la consommation énergétique des équipements. L'électricité consommée lors de cette opération est supposée provenir du réseau national, dont le facteur d'émission est estimé à 0,606 t eqCO₂/MWh [270]. La consommation en carburant du broyeur thermique est estimée à 2,7 litres/tonne avec un facteur d'émission de 0,0036 teqCO₂ par tonne de biomasse prétraitée.

I.4. Conversion de la biomasse

La conversion de la biomasse vise à produire de la chaleur ou de l'électricité selon le besoin des différentes unités agroindustrielles. Les enquêtes de terrain ont permis d'identifier quatre procédés potentiels pour la valorisation des résidus en chaleur et en électricité. Il s'agit des procédés suivants : (i) production de chaleur ou d'électricité par combustion ; (ii) production de chaleur ou d'électricité par gazéification ; (iii) production de chaleur ou d'électricité par pyrolyse ; et (iv) production de chaleur ou d'électricité par méthanisation. Le Tableau 29 décrit les types de matières premières de biomasse utilisées pour chaque procédé.

Tableau 29 : Besoins en matières premières des technologies

Procédés de conversion	Types de biomasse	Taux d'humidité
Combustion	Tiges de coton, coques d'anacarde, noyaux de mangue, balle de riz	10 – 50 %
Gazéification	Tiges de coton, coques d'anacarde, noyaux de mangue, balle de riz	< 20%
Pyrolyse	Tiges de coton, coques d'anacarde, noyaux de mangue, balle de riz	< 20 %
Digestion anaérobie	Epluchures de mangue + bouse de vache	60 – 95 %

Les procédés de combustion, de pyrolyse et de gazéification peuvent convertir les tiges de coton, les coques d'anacarde et les noyaux de mangue. En revanche, le procédé de méthanisation ne pourra être utilisé que pour convertir les épluchures de mangue.

Des études antérieures ont montré que les épluchures de mangue pouvaient être valorisées en biogaz [271]–[273]. Toutefois, une production optimale de biogaz est obtenue en les associant à un autre substrat, comme la bouse de vache. La proportion optimale est de 70% d'épluchures de mangue et de 30% de bouse de vache [274]. Ces proportions sont adoptées dans la présente étude. L'utilisation de cosubstrats dans les systèmes de digestion anaérobie améliore le rendement en biogaz et augmente la disponibilité des nutriments pour les bactéries. Le cosubstrat utilisé est fourni par l'abattoir frigorifique de Bobo-Dioulasso, qui produit annuellement près de 3 723 tonnes de déchets peu exploités. Le coût de mobilisation du cosubstrat est fixé à 5 000 FCFA/t. Les technologies de production de la chaleur et de l'électricité étudiées sont présentées dans le Tableau 30 ci-dessous.

Tableau 30 : Technologies de conversion étudiées

Description des technologies	Symboles	Energies produites
Chaudière	BFH	Chaleur
Pyrolyseur + chaudière	PFH	
Gazogène + chaudière	GFH	
Digesteur + chaudière	ADFH	
Chaudière + Turbine à vapeur	BFP	Electricité
Pyrolyseur + chaudière + Turbine à vapeur	PFP	
Gazogène + moteur à syngas	GFP	
Digesteur + moteur à biogaz	ADFP	

Chaque technologie candidate offre une capacité allant de 0,02 à 2 MW avec un pas de 0,02 MW.

Les paramètres d'entrée des technologies sont consignés dans le Tableau 31 ci-dessous.

Tableau 31 : Paramètres d'entrée des technologies considérées

Caractéristiques	Rendement électrique	Rendement thermique	Durée de vie
BFH	0	0,71	20
PFH	0	0,66	20
GFH	0	0,65	20
ADFH	0	0,6	20
BFP	0,18	0	20
PFP	0,19	0	20
GFP	0,17	0	20
ADFP	0,38	0	20

Les émissions de gaz à effet de serre (GES) des différentes technologies ont été déterminées en fonction de l'intensité d'émission propre à chaque technologie et du PCI de la biomasse utilisée. Les intensités d'émissions considérées sont les moyennes tirées de [275], et sont respectivement de 0,27 kgeqCO₂/MJ pour les procédés de combustion, 0,08 kgeqCO₂/MJ pour la gazéification, 0,05 kgeqCO₂/MJ pour la pyrolyse, et 0,04 kgCO₂/MJ pour la digestion anaérobie.

Les facteurs d'emploi, utilisés pour estimer le nombre d'emplois créés, proviennent de la littérature et de données collectées sur le terrain. En absence de données spécifiques, les facteurs d'emploi pour la phase « construction et installation » ont été extraits de la littérature. Pour une

puissance installée de 1 MW, les facteurs d'emploi pour les centrales à combustion, pyrolyse et gazéification ont été fixés à 14 tandis que celui de la méthanisation a été pris à 25 [276], [277]. Les facteurs d'emploi pour la phase opération et maintenance proviennent des données de terrain collectées auprès de certaines centrales de bioénergie au Burkina Faso. Par exemple, pour une puissance installée de 2,7 MW, la centrale à biomasse de la SN Citec emploie environ 18 personnes pour la phase opération et maintenance. De même, Faso biogaz, avec une puissance installée de 0,52 MW emploie environ 19 personnes. En raison du manque de projets réussis de gazéification au Burkina Faso, le facteur d'emplois pour cette technologie a été basé sur les données de pays ayant une bonne expérience, comme la Chine et l'Inde. Le facteur d'emploi pour la phase O&M a ainsi été fixé à 9 emplois/MW [278].

II. Fixation des poids des objectifs

La modélisation des préférences d'un décideur en termes de poids peut être réalisée à l'aide de plusieurs méthodes, parmi lesquelles la méthode AHP développée par Saaty [219]. Elle est la plus connue et largement utilisée [218], [279], [280]. La méthode AHP repose sur la hiérarchisation des critères et des alternatives, décomposant un problème complexe en une série de niveaux hiérarchiques où chaque niveau représente des critères ou des objectifs spécifiques. Les décideurs comparent ensuite les critères à chaque niveau par paire, attribuant des valeurs pour exprimer leur préférence relative. Ces comparaisons par paire permettent de calculer les poids des critères à chaque niveau, établissant ainsi une pondération finale pour prendre des décisions éclairées tenant compte des priorités et des interrelations des critères.

Des entretiens avec 17 acteurs locaux du domaine de la bioénergie ont révélé qu'environ 57% accordaient une importance prédominante aux raisons économiques, près de 40% aux raisons environnementales, et seulement 3% aux raisons sociales dans leurs choix de valorisation des résidus agricoles et agro-industriels. Sur la base de ces résultats, l'hypothèse suivante a été émise pour le calcul des poids des fonctions objectifs : le critère économique est légèrement plus important que le critère environnemental et modérément plus important que le critère social, tandis que le critère environnement est considéré légèrement plus important que le critère social. Le Tableau 32 présente les poids des différentes fonctions objectifs.

Tableau 32 : Poids des fonctions objectifs

Fonctions objectifs	Economique	Environnemental	Social
Poids	0,593	0,304	0,103

Ainsi, la méthode AHP, par son approche structurée et systématique, permet de modéliser efficacement les préférences des décideurs, aidant ainsi à prendre des décisions équilibrées et bien informées. L'application de cette méthode dans le domaine de la bioénergie met en évidence l'importance relative des critères économiques, environnementaux et sociaux, facilitant l'optimisation des choix de valorisation des résidus agricoles et agroindustriels.

III. Analyse de sensibilité

Afin d'identifier les principaux facteurs susceptibles d'influencer les coûts de la chaîne d'approvisionnement en résidus agricoles et agroindustriels, une analyse de sensibilité a été effectuée sur certains paramètres clés. Plus précisément, il s'agit d'examiner l'impact du coût unitaire de l'achat de la biomasse et du coût du prétraitement sur les coûts optimaux des chaînes d'approvisionnement. Pour ce faire, les scénarios suivants ont été évalués :

Scénario I : impact du coût de la biomasse

Avec l'augmentation prévue de l'utilisation des résidus agricoles et agro-industriels dans divers secteurs concurrents, tels que leur utilisation en tant que combustible ou matières premières, une réduction de la disponibilité de la biomasse est anticipée. Cette diminution de l'offre pourrait provoquer une hausse des coûts associés à la biomasse. Afin d'évaluer l'impact potentiel de cette fluctuation sur les coûts optimaux des chaînes d'approvisionnement, une simulation a été menée en modifiant le coût unitaire de la biomasse.

Pour les biomasses annuelles, le coût a été simulé avec une augmentation progressive de 20% à 80%, avec un pas de 20%. Concernant les biomasses saisonnières telles que les noyaux et les épiluchures de mangue, un prix plancher de 5 000 FCFA a d'abord été fixé, suivi d'une augmentation du coût entre 20% et 60%, également par palier de 20%.

Scénario II : Impact du coût du prétraitement

Le coût opérationnel du prétraitement est étroitement lié au prix de l'électricité consommé par les technologies utilisant des procédés électriques et au prix du gasoil pour les technologies thermiques. Compte tenu de la volatilité des prix des combustibles fossiles et de l'électricité, les tendances à la hausse constituent une préoccupation constante. Cette situation est particulièrement préoccupante pour les pays en développement comme le Burkina Faso, où la

dépendance aux importations énergétiques et les infrastructures limitées exacerbent l'impact des fluctuations de prix.

Pour évaluer l'influence de ces variations sur les coûts optimaux des chaînes d'approvisionnement, une simulation a été effectuée en appliquant une variation progressive des prix unitaires de l'électricité et du carburant, allant de 5% à 20%, avec un pas de 5%. Cette analyse permettra de mieux comprendre comment les fluctuations des coûts énergétiques peuvent affecter la rentabilité des chaînes d'approvisionnement dans un contexte de vulnérabilité énergétique.

IV. Résultats et discussions

Le modèle mathématique élaboré a été implémenté à l'aide du logiciel d'optimisation GAMS Studio 40.1.0 et résolu à l'aide du solveur CPLEX. Les différentes simulations ont été réalisées à l'aide d'un ordinateur de processeur 11th Gen Intel(R) Core (TM) i7-1165G7 @ 2.80GHz 1.69 GHz avec 16 Go de RAM sur un système d'exploitation de 64 bits. Cette section présente et discute les résultats obtenus suite à l'implémentation du modèle d'optimisation proposé.

IV.1. Structures des chaînes d'approvisionnement optimales des différentes filières

Cette section examine les résultats obtenus à la suite de l'implémentation du modèle sur la configuration des chaînes d'approvisionnement optimales pour la production d'électricité et de chaleur dans les différentes filières bioénergie. Le Tableau 33 ci-dessous présente les caractéristiques des configurations optimales obtenues. Il peut être décrit comme suit :

- Pour la production d'électricité

- ***Tiges de cotonnier (TC)*** : La chaîne optimale inclut 22 sites (S24, S27, S32, S33, S38, S40, S42, S51, S57, S64, S66, S68, S74, S79, S81, S82, S83, S90, S99, S109, S110, S120), avec un broyeur thermique de 0,2 t/h en prétraitement sur les sites eux-mêmes. La quantité totale exploitée est de 7 262,9 tonnes, avec un coût de 117,56 millions FCFA et une conversion en électricité par un pyrolyseur (PFP) de 400 kW. La configuration du réseau est illustrée en **Annexe 5.2.a**.
- ***Coques d'anacarde (CA)*** : La chaîne repose sur 5 sites (S13, S14, S15, S16, S17) et un prétraitement centralisé en J1 (**Annexe 5.3.a**), utilisant une presse de 1,8 t/h. Avec une quantité optimale de 9 490,2 tonnes de coques, cette filière utilise un pyrolyseur (PFP) de 400 kW et coûte 257,57 millions FCFA.

- **Balles de riz (BR)** : Le site unique S19 fournit 3 457,143 tonnes de biomasse sans besoin de prétraitement. Cette filière utilise un pyrolyseur (PFP) de 160 kW pour une exploitation coûtant 49,41 millions FCFA. Le réseau d'approvisionnement de la filière est illustré en **Annexe 5.4**.
- **Noyaux de mangue (NM)** : Sept sites (S2, S4, S5, S6, S7, S9, S10) alimentent cette filière, avec un prétraitement centralisé en J1 (**Annexe 5.5.a.**) grâce à un broyeur électrique de 1,2 t/h. La quantité exploitée est de 1 557,46 tonnes et la conversion se fait via le système de gazéification (GFP) de 140 kW, pour un coût total de 19,16 millions FCFA.
- **Épluchures de mangue (EM)** : Cette filière comprend le site S4 avec un prétraitement en J5 (**Annexe 5.6.a.**) à l'aide d'un broyeur de 0,8 t/h. La biomasse, complétée par des déchets d'abattoir, est valorisée via un digesteur (ADFP) de 80 kW, traitant 778,733 tonnes pour un coût de 43,7 millions FCFA.

- Production de chaleur

- **Tiges de cotonnier (TC)** : La filière repose sur 7 sites (S32, S42, S57, S79, S82, S99, S120) (**Annexe 5.2.b.**), avec un broyeur thermique de 0,2 t/h en prétraitement décentralisé. La quantité exploitée est de 2 319,11 tonnes, et une chaudière de 160 kW est utilisée pour la conversion, pour un coût de 42,21 millions FCFA.
- **Coques d'anacarde (CAN)** : Trois sites (S13, S16, S17) sont exploités, avec un prétraitement en J1 via une presse de 0,6 t/h (**Annexe 5.3.b.**). La conversion s'effectue par un pyrolyseur (PFH) de 400 kW, traitant 3 030,3 tonnes de coques pour un coût de 92,13 millions FCFA.
- **Balles de riz (BR)** : Le site S19 fournit 2 027,027 tonnes de balles de riz converties directement avec un pyrolyseur (PFH) de 160 kW, sans prétraitement. Le coût de la filière s'élève à 31,92 millions FCFA. La configuration du réseau est présentée en **Annexe 5.4**.
- **Noyaux de mangue (NM)** : Neuf sites (S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9, S10) sont exploités pour un total de 1 623,37 tonnes de noyaux, prétraités en J1 (**Annexe 5.5.b.**) avec un broyeur de 1,2 t/h. Un pyrolyseur (PFH) de 160 kW est utilisé pour la conversion, avec un coût de 11,36 millions FCFA.
- **Épluchures de mangue (EM)** : Deux sites (S4, S6) alimentent cette filière, avec un prétraitement en J1 via un broyeur de 1,8 t/h (**Annexe 5.6.a.**). La conversion en

chaleur se fait par un biodigesteur (ADFH) de 140 kW, avec une quantité de 1 785,71 tonnes pour un coût de 24,96 millions FCFA.

Pour la production d'électricité, plusieurs filières sont mises en évidence. La filière TC (tige de cotonnier) se distingue par un grand nombre de sites de biomasse exploités (22) repartis dans la région. Cette situation s'explique par les capacités de production assez faibles des sites de production des tiges de cotonnier nécessitant l'exploitation de plusieurs sites pour satisfaire la demande en énergie. Dans cette filière, le niveau d'emplacement optimal pour le prétraitement de la biomasse est le prétraitement sur les sites de biomasse, notamment dans les GPC (groupements de producteurs de coton) à l'aide de broyeurs thermiques de 0,2 t/h. Cette approche permet de limiter le transport des tiges brutes sur de longues distances en raison de leur faible densité. Le transport en vrac des tiges augmenterait en effet les coûts de transport ainsi que les émissions des GES. La technologie optimale pour la conversion de la biomasse est un pyrolyseur (PFP) de 400 kW. La filière nécessite 7 262,9 tonnes de biomasse pour un coût total d'exploitation de 117 562 094 FCFA. En comparaison, dans la filière CA (coques d'anacarde), seulement cinq sites de biomasse sont exploités. Ces sites correspondent à de grandes unités de transformation d'anacarde, produisant une grande quantité de coques et proches du site de prétraitement choisi. Une presse de 1,8 t/h est utilisée en J1 pour le prétraitement. Cependant, en raison de la quantité importante des coques nécessaires (9 490,196 tonnes) et du coût élevé du prétraitement, les coûts d'exploitation atteignent 257 570 538 FCFA.

Tableau 33 : Caractéristiques des chaînes d’approvisionnement optimales des différentes filières de biomasse

Type d'énergies	Filières	Sites de biomasse sélectionnés	Technologies de prétraitement et capacités	Localisations du prétraitement	Technologies de conversion et capacités à installer	Quantités de biomasses exploitées (en tonne)	Coûts totaux d'exploitation (FCFA)
Electricité	TC	S24, S27, S32, S33, S38, S40, S42, S51, S57, S64, S66, S68, S74, S79, S81, S82, S83, S90, S99, S109, S110, S120	Broyeur thermique de 0,2t/h	Sites de biomasses	Pyrolyseur + chaudière + Turbine à vapeur (PFP) de 400 kW	7262,9	117 562 094
	CA	S13, S14, S15, S16, S17	Presse de 1,8t/h	J1	Pyrolyseur + chaudière + Turbine à vapeur (PFP) de 400 kW	9490,196	257 570 358
	BR	S19	Pas de prétraitement	Pas de prétraitement	Pyrolyseur + chaudière + Turbine à vapeur (PFP) de 160 kW	3457,143	49 418 547
	NM	S2, S4, S5, S6, S7, S9, S10	Broyeur électrique de 1,2t/h	J1	Gazogène+ moteur à syngas (GFP) GFP DE 140 KW	1557,46	19 159 805

	EM	S4	Broyeur électrique de 0,8t/h	J5	Biodigesteur + moteur à biogaz (ADFP) ADFP de 80 kW	778,733 de EM + 223,62 déchets de l'abattoir	43 704 705
Chaleur	TC	S32, S42, S57, S79, S82, S99, S120	Broyeur thermique de 0,2t/h	Sites de biomasses	Pyrolyseur + chaudière (PFH) de 160 kW	2319,11	42 214 100
	CA	S13, S16, S17	Presse de 0,6t/h	J1	Pyrolyseur + chaudière (PFH) de 400 kW	3030,3	92 130 494
	BR	S19	-	-	Pyrolyseur + chaudière (PFH) de 160 kW	2027,027	31 922 070
	NM	S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9, S10	Broyeur électrique de 1,2t/h	J1	Pyrolyseur + chaudière (PFH) de 160 kW	1623,37	11 356 788
	EM	S4, S6	Broyeur électrique de 1,8t/h	J1	Biodigesteur + chaudière (ADFH) de 140 kW	1785,71	24 968 570

La filière BR (balle de riz) présente une configuration plus simple, sans prétraitement et avec un seul site de biomasse exploité. Ce site correspond à une grande rizerie pouvant produire plus de 3 400 tonnes de balle de riz par an. La conversion de cette biomasse en énergie est réalisée à l'aide d'un pyrolyseur (pyrolyseur + chaudière+ turbine à vapeur) de 160 kW avec un coût global optimal d'exploitation de la filière de 49 418 547 FCFA. Les résultats concernant les biomasses saisonnières montrent une organisation optimale pour la valorisation des noyaux de mangues. Ainsi, la filière NM (noyaux de mangue), exploite 1557,46 tonnes de biomasse à travers sept sites de biomasses. Ces sites sont sélectionnés du fait de leur proximité avec le site de prétraitement choisi J1. Le prétraitement de la biomasse est réalisé à l'aide d'un broyeur électrique de 1,2t/h et la conversion via un système de gazéification (gazogène + moteur à syngaz) de 140 kW. Le coût total d'exploitation annualisé pour cette filière s'élève à 19 156 805 CFA. Enfin, dans la filière EM (épluchures de mangue) utilise un seul site et combine les 778,733 tonnes d'épluchures de mangue avec 223,326 tonnes de déchets d'abattoir pour la méthanisation. Le prétraitement de la matière première est fait en J5 avec un broyeur électrique de 0,8 t/h. La technologie optimale pour la conversion de la biomasse est un système de biodigesteur (biodigesteur + moteur à biogaz) de 80 kW avec un coût global optimal d'exploitation de 43 704 705 FCFA.

Pour la production de chaleur, les filières se diversifient également. La filière TC avec sept sites de biomasse exploités, nécessite un broyeur de 0,2t/h pour le prétraitement de la biomasse dans les groupements de producteurs de coton (les sites de biomasse). La technologie de pyrolyse (pyrolyseur + chaudière) de 160 kW est l'option optimale pour la conversion. La quantité de biomasse exploitée est de 2 319,11 t, pour un coût total d'exploitation de 42 214 100 FCFA. La configuration optimale de la filière CA (coques d'anacarde) est l'exploitation de 3 030,3 t de coques brutes, prétraitées à l'aide d'une presse de 0,6 t/h et converties avec un pyrolyseur (pyrolyseur + chaudière) de 400 kW. Le coût d'exploitation pour cette filière est le plus élevé parmi les filières de chaleur, atteignant 92 130 494 FCFA.

La filière balle de riz (BR), comme dans sa configuration pour l'électricité n'a pas besoin de prétraitement. La conversion de la balle de riz en chaleur est réalisée à l'aide d'un système de pyrolyseur (pyrolyseur + chaudière) de 160 kW. La quantité optimale de balle de riz nécessaire est de 2 027,027 t avec un coût global d'exploitation de 31 922 056 FCFA. La filière de noyaux de mangue (NM), exploite 1 623,37 t de biomasse réparties sur neuf sites, prétraitées à l'aide d'un broyeur électrique de 0,8 t/h en J1. Le coût optimal d'exploitation annualisé de la filière est de 11 356 758 FCFA. Ce qui en fait la filière la plus économiquement optimale pour la production de la chaleur parmi les biomasses saisonnières. Enfin, la filière basée sur les

épiluchures de mangue (EM), exploite deux sites de biomasse et utilise un broyeur électrique en J1 pour le prétraitement des 1 785,71 t de biomasses exploitées. La conversion de la biomasse est faite à l'aide d'un système de biodigesteur (biodigesteur + chaudière) de 140 kW et le coût optimal de l'exploitation de la filière est de 24 968 570 FCFA.

Au regard de ces résultats, chaque filière présente des spécificités en matière de d'approvisionnement, permettant de choisir des solutions adaptées aux besoins énergétiques particuliers des unités agroindustrielles. Les filières exploitant des biomasses annuelles impliquent des investissements plus élevés, offrant une disponibilité énergétique stable tout au long de l'année. Les filières saisonnières quant à elles, bénéficient de coûts logistiques relativement bas, notamment en ce qui concerne le transport, du fait de leur proximité des sites de valorisation.

IV.2. Performances des chaines d'approvisionnement en biomasse pour la production d'électricité

IV.2.1 Performances économiques

Les résultats économiques optimaux des chaines d'approvisionnement en biomasses annuelles pour la production de l'électricité dans la première unité agroindustrielle sont présentés dans la Figure 40, tandis que ceux des biomasses saisonnières pour la d'électricité dans la seconde unité agroindustrielle sont illustrés dans la Figure 39.

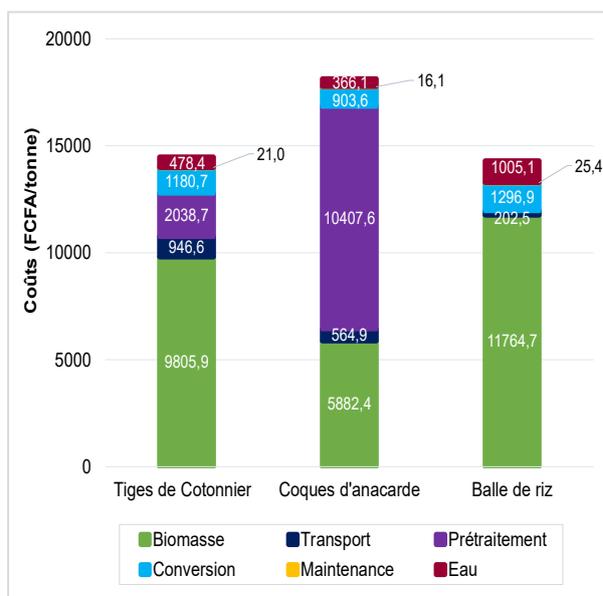


Figure 40 : Répartition des coûts d'approvisionnement des différentes biomasses annuelles (Electricité)

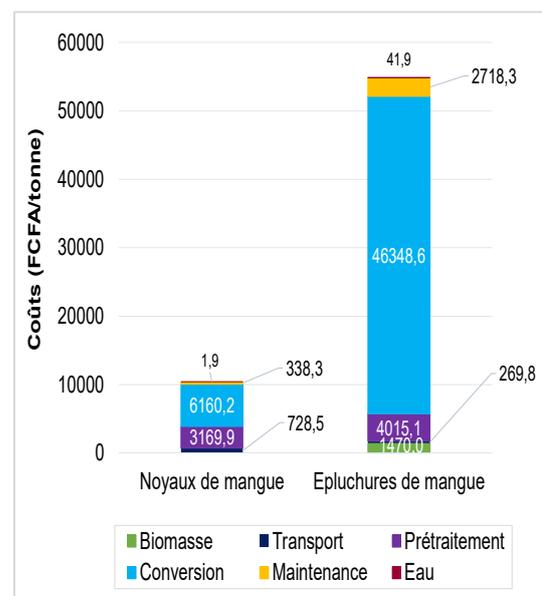


Figure 39 : Répartition des coûts d'approvisionnement des différentes biomasses saisonnières (Electricité)

L'analyse de la Figure 40 montre des variations significatives entre les coûts optimaux des trois biomasses étudiées. Les coques d'anacarde (CA) présentent le coût optimal unitaire le plus élevé atteignant plus de 18 000 FCFA la tonne de biomasse exploitée. La majeure partie de ce coût est attribuable au coût du prétraitement (10 407,6 FCFA/tonne), suivi du coût d'achat de la biomasse. En effet, l'extraction du CNSL des coques d'anacarde est un procédé très énergivore en électricité nécessitant environ 50 kWh par tonne de biomasse traitée [169]. Cette forte consommation en électricité entraîne un fort coût du prétraitement du fait du coût très élevé de l'électricité dans le pays. En comparaison, les tiges de cotonnier (TC) et la balle de riz (BR) affichent des coûts optimaux globaux respectivement de 14 400 FCFA/t et 14 200 FCFA/t. Pour ces deux biomasses, le coût de la biomasse constitue la composante la plus coûteuse avec respectivement 9 805,9 FCFA/t pour TC et 11 764,7 FCFA/t pour la balle de riz. Le coût élevé des biomasses s'explique par plusieurs facteurs, dont l'utilisation croissante de ces résidus dans d'autres usages concurrentiels, notamment dans l'agriculture et l'élevage. En effet, les paysans font de plus en plus recours aux tiges de cotonnier dans l'amendement des sols à travers le compostage et la production de biochar. A cela s'ajoute la pénibilité de la récolte et de la collecte des tiges. La balle de riz est de plus en plus demandée dans le secteur de l'élevage en plein essor dans le pays. Elle est utilisée dans la production d'aliments de bétail et dans la fabrication des litières. Ces utilisations concurrentielles créent une forte demande et un marché pour ces résidus qui rendent les producteurs moins enclins à fournir de la biomasse à un coût réduit. Ces coûts sont suivis du coût du prétraitement dans la filière des tiges de cotonnier (TC) (2 038,7 FCFA/t) et du coût de la conversion pour la filière de balle de riz (1 296,9 FCFA/t). Le coût de la conversion reste relativement important pour les trois types de biomasse ; cela est dû au fait que les coûts des technologies de conversion restent très élevés sur le marché. Globalement sur l'ensemble des trois filières, l'exploitation des balles de riz représente le coût optimal le plus faible suivi des tiges de cotonnier et des coques d'anacarde. La meilleure performance de la filière de la balle de riz s'explique par deux facteurs : les distances réduites entre les rizeries où est produite la biomasse et le fait que le seul prétraitement requis pour les balles de riz soit le séchage (activité réalisée au soleil, donc avec un coût négligeable). Il n'y a donc pas de coût de prétraitement associé à la balle de riz. Pour les tiges de cotonnier, le prétraitement réalisé dans les groupements des producteurs de coton (fournisseurs de la biomasse) a permis de réduire considérablement les coûts de transport de tiges brutes. Cependant certains sites de prétraitement restent éloignés des sites de conversion, ce qui explique les coûts relativement élevés du transport dans cette filière.

L'examen de la Figure 39 montre un contraste marqué des coûts associés aux biomasses saisonnières. Les épiluchures de mangue (EM) présentent le coût optimal total d'approvisionnement le plus élevé, atteignant 54 863 FCFA/t. Cette différence est principalement due aux coûts de conversion élevés (46 348,6 FCFA/t). Cette situation s'explique par la complexité du procédé de conversion utilisé notamment la production de l'électricité à partir du biogaz dont les composants sont onéreux sur le marché (digesteur, le moteur et le système d'épuration du biogaz). Ce coût est suivi par les frais de prétraitement (4 015,1 FCFA/t). En comparaison, les noyaux de mangue présentent le coût optimal le plus bas avec 10 398,7 FCFA/t, avec des coûts de conversion et de prétraitement prédominants, mais nettement inférieure à ceux des épiluchures de mangue.

En résumé, pour les biomasses annuelles, les coûts de prétraitement et d'achat de la biomasse constituent la majeure partie des coûts d'approvisionnement. En revanche, pour les biomasses saisonnières, ce sont les coûts de conversion qui prédominent. Les coûts optimaux élevés des filières des coques d'anacarde et des épiluchures de mangues suggèrent des défis techniques et économiques spécifiques à ces filières, nécessitant à priori des optimisations supplémentaires de prétraitement et de conversion. Pour relever ces défis, les solutions peuvent inclure l'intégration d'énergies renouvelables, comme le solaire, pour alimenter les presses utilisées dans le prétraitement des coques d'anacarde et la vente du CNSL. En outre, des améliorations techniques visant à optimiser les performances et à réduire la consommation des presses contribueraient à une baisse significative des coûts du prétraitement. Par ailleurs, des subventions pour l'achat des technologies de valorisation de la biomasse à l'image des subventions sur les équipements solaires pourraient également améliorer la rentabilité de ces filières.

La Figure 41 illustre le prix de revient kWh de l'électricité produite à partir des différentes biomasses par rapport au prix moyen du kWh de l'électricité qu'auraient payé ces unités agroindustriels auprès de la SONABEL en 2022 qui est de 130,24 FCFA [265].

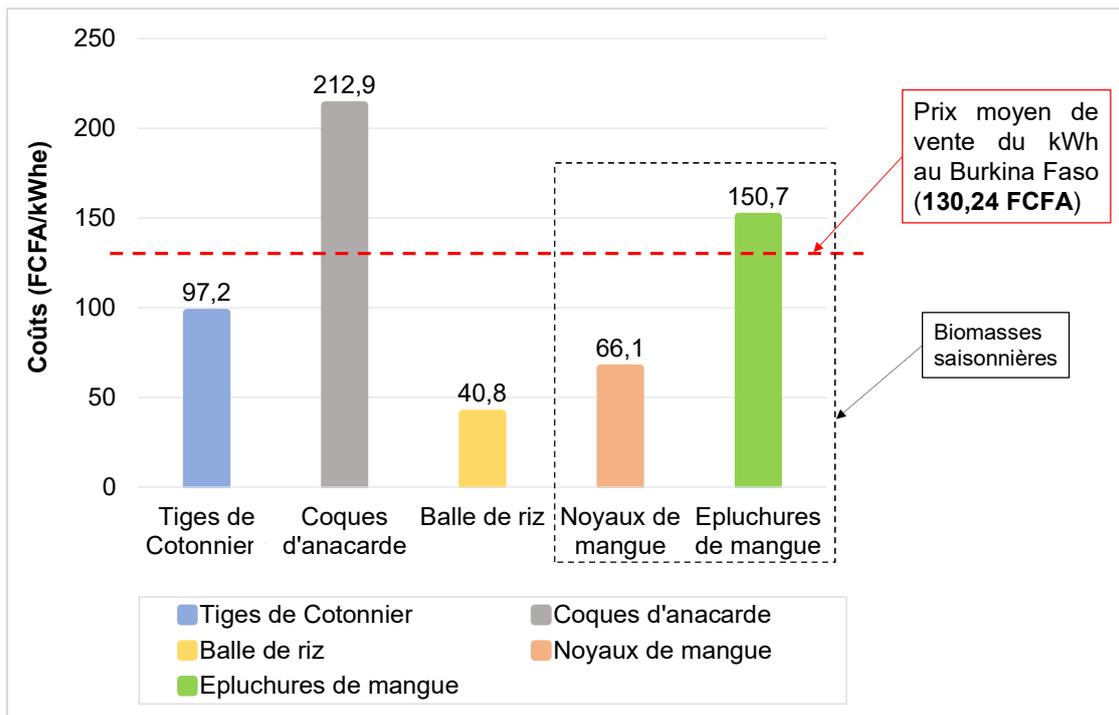


Figure 41 : Comparaison du prix de revient du kWh de l'électricité produite à partir des biomasses au prix moyen du kWh vendu par la SONABEL (Electricité)

L'analyse global montre que le coût du kWh de l'électricité produite à partir des biomasses est compris entre 40,8 et 212,9 FCFA. La filière balle de riz présente le prix le plus bas avec 40,8 FCFA/kWh, suivi des tiges de cotonnier avec 97,2 FCFA/kWh et enfin des coques d'anacarde avec 212,9 FCFA/kWh pour les biomasses annuelles. Pour ce qui est des biomasses saisonnières, le meilleur prix est obtenu pour les noyaux de mangues avec un prix unitaire de 66,1 FCFA/kWh contre 150,7 FCFA/kWh pour les épluchures de mangue. Sur les cinq biomasses étudiées, seules la balle de riz, les tiges de cotonnier et les noyaux de mangue présentent des prix unitaires inférieurs à celui proposé par la SONABEL. Cela démontre q'avec une organisation optimale des filières de balle de riz, de tiges de cotonnier et de noyaux de mangue, l'électricité produite à partir de biomasses peut devenir compétitive. Le « déficit » observé résulte donc principalement d'un manque d'optimisation des filières.

Globalement, les noyaux de mangue (NM) se positionnent comme la meilleure biomasse saisonnière pour un approvisionnement en électricité, tandis que BR est l'option optimal pour les biomasses annuelle. Cependant, l'un des défis majeurs pour la filière des noyaux de mangue reste le séchage qui peut durer entre une à deux semaines si le séchage est fait à l'air libre en période moins humide (saison sèche). Pour la filière de la balle de riz (BR), elle reste confrontée à une forte utilisation concurrentielle pouvant augmenter le risque de disponibilité et la volatilité du prix de la matière première.

Ces résultats mettent en évidence la nécessité d'adapter les stratégies d'approvisionnement en fonction des caractéristiques spécifiques de chaque biomasse pour améliorer la rentabilité et l'efficacité énergétique des projets de bioénergie au Burkina Faso.

IV.2.2. Performances environnementales et sociales

Les résultats environnementaux de l'approvisionnement des biomasses pour la production de l'électricité sont présentés dans le Tableau 34.

Tableau 34 : Répartition des émissions de GES de l'approvisionnement des différentes biomasses pour la production de l'électricité en kgeqCO₂/tonne de biomasse exploitée.

Filières	Transport	Prétraitement	Conversion	Totales
Tiges de cotonnier (TC)	2,90	3,34	931,00	937,24
Coque d'anacarde (CA)	1,90	30,30	697,50	729,70
Balle de riz (BR)	0,43	0,00	820,00	820,43
Noyaux de mangue (NM)	2,63	9,09	1411,21	1422,93
Epluchure de mangue (EM)	0,42	9,08	695,80	705,30

La répartition des impacts environnementaux liés à l'approvisionnement des biomasses montre clairement que la conversion constitue la principale source d'émissions de GES, en raison des propriétés intrinsèques des biomasses et des technologies employées. Ces résultats confirment les conclusions de l'étude [281], qui identifiaient la phase d'exploitation des technologies comme la plus déterminante en matière d'émission de GES lors de la valorisation énergétique de la biomasse. Par exemple, pour les tiges de cotonnier et les noyaux de mangue, les émissions liées à la conversion dépassent 930 kgeqCO₂/t, tandis que celles associées aux autres étapes restent relativement modestes. Le prétraitement a un impact significatif uniquement pour les coques d'anacarde, où il représente 30,3 kgeqCO₂/t, soit environ 4% des émissions totales. Ce niveau élevé est attribué à l'utilisation de l'électricité fournie par la SONABEL, dont le facteur d'émission par kWh est très élevé en raison de la faible intégration des énergies renouvelables dans le mix énergétique. La forte consommation de cette électricité associée à la grande quantité de coques à prétraiter entraîne ainsi des émissions importantes de GES.

Sur le plan social, l'analyse des résultats du Tableau 35 révèle plusieurs tendances intéressantes en termes de création d'emplois dans les catégories de construction et installation (C&I) ainsi que d'opérations et maintenance (O&M).

Tableau 35 : Emplois créés par l’approvisionnement des différentes biomasses pour la production d’électricité.

Filières	Emplois C&I	Emplois O&M	Total emplois
Tiges de cotonnier (TC)	17	8	25
Coques d’anacarde (CA)	17	8	25
Noyaux de mangue (NM)	9	13	22
Epluchures de mangue (EM)	6	9	15
Balle de riz (BR)	10	6	16

Les filières de tiges de cotonnier et de coques d’anacarde génèrent le plus grand nombre total d’emplois, avec 25 postes chacune, répartis majoritairement dans la construction et l’installation avec 17 emplois, contre 8 dans O&M. Ces chaînes exploitent des infrastructures complexes et de capacités relativement plus grandes comparativement aux autres filières nécessitant une mise en place initiale importante. Il s’agit des systèmes de pyrolyseur couplés à des turbines à vapeur de 400 kW dont la mise en place nécessite très souvent une main d’œuvre importante et variée. La phase d’exploitation crée moins d’emplois, car une fois installée les différentes opérations pour la production nécessitent moins de travailleurs. La filière des noyaux de mangue, présente une répartition plus équilibrée avec 9 emplois en C&I et 13 en O&M, indiquant un besoin particulier de mains d’œuvre pour l’exploitation de la technologie employée notamment le système de gazéification corroborant les résultats obtenus par [170]. Les filières des épluchures de mangue et de la balle de riz génèrent respectivement 15 et 16 emplois avec une légère prédominance pour C&I dans la filière de la balle de riz et pour O&M dans celle des épluchures, ce qui indique l’utilisation des technologies de capacités moins importantes.

IV.3. Performances des chaînes d’approvisionnement pour la production de la chaleur

IV.3.1. Performances économiques

Les coûts optimaux d’approvisionnement des biomasses annuelles et saisonnières pour la production de la chaleur sont illustrés respectivement par la Figure 43 et la Figure 42. Comme dans le cas de la production de l’électricité, l’examen des résultats montre pour les filières des

tiges de cotonnier et de la balle de riz, une dominance des coûts de la biomasse sur les autres coûts dépassant les 50% des coûts des chaînes d’approvisionnement respectives.

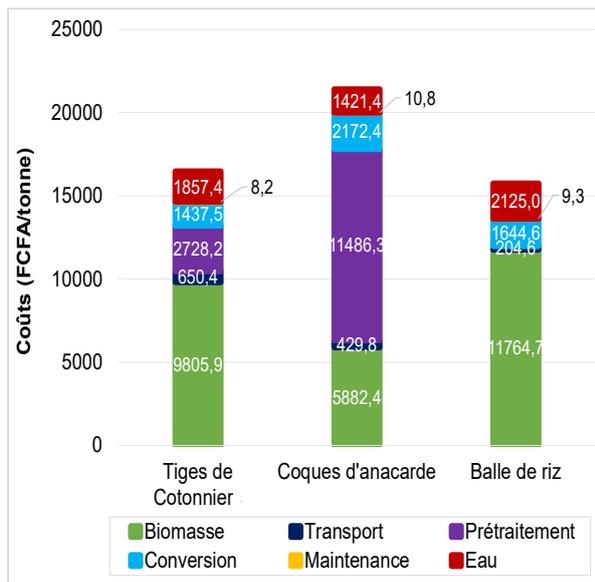


Figure 43 : Répartition des coûts d’approvisionnement des différentes biomasses annuelles (Chaleur)

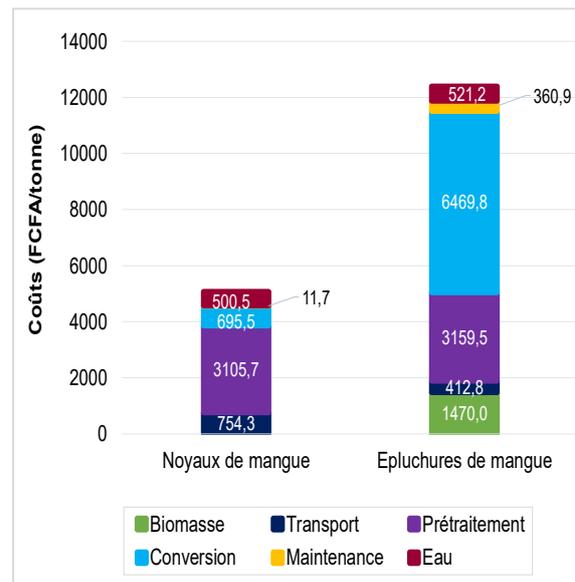


Figure 42 : Répartition des coûts d’approvisionnement des différentes biomasses saisonnières (Chaleur)

Ces coûts sont suivis respectivement par le coût du prétraitement pour les tiges de cotonnier (2 238,2 FCFA/t) et du coût de l’eau pour BR (2 125 FCFA/t). Le coût de la biomasse vient en seconde position dans les coûts de la chaîne d’approvisionnement des coques d’anacarde avec 5 882,4 FCFA/t. Globalement, la filière de la balle de riz présente les coûts optimaux les plus bas parmi les trois biomasses annuelles étudiées. Cela s’explique par le fait que cette ressource ne nécessite pas de prétraitement contrairement aux autres biomasses. Le coût de la biomasse reste le principal facteur déterminant de coût excepté pour la filière des coques d’anacarde (CA) où c’est le prétraitement qui prédomine. Des stratégies comme des incitations appropriées telles l’octroi d’engrais, des facilitations d’accès à l’énergie produite ou l’implication davantage des producteurs de biomasse dans les initiatives et projets pourraient stimuler également une réduction du coût de la biomasse en plus des recommandations faites dans la section sur la production de l’électricité.

Concernant les biomasses saisonnières, les coûts sont globalement plus faibles, mais le transport (754,3 FCFA/t) et le prétraitement (3 105,7 FCFA/t) restent les facteurs de coût les plus déterminants pour la filière de noyaux de mangue (NM), tandis que la conversion (6 469,8 FCFA/t) et le prétraitement (3 159,9 FCFA/t) restent les coûts les plus élevés dans la filière des épiluchures (EM). En comparaison, la filière des noyaux de mangue est économiquement plus

rentable que la filière des épluchures de mangue avec un coût global optimal de 5067,6 FCFA/t contre 12 394,2 FCFA/t.

Le coût de revient de la chaleur produite avec les différentes biomasses est illustré dans la Figure 44 ci-dessous.

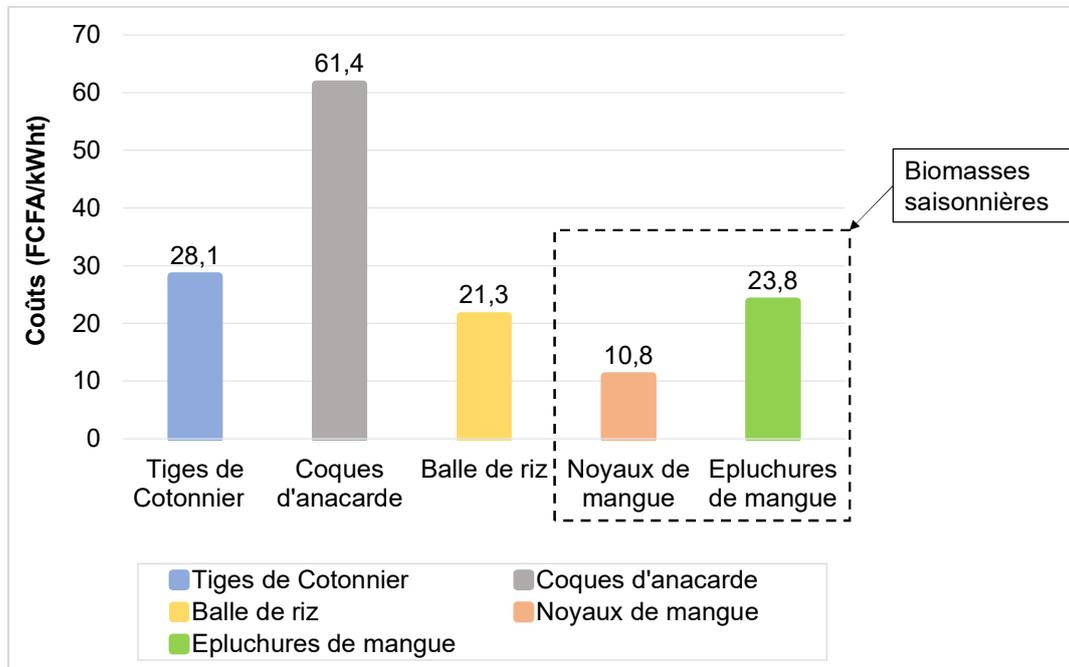


Figure 44 : Coûts de revient du kWh thermique produit pour les différentes biomasses (Chaleur)

L'analyse des coûts de revient met en évidence des disparités notables au sein des filières annuelles que saisonnières. Pour les biomasses annuelles, la filière des coques d'anacarde (CA) se distingue par un coût de 61,4 FCFA/kWhth, nettement supérieur à celui des autres biomasses. Cela s'explique par les coûts de production très élevés liés au coût de la biomasse et aux étapes très coûteuses du prétraitement et de la conversion. En effet, en plus du coût élevé du prétraitement, l'exploitation des coques d'anacarde (CA) a nécessité plus de biomasses que dans les autres filières (3030,3t) à cause du rendement plus bas des presses (75%) par rapport aux broyeurs qui est de 98%. De plus, la conversion des conques a nécessité l'utilisation des équipements de capacité supérieure (pyrolyseur +chaudière) de 400 kW, augmentant ainsi le coût de la conversion. En revanche, les tiges de cotonnier (TC) et la balle de riz (BR) affichent des coûts de 28,1 FCFA/kWhth et 21,3 FCFA/kWhth respectivement, ce qui montre une meilleure efficacité économique dans ces filières. En effet, l'absence de prétraitement, le faible coût du transport lié à la proximité des sources de biomasse par rapport à l'unité de conversion dans la filière de la balle de riz, et l'optimisation du transport par le prétraitement de la biomasse

dans les sites de production (GPC) des tiges de cotonnier (TC) sont les principales raisons de ces faibles coûts de revient.

Concernant les biomasses saisonnières, la filière noyaux de mangue (NM) présente un coût de 10,8 FCFA/kWhth, le plus bas parmi cette catégorie, indiquant une optimisation efficace du processus de production. La filière épluchure de mangue (EM), avec un coût de 23,8 FCFA/kWhth, reste compétitive mais légèrement plus onéreuse. Le défi technologique, notamment le coût de la technologie de conversion (biodigesteur +chaudière) reste le premier facteur qui limite la compétitivité de cette filière.

En somme ces résultats soulignent l'impact des spécificités de chaque filière sur les coûts de production de chaleur et mettent en évidence les opportunités d'optimisation pour réduire encore ces coûts.

IV.3.2. Performances environnementales et sociales

Le Tableau 36 présente la répartition des résultats optimaux concernant les impacts environnementaux dans les chaînes d'approvisionnement des différentes filières.

Tableau 36 : Répartition des émissions de GES de chaîne d'approvisionnement des différentes filières pour la production de la chaleur en kgeqCO₂/tonne

Filières	Transport	Prétraitement	Conversion	Totales
Tiges de cotonnier (TC)	1,77	3,34	930,96	936,07
Coque d'anacarde (CA)	1,32	30,30	697,50	729,12
Balle de riz (BR)	0,43	0,00	820,00	820,43
Noyaux de mangue (NM)	2,72	9,09	970,20	982,01
Epluchure de mangue (EM)	1,18	9,09	695,80	706,07

Ces résultats du tableau montrent que, comme pour la production de l'électricité, la phase de conversion constitue la principale source d'émission de GES pour les différentes filières étudiées. Dans la filière des tiges de cotonnier (TC), cette étape domine avec 930,96 kgeqCO₂/t, tandis que la part du transport et du prétraitement reste très marginale avec respectivement 1,77 et 3,34 kgeqCO₂/t. Le faible impact du transport est lié au prétraitement effectué sur les sites de biomasse, qui a contribué à réduire le nombre de voyages à effectuer mais surtout l'utilisation des groupements de producteurs de coton (GPC) comme points de collecte de la biomasse, ce qui implique d'éviter de parcourir les champs pour l'approvisionnement. Pour la filière des coques d'anacarde (CA), en plus de la conversion, le prétraitement représente une part non négligeable des émissions (30,30 kgeqCO₂/t) en raison de la dépendance à des processus énergivores utilisant une électricité à forte empreinte carbone. Quant à la filière BR, les

émissions sont entièrement dominées par la conversion (820 kgeqCO₂/t, sans contribution notable du transport. Pour ce qui est des biomasses saisonnières, les noyaux de mangue (NM), bien que la conversion soit toujours la principale source d'émission, (970,2 kgeqCO₂/t), le prétraitement constitue une contribution non négligeable avec 9,09 kgeqCO₂/t. Enfin, dans la filière des épiluchures de mangue (EM), la conversion domine également avec 695,8 kgeqCO₂/t, tandis que le prétraitement (9,09 kgeqCO₂/t) et le transport (1,18 kgeqCO₂/t) ont des impacts réduits.

Ces résultats montrent la disparité des impacts au niveau de chaque maillon de chaîne d'approvisionnement des différentes filières, avec un fort impact dans la phase conversion et des contributions variables au niveau du transport et du prétraitement. Optimiser la conversion, réduire les besoins de transport, et intégrer les énergies renouvelables dans le processus du prétraitement, notamment dans les filières où ces postes sont les plus coûteux en termes d'émissions, pourrait permettre de diminuer l'empreinte carbone globale des chaînes d'approvisionnement en biomasse.

Le Tableau 37 présente les performances sociales des différentes filières pour la production de la chaleur. Il s'agit du nombre d'emplois directs créés lors de l'exploitation des différentes biomasses. Le nombre d'emplois O&M comprend les emplois créés lors de la conversion de la biomasse et lors du prétraitement. Ceux liés à C&I comprennent uniquement les emplois directs pour la construction et l'installation de l'unité de conversion.

Tableau 37 : Emplois créés par l'approvisionnement des différentes biomasses pour la production de la chaleur

Filières	Emplois C&I	Emplois O&M	Total emplois
Tiges de cotonnier (TC)	4	4	8
Coque d'anacarde (CA)	6	4	10
Balle de riz (BR)	4	4	8
Noyaux de mangue (NM)	4	5	9
Epluchure de mangue (EM)	4	5	9

L'analyse des emplois créés montre une répartition équilibrée entre les postes liés à la construction et l'installation (C&I) et ceux liés aux opérations et maintenance (O&M) pour les filières des tiges de cotonnier et de la balle de riz, les emplois sont uniformément repartis entre C&I et O&M, avec un total de 8 emplois pour chaque filière. Dans la filière des coques d'anacarde, il y a une légère augmentation des emplois C&I (6 emplois) en raison de la capacité plus importante de la technologie à être mise en place nécessitant plus de main d'œuvre.

Pour les filières des noyaux de mangue et des épluchures de mangue, la répartition des emplois montre une prédominance des postes O&M avec 5 emplois dans ce secteur contre 4 dans C&I. Cela pourrait s'expliquer par l'utilisation des broyeurs de grandes capacités (1,2 t/h et 1,8 t/h), qui a nécessité plus de main d'œuvre pour les opérations de prétraitement.

Les résultats corroborent les observations réalisées sur le terrain. En effet, la plupart des équipementiers locaux fabriquant ces technologies fonctionnent avec des équipes très restreintes. Par ailleurs, les visites d'installations en fonctionnement ont révélé que l'exploitation de ces technologies de petite taille requiert très peu de la main d'œuvre.

IV.4. Résultats de l'analyse de la sensibilité

Après avoir examiné les différentes configurations des chaînes d'approvisionnement, il ressort que le coût de la biomasse et du prétraitement a des impacts très significatifs sur les coûts optimaux des différentes filières. Cette section présente les résultats de variation de ces paramètres sur les coûts de revient de la chaleur et de l'électricité à partir des différentes filières.

IV.4.1. Analyse de sensibilité liée à la variation du coût unitaire de la biomasse

Les résultats de l'analyse de sensibilité du scénario I sur les prix de revient de l'électricité produite à partir des différentes biomasses sont présentés dans la Figure 45. L'objectif de cette analyse est d'évaluer l'impact de l'augmentation des coûts des biomasses sur le coût de revient de ces produits.

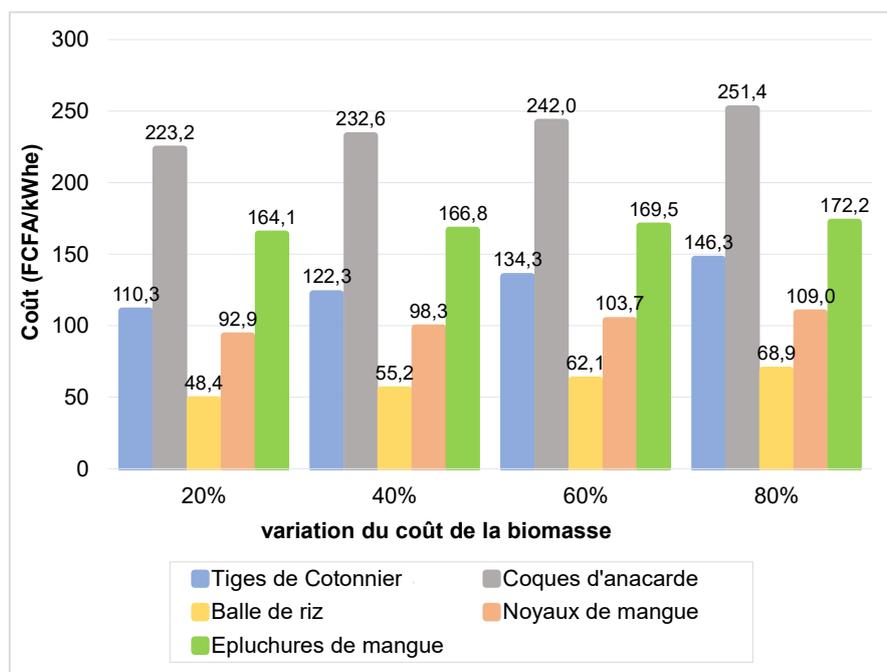


Figure 45 : Impact de la variation du coût de la biomasse sur le coût de revient du kWh produit (Electricité)

L'analyse de ces résultats révèle plusieurs points clés. Les prix de revient de l'électricité varient de manière significative en fonction du coût unitaire des biomasses utilisées. Pour les biomasses annuelles, la filière des tiges de cotonnier (TC) présente les variations les plus significatives avec des augmentations du prix de revient de 13,1 ; 25,1 ; 37 et 49 FCA pour les variations respectives de 20% à 80% du coût de la biomasse. Ce qui indique une très grande sensibilité de cette filière aux fluctuations des coûts de la matière première. Ainsi, à partir d'une augmentation de 60% du prix de la biomasse, le prix de l'électricité produite (134,3 FCFA/kWh) dans la filière n'est plus compétitif par rapport au prix actuel (130,24 FCFA/kWh) de l'électricité. En revanche, la filière de la balle de riz (BR) montre une relative stabilité, avec des prix de revient plus modérés (48,4 ; 55,2 ; 62,1 et 68,9 FCFA/kWh) et compétitifs par rapport au prix actuel de l'électricité. Pour ce qui est des biomasses saisonnières, la filière des noyaux de mangue (NM) a montré la plus grande sensibilité par rapport au coût de la biomasse avec des augmentations du prix de revient allant de 26,8 à 42,9 FCFA contre 12,5 à 20,6 FCFA pour les épiluchures de mangue (EM). Cette situation s'explique par le fait que le scénario de base, les noyaux de mangue étaient cédés gratuitement. Toutefois, les prix de revient sur l'ensemble de variation du coût de la biomasse sont restés compétitifs par rapport au prix de l'électricité fournie par la SONABEL. Ces résultats montrent que la filière de la balle de riz pour les biomasses annuelles et la filière des noyaux de mangue pour les biomasses saisonnières sont des options plus viables pour la production de l'électricité même en cas d'augmentation des coûts unitaires des biomasses.

Les résultats du scénario I sur le prix de revient de la chaleur sont illustrés dans la Figure 46.

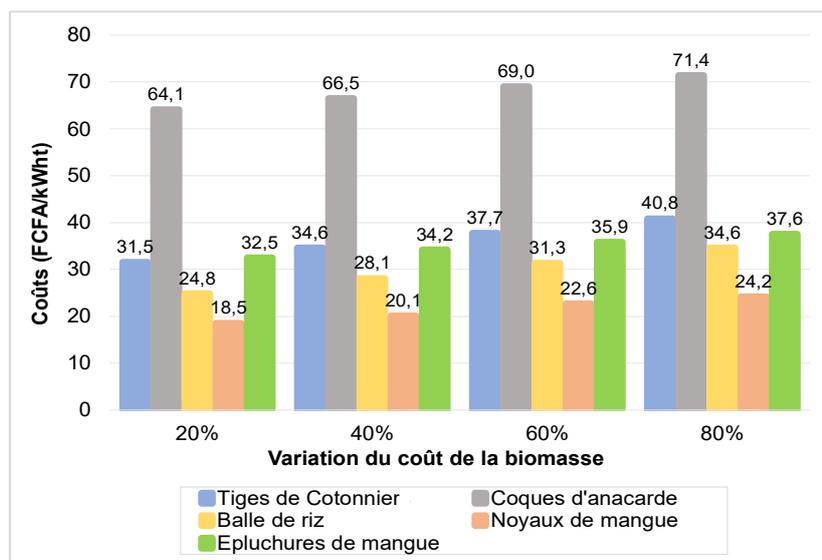


Figure 46 : Impact de la variation du coût de la biomasse sur le coût de revient du kWh thermique produit (Chaleur)

Les prix de revient du kWh obtenus dans cette analyse montrent également des sensibilités variables selon les biomasses. Dans le cas des biomasses annuelles, la filière de la balle de riz (BR) a montré la plus grande sensibilité par rapport aux variations des coûts de la biomasse avec des prix de revient allant de 24,8 à 34,6 FCFA/kWh. Ces prix représentent des augmentations de 3,5 à 13,3 FCFA par rapport au prix dans le scénario de base. En revanche, la filière des coques d'anacarde (CA) a montré la meilleure stabilité face aux fluctuations des coûts de la biomasse avec des augmentations de prix de revient de 2,7 à 10 FCFA par rapport au prix du scénario de base. Toutefois, les prix de revient de cette filière restent les plus élevés et ceux de la balle de riz (BR) les plus bas.

Quant aux biomasses saisonnières, la filière NM a montré la meilleure stabilité avec des prix de revient relativement stables allant de 18,5 à 24,2 FCFA/kWh par rapport au scénario de base. A l'inverse, la filière des épluchures de mangue (EM) a montré une sensibilité significative avec des augmentations des prix de revient allant de 8,7 à 13,8 FCFA sur le prix de revient dans le scénario de base. Au regard de ces résultats, la filière de la balle de riz et celle des noyaux de mangue (NM) restent les options les plus viables pour la production de la chaleur, car plus stables aux fluctuations des coûts de la matière première.

En somme, ces résultats mettent en lumière l'importance de la stabilité des coûts des matières premières dans l'optimisation des chaînes d'approvisionnement en biomasse au Burkina Faso. Les filières utilisant des biomasses moins sensibles aux variations des coûts comme les noyaux de mangue ou la balle de riz, semblent offrir un meilleur potentiel pour une production énergétique plus économique et durable.

IV.4.2. Analyse de sensibilité liée à la variation du coût du prétraitement

La Figure 47 illustre les résultats de l'analyse de la variation du coût du prétraitement sur le prix optimal du kWh d'électricité produite à partir des chaînes d'approvisionnement des différentes biomasses.

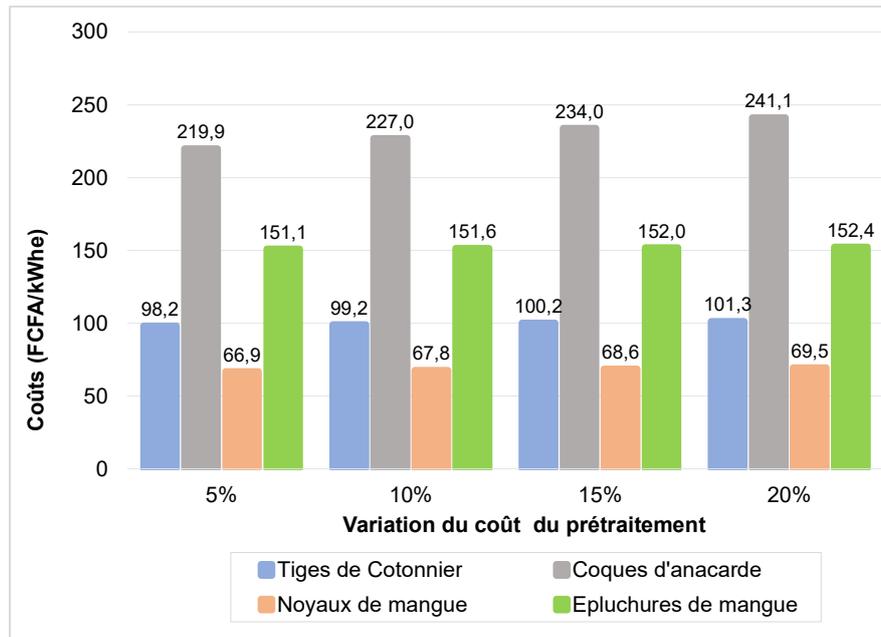


Figure 47 : Impact de la variation du coût du prétraitement sur le coût de revient du kWh produit (Electricité)

L'analyse des résultats montre un impact différencié des variations du coût du prétraitement des biomasses sur le prix de revient de l'électricité. Pour la biomasse annuelle, la balle de riz (BR) ne nécessitant pas du prétraitement, la filière n'a pas été prise en compte dans l'évaluation de ce scénario II. Cependant, entre les deux filières examinées, la filière des coques d'anacarde (CA) a montré une très grande sensibilité vis-à-vis des fluctuations des coûts du prétraitement. En effet, la variation des coûts du prétraitement des coques d'anacarde sont étroitement liés au coût de l'électricité utilisé. Les variations des coûts de l'électricité ont entraîné des fortes augmentations des coûts optimaux du prétraitement et par ricochet, une augmentation du prix de revient du kWh d'électricité produite de 7 à 28,2 FCFA par rapport au prix du scénario initial qui était de 212,9 FCFA/kWh. Les prix de revient sont ainsi restés très supérieurs au prix actuel de l'électricité de la SONABEL (130,24 FCFA/kWh). Cela reflète une moindre viabilité économique de la filière dans les chaînes d'approvisionnement énergétique au Burkina Faso. A l'inverse, la filière BR, est celle qui a montré une meilleure stabilité face aux variations du coût du prétraitement dans cette catégorie de biomasse puisque qu'elle ne nécessite pas d'opérations de prétraitement dans sa chaîne d'approvisionnement. La filière des tiges de cotonnier (TC), a aussi montré une relative stabilité avec des variations des prix de revient allant de 98,2 à 101,3 FCFA/kWh, prix très compétitifs comparativement au prix de l'électricité du réseau national. L'évaluation sur les biomasses saisonnière a montré une résilience notable de ces filières face aux variations des coûts du prétraitement, avec des augmentations très faibles des prix de revient par rapport au prix dans le scénario de base. Toutefois, la filière des épluchures de

mangue (EM) affiche la plus grande stabilité avec des augmentations allant de 0,4 à 1,7 FCFA contre 0,8 à 3,4 FCFA pour les noyaux de mangue (NM). La bonne performance de ces filières démontre aussi l'influence relativement faible du prétraitement sur les coûts optimaux de leurs chaînes d'approvisionnement.

Dans le cadre de la production de la chaleur, les résultats obtenus de l'évaluation du Scénario II visant à étudier l'impact de la variation du coût du prétraitement sur le prix de revient du kWh sont présentés dans la Figure 48 ci-dessous.

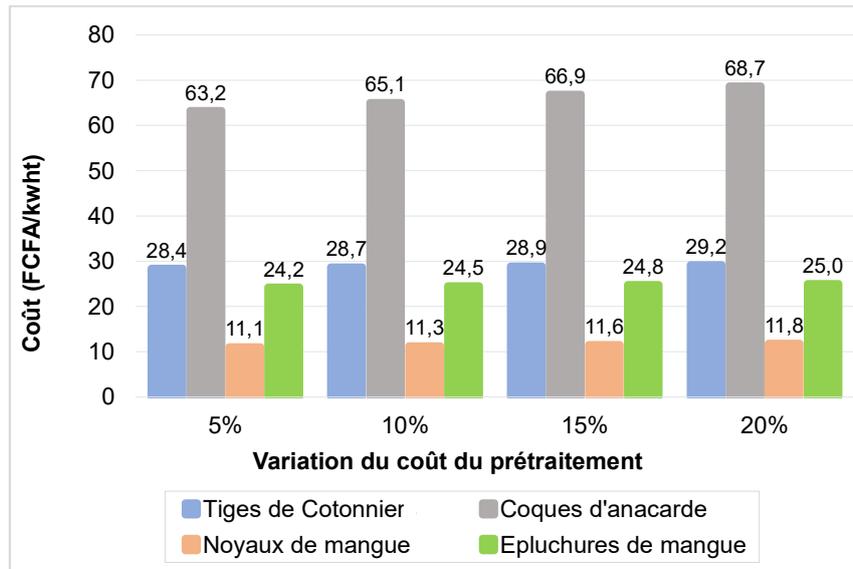


Figure 48 : Impact de la variation du coût du prétraitement sur le coût de revient du kWh produit (Chaleur)

Les résultats de la Figure 48 montrent pour les biomasses annelles, une grande disparité de l'impact des variations des coûts du prétraitement dans les différentes filières. La filière de la balle de riz (BR) ne montrant aucune sensibilité par rapport au prétraitement, la filière des tiges de cotonnier (TC), quant à elle affiche des variations très significatives des prix de revient allant de 28,4 à 29,2 FCFA/kWhth contre 23,1 FCFA/kWhth pour le scénario de base. La filière des coques d'anacarde (CA) présente les prix de revient les plus élevés avec des prix unitaires allant de 63,2 à 68,7 FCFA/kWhth contre 61,4 FCFA/kWhth dans le scénario initial. En revanche, comme dans le cas de la production de l'électricité, les biomasses saisonnières ont affiché une relative stabilité face aux fluctuations du prix du prétraitement. Les prix de revient obtenus dans ces filières vont de 11,1 à 11,8 FCFA/kWhth pour les noyaux de mangue (NM) et de 24,2 à 25 FCFA/kWhth pour les épluchures de mangue (EM). Les augmentations sur ces prix de revient représentent 0,3 à 1 FCFA pour le prix de revient du kWhth obtenu avec les noyaux de mangue et 0,4 à 1,2 FCFA pour la filière des épluchures.

Au regard de ces résultats, les filières de la balle de riz (BR), des tiges de cotonnier (TC) et des noyaux de mangue (NM) apparaissent comme les alternatives les plus viables économiquement pour la valorisation énergétique de la biomasse au Burkina Faso, même en cas d'augmentation des coûts de prétraitement.

Conclusion

Les travaux dans ce chapitre ont consisté à l'implémentation du modèle d'optimisation de l'approvisionnement en biomasse pour la production d'énergie au Burkina Faso, élaboré dans le chapitre précédent. A travers un cas d'étude mené dans la région des Hauts-Bassins, diverses biomasses ont été évaluées pour la production de l'électricité et de chaleur pour des unités agroindustrielles. L'objectif principal était d'identifier pour chaque biomasse une chaîne d'approvisionnement optimale en tenant compte de sa disponibilité.

Deux catégories de biomasse ont été analysées : d'une part, les biomasses dites « annuelles », disponibles tout au long de l'année, comprenant les tiges de cotonnier (TC), des coques d'anacarde (CA) et de la balle de riz (BR) ; et d'autre part, les biomasse dites « saisonnières », disponibles sur une période de trois mois (Avril à juin), composées des noyaux et des épiluchures de mangue (NM et EM). Les résultats obtenus ont montré que, parmi les biomasses annuelles, la filière de la balle de riz (BR) présente les coûts d'approvisionnement les plus bas, suivie par la filière des tiges de cotonnier (TC) et de la filière des coques d'anacarde (CA). Les coûts des filières de la balle de riz et des tiges de cotonnier sont principalement influencés par le coût de la biomasse, tandis que pour la filière des coques d'anacarde, le coût du prétraitement joue un rôle prépondérant. Concernant les biomasses saisonnières, la filière des noyaux de mangue s'avère économiquement plus avantageuse que la filière des épiluchures, bien que cette dernière se distingue par de meilleures performances en matière d'émissions de GES, avec environ 700 kgeqCO₂/t contre plus de 1000 kgeqCO₂/t pour la filière des noyaux de mangue.

Les prix de revient de l'électricité et de la chaleur produites dans les différentes filières demeurent globalement compétitifs par rapport au tarif de vente de l'électricité proposé par la Société Nationale d'Electricité du Burkina Faso, excepté pour la filière des coques d'anacarde, qui reste largement au-dessus, et de la filière des épiluchures de mangue, qui présente un prix légèrement supérieur. Cependant, les résultats démontrent la viabilité et la durabilité potentielles de la valorisation des biomasses étudiées. Pour les filières moins performantes, l'intégration de la valorisation des sous-produits pourrait améliorer leur rentabilité et leur durabilité.

Ces résultats soulignent également l'importance d'une conception rigoureuse des chaînes d'approvisionnement, ainsi que la nécessité d'une optimisation continue pour accroître les performances des différentes filières. Enfin, ils confirment l'aptitude du modèle à être un outil d'aide à la décision pour l'organisation et l'optimisation des filières de valorisation de la biomasse au Burkina Faso.

Synthèse et recommandations

L'analyse approfondie des filières de biomasse au Burkina Faso a mis en évidence plusieurs défis et opportunités clés. Les résultats obtenus démontrent la nécessité d'une approche stratégique pour optimiser la production énergétique à partir de la biomasse. Dans cette perspective, des recommandations ont été formulées afin d'exploiter pleinement le potentiel des ressources disponibles. Cette section présente les résultats clés obtenus et les recommandations pour améliorer la rentabilité, l'efficacité et la durabilité des filières biomasse-énergie au Burkina Faso.

I. Synthèse des résultats

L'analyse des différentes filières de biomasse a permis de mettre en évidence les facteurs qui influencent la rentabilité, la durabilité et l'efficacité énergétique des chaînes d'approvisionnement.

Filière des tiges de cotonnier (TC)

Les tiges de cotonnier présentent des défis logistiques en raison de la dispersion géographique des ressources, augmentant les coûts de transport. Le broyage des tiges sur les sites de production s'avère être une option efficace pour réduire ces coûts. Avec un coût de prétraitement de moins de 3 000 FCFA/tonne, cette filière est relativement compétitive. En matière de chaleur, les coûts de production restent compétitifs (21,3 FCFA/kWh). La mise en place des technologies plus efficaces en termes d'émission de GES pourrait réduire davantage les impacts environnementaux et améliorer sa durabilité de cette filière.

Filière des coques d'anacarde (CA)

La filière des coques d'anacarde se distingue par des coûts de prétraitement élevés, dépassant 10 000 FCFA/tonne. Cela s'explique par la forte consommation énergétique des presses utilisées. Ces coûts rendent cette filière peu rentable comparée à d'autres (moins de 3 000 FCFA/tonne pour les tiges de cotonnier et pour les noyaux de mangue). Par ailleurs, le coût de production de l'électricité y est élevé, atteignant 257 millions FCFA, ce qui en fait la filière la moins compétitive par rapport à l'électricité vendue par la SONABEL (212,9 FCFA/kWh). La production de chaleur est également coûteuse, dépassant 92 millions FCFA. Une optimisation des technologies de prétraitement par l'intégration du solaire pourrait aider à améliorer la compétitivité économique et environnementale de cette filière.

Filière de la balle de riz

La balle de riz est l'une des filières les plus compétitives. Elle ne nécessite presque pas d'opération de prétraitement, et se distingue par des coûts de production d'électricité et de

chaleur relativement bas. Le coût de production d'électricité est d'environ 32 millions FCFA, avec un prix de revient au kWh de 21,3 FCFA, inférieur à celui de la SONABEL. La simplicité des technologies utilisées pour cette filière favorise une meilleure rentabilité. Cette filière illustre l'importance de l'accès à des équipements peu coûteux et adaptés aux spécificités locales.

Filière des noyaux de mangue (NM)

Cette filière est l'une des plus compétitives parmi les biomasses saisonnières. Avec un coût de prétraitement de moins de 3 200 FCFA/tonne, elle bénéficie d'une bonne performance économique. Le coût de production d'électricité est d'environ 19 millions FCFA, avec un prix de revient de 66,1 FCFA/kWh, nettement inférieur à celui de la SONABEL (130,24 FCFA/kWh). En chaleur, le coût de production est de 11 millions FCFA, avec un prix compétitif de 10,8 FCFA/kWh. Les technologies de conversion utilisées, bien que coûteuses pour l'électricité (6 160,2 FCFA/tonne), sont plus abordables pour la chaleur. Cette filière se démarque par des émissions plus importantes du fait de son facteur d'émission assez élevé.

Filière des épiluchures de mangue (EM)

Les épiluchures de mangue affichent les coûts de production les plus élevés parmi les biomasses saisonnières, avec un coût de prétraitement de moins de 4 000 FCFA/tonne et un coût de production d'électricité de plus de 43 millions FCFA. Leur prix de revient au kWh électrique (150,7 FCFA) dépasse celui de la SONABEL, ce qui réduit sa compétitivité. Pour la chaleur, les coûts sont relativement plus bas (6 469,8 FCFA/tonne). Les technologies de conversion, comme le biodigester associé aux équipements de traitement du gaz et de la production (moteur), restent onéreuses pour la production d'électricité.

En somme, les performances économiques et environnementales des filières étudiées varient considérablement en fonction des coûts de prétraitement, de transport, et de conversion. Les filières comme celles des noyaux de mangue et de la balle de riz se montrent plus compétitives, tandis que celles des coques d'anacarde et des épiluchures de mangue nécessitent des améliorations technologiques pour réduire leurs coûts et améliorer leur durabilité. La sélection rigoureuse des filières et l'adoption de technologies adaptées localement apparaissent comme des priorités pour une meilleure exploitation de la biomasse.

II. Recommandations

Améliorer les filières bioénergie au Burkina Faso nécessite une approche intégrée qui combine des innovations technologiques, des améliorations logistiques et des politiques

publiques adaptées. Des résultats obtenus de cette étude, les recommandations suivantes ont été formulées afin d'améliorer les différents points identifiés :

- ✓ ***Optimisation des technologies de conversion*** : l'optimisation des technologies de conversion de la biomasse au Burkina Faso est essentielle pour améliorer la rentabilité de certaines filières. Pour ce faire, il est essentiel d'investir dans la recherche et le développement (R&D) pour mettre en place des technologies adaptées aux spécificités locales. Le gouvernement et les partenaires techniques et financiers peuvent jouer un rôle important en finançant des projets qui visent à améliorer l'efficacité énergétique des processus de conversion. En outre, il est important de former les techniciens et les ingénieurs locaux à l'utilisation et à la maintenance de ces technologies avancées pour garantir une performance optimale ainsi qu'une durée de vie prolongée des installations. La mise en place de projets pilotes permettant de tester ces nouvelles technologies dans des conditions locales pourraient aussi être une étape importante pour valider leur efficacité avant une application à plus grande échelle. Cela permettra d'assurer leur adéquation avec les conditions locales et d'ajuster les technologies en fonction des retours d'expériences.
- ✓ ***Reduction des coûts du prétraitement et du transport*** : les coûts du prétraitement et du transport représentent une part importante des coûts totaux dans certaines filières de biomasse au Burkina Faso. La réduction de ces coûts est un levier nécessaire pour améliorer la rentabilité de ces filières. Le prétraitement, comprenant des opérations telles que le séchage, le broyage, le déchiquetage, le pressage et la densification, représente souvent un coût élevé, en particulier lorsque des technologies non optimisées sont employées. Pour réduire ces coûts, il est important de favoriser l'utilisation de technologies locales adaptées plutôt que de recourir à des technologies importées, généralement plus coûteuses. Cela implique sans doute d'améliorer les performances (rendements) des technologies locales mais aussi des accompagnements financiers (sous forme de subventions et d'exonérations fiscales pour l'importation de matériel) et techniques (formation, organisation) aux équipementiers, grâce à l'appui des politiques publiques. Par ailleurs, l'amélioration de l'efficacité des processus existants et en intégrant des nouvelles solutions énergétiques telles que les énergies renouvelables (solaire) dans le processus pourraient également contribuer à une réduction significative des coûts. En ce qui concerne les coûts du transport, il est important de développer une logistique optimisée, en améliorant les infrastructures routières et en créant des plateformes de collecte situées stratégiquement près des sites de production de la

biomasse. Une autre approche consiste à développer des solutions de prétraitement décentralisées, rapprochant ces opérations des sites de production de la biomasse pour limiter les coûts de transport avant traitement. Enfin, la formation des opérateurs et la maintenance régulière des équipements de prétraitement sont également des facteurs clés pour minimiser les coûts opérationnels et garantir la durabilité économique des différentes filières. Par ailleurs, compte tenu de l'impact de ces maillons sur la rentabilité de certaines filières, la sous-traitance de ces opérations pourrait constituer un levier important pour optimiser leurs performances.

- ✓ ***Réduction des disparités de coûts de production*** : les disparités de coûts de production de l'énergie à partir de différentes filières de biomasse soulignent l'importance d'une optimisation continue. Au Burkina Faso, les filières plus coûteuses, comme celles utilisant les coques d'anacarde, pourraient bénéficier de subventions ciblées ou d'incitation fiscales pour améliorer leur rentabilité. Les partenariats public-privé jouent également un rôle clé dans le financement des infrastructures nécessaires pour réduire les coûts. Par ailleurs, le CNSL, sous-produit obtenu du prétraitement peut bien être valoriser comme source d'énergie dans les industries, ou substitué le DDO (Diesel Distillate Oil) utilisé par la SONABEL pour la production de l'électricité. Il peut être aussi vendu sur le marché où son prix se situerait entre 100 000 et 300 000 FCFA/t [169]. L'intégration de ces valorisations pourra permettre de rentabiliser la filière. De même, la valorisation des sous-produits dans les autres filières, notamment le digestat comme engrais organique dans la filière des épiluchures de mangue et les biochar dans les autres filières utilisant les technologies de pyrolyse constitue des sources de revenus qui permettront sans doute d'améliorer la rentabilité de ces filières.
- ✓ ***Amélioration logistique et spécificités des filières*** : l'efficacité des filières de biomasse au Burkina Faso dépend également de la logistique et de la spécificité des filières. Ainsi, il est nécessaire de réaliser une cartographie détaillée des ressources en biomasse disponibles dans le pays, ce qui permettrait d'optimiser leur exploitation en identifiant les zones de fort potentiel. De plus, la diversification des filières, adaptée aux conditions agro-climatiques locales, permettrait de mieux répondre aux besoins énergétiques tout en réduisant les coûts. Enfin, l'intégration de la chaîne de valeur de la biomasse, depuis la production jusqu'à la conversion, renforcerait l'efficacité logistique et assurerait une alimentation continue des installations énergétiques.
- ✓ ***Politiques publiques et réglementation*** : le développement des filières de biomasse au Burkina Faso requiert un cadre réglementaire favorable et des politiques publiques

cohérentes. Il est essentiel de mettre en place des réglementations qui encouragent l'utilisation de la biomasse pour la production d'énergie. Cela inclut la mise en place de tarifs d'achat garantis pour l'électricité produite à partir de la biomasse, ce qui stimulerait les investissements dans le secteur. Il est recommandé également de mettre en place des politiques incitatives pour soutenir les filières les plus performantes en termes de coûts et d'empreintes carbone. Cela pourrait inclure des subventions, des crédits d'impôts ou des tarifs préférentiels pour l'énergie produite à partir de la biomasse. Parallèlement, des sensibilisations doivent être menées auprès des producteurs de biomasses et les communautés locales sur les avantages économiques et environnementaux de la valorisation énergétique de la biomasse. Renforcer les capacités institutionnelles des acteurs locaux est important pour mieux gérer les filières, incluant la planification stratégique, la gestion des ressources et la surveillance des impacts environnementaux. L'ensemble de ces mesures pourrait créer un environnement propice au développement durables des filières de biomasse.

- ✓ ***Amélioration des impacts socio-économiques*** : l'amélioration des filières de biomasse au Burkina Faso ne peut être dissociée de leur impact socio-économique. Promouvoir l'entrepreneuriat local dans le secteur de la biomasse à travers des programmes de financement, de formation et de soutien technique peut stimuler la création d'emplois et dynamiser les économies locales. En impliquant directement les communautés rurales dans les projets de biomasse, soit en tant que fournisseurs de matières premières ou partenaires, il est possible d'assurer une répartition équitable des bénéfices et de favoriser leur adhésion. De plus, la mise en place de mécanismes de suivi et d'évaluation continues pour mesurer l'impact socio-économique des projets permettra d'ajuster les stratégies en temps réel, maximisant ainsi les avantages pour les communautés locales. Par cette approche, les filières de biomasse au Burkina Faso pourraient devenir un levier puissant pour le développement socio-économique du pays.

En somme, l'amélioration des filières de biomasse au Burkina Faso, requiert des efforts concertés dans l'optimisation technologique, logistique et l'établissement de politiques publiques adéquates. L'ensemble de ces recommandations, tiré de l'analyse des résultats et du secteur de la biomasse-énergie de façon général vise à guider les décideurs politiques et les acteurs du secteur énergétique dans la mise en place d'une stratégie intégrée et durable pour l'exploitation des ressources en biomasse au Burkina Faso.

Conclusion générale

Les travaux de recherche présentés dans cette thèse ont porté sur l'optimisation des filières valorisant la biomasse lignocellulosique à des fins énergétiques au Burkina Faso, un pays où l'accès à l'énergie reste très limité. L'objectif principal était de proposer une organisation optimale des filières bioénergies, en prenant en compte la disponibilité des ressources, les contraintes socio-économiques et environnementales, ainsi que les potentialités technologiques spécifiques au contexte burkinabé.

Dans un premier temps, une évaluation rigoureuse des potentiels théorique, mobilisable et énergétique des biomasses lignocellulosiques agricoles et agroindustrielles a été réalisée à l'échelle régionale et nationale. Les résultats ont révélé que les tiges de cotonnier (TC) constituent la principale biomasse agricole disponible pour une valorisation énergétique, avec un potentiel mobilisable moyen 1 028 446,5 tonnes représentant près de 92% du potentiel total des biomasses disponibles étudiées entre 2018 et 2022. Les principales régions de production sont les Hauts-Bassins avec 394 858,5 tonnes, la Boucle du Mouhoun avec un potentiel de 269 202 tonnes, du Sud-Ouest avec 78 057 tonnes et des cascades avec 70 026 tonnes. De même, la disponibilité des résidus agro-industriels a été estimée à 86 928,74 tonnes avec une prédominance des résidus de mangue. Les régions de fortes potentialités sont la région des Hauts-Bassins avec 52 282,34 tonnes et la région des Cascades avec 17 337,71 tonnes.

Une évaluation multicritère basée sur six critères (disponibilité et l'accessibilité de la biomasse (DA), les utilisations concurrentes (UC), le potentiel de pollution (PP), l'impact économique (EI), le contenu énergétique de la biomasse (EC) et la disponibilité des technologies appropriées (DT)) a ensuite permis de sélectionner les biomasses les plus appropriées pour une valorisation énergétique. La pondération de ces critères via la méthode AHP a mis en évidence la prédominance du critère « disponibilité et l'accessibilité de la biomasse » (DA) avec un poids de 38%, suivi de « utilisations concurrentes » (UC), 17% et de « l'impact économique » (IE) avec environ 15%. La méthode TOPSIS a permis ensuite de classer les différentes biomasses. Les résultats de cette évaluation ont montré que les tiges de cotonnier (TC) étaient les plus appropriées, suivi des noyaux de mangue (NM), des épiluchures de mangue (EM), des coques d'anacarde (CA) et de la balle de riz (BR). La robustesse de ces résultats a été vérifiée à travers une analyse de sensibilité approfondie.

Sur la base de cette sélection, un modèle d'optimisation multi objectif a été élaboré afin de définir des chaînes d'approvisionnement viables pour chaque biomasse. Ce modèle permet à minimiser les coûts économiques et environnementaux des chaînes d'approvisionnement tout en maximisant la création d'emplois. L'étude de cas menée sur l'approvisionnement des

biomasses annuelles (tiges de cotonnier, coques d'anacarde et balle de riz) et des biomasses saisonnières (noyaux de mangue et épluchures de mangue) pour la production d'électricité et de chaleur dans la région des Hauts-Bassins a permis d'implémenter ce modèle. Les résultats ont montré que la filière de la balle de riz présentait les meilleures performances pour les biomasses annuelles, tandis que la filière des noyaux de mangue se distinguait pour les biomasses saisonnières. Si le prix d'achat de la biomasse est le facteur déterminant pour les coûts de la filière de la balle de riz, le transport prédomine pour la filière des noyaux de mangue. Cependant, pour les filières moins performantes, notamment les filières des coques d'anacarde et épluchures de mangue, les paramètres prépondérants étaient respectivement le prétraitement pour les coques d'anacarde et la conversion pour les épluchures de mangue. Par ailleurs, le prix de revient de l'électricité déterminé pour les différentes chaînes d'approvisionnement a révélé que certaines filières telles que la balle de riz, les tiges de cotonnier et les noyaux de mangue étaient compétitifs par rapport au tarif de vente actuel de l'électricité par la Société Nationale d'Electricité du Burkina Faso. Ces prix de revient unitaires sont de 40,8 FCFA/kWh pour la balle de riz, 66,1 FCFA/kWh pour les noyaux de mangue et 97,2 FCFA/kWh pour les tiges de cotonnier contre 130,34 FCFA/kWh pour l'électricité du réseau national. La filière des coques d'anacarde présentait un prix de revient largement supérieur avec 212,9 FCFA/kWh et celui de épluchures de mangue légèrement supérieur avec 151,6 FCFA/kWh. Quant au prix de revient de la chaleur, il est de 21,3 FCFA/kWhth pour la balle de riz, 10,8 FCFA/kWhth pour les noyaux de mangue, 23,8 FCFA/kWhth pour les épluchures, 28,1 FCFA/kWhth pour les tiges de cotonnier et 61,4 FCFA/kWhth pour les coques d'anacarde.

Sur le plan environnemental, la phase de conversion reste la principale source d'émission des gaz à effet de serre (GES) pour les différentes filières. Pour la production de l'électricité, en comparant les filières des biomasses annuelles, la filière tiges de cotonnier s'est montrée la moins performante avec une totale de 937,23 kgeqCO₂/t de biomasse utilisée contre 729,7 kgeqCO₂/t pour la filière des coques d'anacarde qui enregistre la meilleure performance. Pour les biomasses saisonnières, la filière des épluchures de mangues est plus performante avec des émissions totales de 705,3 kgeqCO₂/t contre 1 422,92 kgeqCO₂/t pour les noyaux de mangue. La même tendance est observée au niveau de la production de la chaleur.

Sur le plan social, la production d'électricité génère plus d'emplois que la production de la chaleur. Les principales filières pourvoyeuses d'emplois sont les tiges de cotonnier, les coques d'anacarde et les noyaux de mangue pour la production de l'électricité avec respectivement 23, 23 et 20 emplois et les coques d'anacarde, les noyaux de mangue et les épluchures pour la production de la chaleur avec 10 ; 9 et 9 emplois respectivement.

Les résultats de l'analyse de sensibilité sur les paramètres coût de la biomasse et coût du prétraitement ont confirmé l'importance de ces paramètres dans la rentabilité des filières bioénergies. L'ensemble de ces résultats indique que la valorisation des biomasses étudiées est à la fois viable et durable dans le contexte du Burkina Faso sous les conditions mises en évidence par cette étude.

Pour assurer la durabilité des filières bioénergies au Burkina Faso, une gestion efficace des ressources est indispensable. Il convient de privilégier des biomasses locales disponibles, facilement mobilisables et peu concurrentielles telles que les tiges de cotonnier, les noyaux de mangue et les coques d'anacarde. Les contraintes logistiques liées aux tiges de cotonnier, notamment en matière de collecte, de transport et de prétraitement, peuvent être surmontées en utilisant les Groupements de Producteurs de Coton comme points stratégiques de collecte et de prétraitement.

Pour les coques d'anacarde, l'adoption de technologies de prétraitement intégrant l'énergie solaire représente une solution efficace pour réduire les coûts opérationnels, tout en améliorant la viabilité économique. Les installations de taille moyenne, d'une capacité inférieure à 200 kW, sont particulièrement adaptées aux besoins des communautés locales et des petites et moyennes entreprises (PME), offrant un bon équilibre entre efficacité énergétique et coûts d'investissement.

Enfin, le choix des technologies est essentiel : des systèmes abordables et maîtrisés localement, comme la pyrolyse et la combustion dans des chaudières à biomasse, garantissent une valorisation énergétique optimale des résidus. Ces solutions permettent non seulement de maximiser l'efficacité des ressources disponibles, mais aussi de renforcer la durabilité économique et environnementale de ces filières.

Toutefois, ces travaux soulèvent également de nouvelles questions et ouvrent des pistes de réflexion qui méritent d'être explorées plus en profondeur. Il serait pertinent d'étendre l'étude à d'autres types de biomasses pour affiner davantage les modèles proposés. De plus, l'intégration des niveaux tactiques et opérationnels dans le modèle permettra de prendre en compte un certain nombre de facteurs et d'opérations qui n'ont pas été abordés dans cette étude tels que le stockage, la saisonnalité et la valorisation des sous-produits. La prise en compte de ces paramètres pourrait améliorer davantage la performance du modèle, actuellement conçu à un niveau stratégique générique. Il serait pertinent également pour les études futures d'intégrer la prise en compte de la maintenance des équipements. L'inclusion de cet aspect permettrait d'affiner les prédictions du modèle en tenant compte des performances réelles des équipements sur le long terme, des coûts associés aux interventions de maintenance et de leur impact sur

l'efficacité globale du système. L'élargissement du critère social pourrait inclure des aspects tels que la toxicité humaine, le risque de sécurité et d'autres bénéfices sociaux, renforçant ainsi la prise en compte des enjeux sociaux dans la planification des chaînes d'approvisionnement.

En somme, cette étude a démontré que le Burkina Faso dispose d'un potentiel non négligeable pour le développement des filières bioénergies basées sur la biomasse lignocellulosique. Les approches méthodologiques adoptées, combinant l'évaluation des ressources, la sélection multicritère, et l'optimisation des chaînes d'approvisionnement, ont permis de proposer des solutions viables pour la production d'énergies renouvelables, adaptées aux spécificités locales. Toutefois, la concrétisation de ce potentiel exige des efforts concertés pour lever les barrières techniques, économiques et institutionnelles. Les perspectives et recommandations identifiées offrent une feuille de route pour les futures recherches, visant à renforcer l'efficacité, la rentabilité, et la durabilité des filières bioénergies au Burkina Faso, dans le cadre de la transition énergétique mondiale.

Bibliographie

- [1] Conférence des Nations Unies sur le Commerce et le Développement (CNUCED), *Rapport sur les pays les moins avancés*. 2017.
- [2] A. P. Mammoser, “West Africa Energy Outlook Report 2023,” 2023.
- [3] S. Chitou and G. T. GBandey, “Chiffres clés sur l’ énergie au Burkina Faso et dans l’espace UEMOA- Rapport 2019,” 2019.
- [4] Ministère de l’Energie des Mines et des Carrières, “Tableau de bord 2022 du Ministère de l’Energie, des Mines et des Carrières,” 2023.
- [5] ProGREEN, “Burkina-Faso: Evaluation des énergies renouvelables,” 2021.
- [6] Ministère de l’Energie, “Tableau de bord 2019 du ministère de l’Energie,” 2020. [Online]. Available: <http://bit.ly/sunmeal>.
- [7] Ministère de l’Energie, “Plan directeur national production-transport-distribution et d’électrification rurale 2017-2025,” 2017.
- [8] Ministère de l’Energie des Mines et des Carrières, “Annuaire Statistique 2022 du Ministère de l’Energie, des Mines et des Carrières,” 2023.
- [9] UEMOA, “Atlas de l’énergie dans l’espace UEMOA,” 2020. [Online]. Available: http://www.uemoa.int/sites/default/files/bibliotheque/atlas_energie_uemoa_oif_ifdd.zip.
- [10] C. G. Djerma, “POLITIQUES ET MISE EN ŒUVRE DES BIOENERGIES AU BURKINA FASO. Enjeux et place des bioénergies dans l’ économie burkinabé : une importance croissante pour un pays visant l’ émergence en 2025,” 2014.
- [11] B. Faso, “Politique Nationale De Développement Durable Au Burkina Faso,” 2013.
- [12] Ministère de l’Environnement et du Cadre de Vie, “Plan D’ Action Decennal Pour La Promotion Des Modes De Consommation Et De Production,” p. 103, 2010.
- [13] Ministère de l’Energie, “Stratégie dans le domaine de l’ énergie 2019-2023,” 2019.
- [14] F. Zoma and M. Sawadogo, “Modeling and optimization of energy production from lignocellulosic biomass in Burkina Faso,” *2022 13th Int. Renew. Energy Congr. IREC 2022*, no. Irec, pp. 6–11, 2022, doi: 10.1109/IREC56325.2022.10002037.
- [15] SP/CNDD, “Quatrième Rapport Sur l’ Etat de l’ environnement au Burkina Faso,” p. 271, 2017.
- [16] INSD, “Cinquième recensement général de la population et de l’habitation du Burkina Faso,” p. 39, 2022.
- [17] Ministère de l’Environnement de l’Economie verte et du Changement Climatique,

- “Communication sur l’adaptation aux changements climatiques du Burkina Faso,” p. 43, 2021, [Online]. Available: <https://unfccc.int/documents/460826>.
- [18] Ministère de l’Environnement de l’Energie de l’Eau et de l’Assainissement, “Tableau de bord de l’environnement 2020,” 2022.
- [19] Ministère du Commerce de l’Industrie et de l’Artisanat, “Stratégie nationale d’industrialisation du Burkina Faso 2019-2023.”
- [20] Ministère de l’Industrie du Commerce et de l’Artisanat, “Tendances macroéconomiques du Burkina Faso,” *Africa Yearb.*, vol. 9, pp. 67–74, 2021.
- [21] C. Sourisse, “La valorisation de la biomasse,” *Biofutur*, no. 269, pp. 22–24, 2018.
- [22] R. E. H. Sims, *Bioenergy options for a cleaner environment*. 1967.
- [23] B. Cluet, “Valorisation énergétique du typha,” 2011.
- [24] G. D. F. Adamon, “Modélisation de la cinétique de gazéification étagée de la biomasse tropicale : cas des balles de riz et des rafles de maïs,” no. Ea 4297, p. 174, 2017.
- [25] O. Gup-pens, “Valorisation de la biomasse-energie en haiti : analyse de la situation et perspective d’amélioration,” 2009.
- [26] Institut de l’énergie et de l’environnement de la Francophonie (IEPF), *Guide biomasse énergie*. 2005.
- [27] A. Zoghلامي and G. Paës, “Lignocellulosic Biomass: Understanding Recalcitrance and Predicting Hydrolysis,” *Front. Chem.*, vol. 7, no. December, 2019, doi: 10.3389/fchem.2019.00874.
- [28] J. Cai *et al.*, “Review of Physicochemical Properties and Analytical Characterization of Lignocellulosic Biomass (to be submitted to Renewable and Sustainable Energy Reviews),” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, pp. 1–50, 2017, [Online]. Available: https://research.aston.ac.uk/portal/files/21837510/Lignocellulosic_biomass_physicochemical_properties_and_analytical_characterization.pdf.
- [29] A. SAIDI, “Recherche et Développement La biomasse lignocellulosique et la bioénergie,” pp. 4–5.
- [30] D. J. Krasznai, R. Champagne Hartley, H. M. Roy, P. Champagne, and M. F. Cunningham, “Compositional analysis of lignocellulosic biomass: conventional methodologies and future outlook,” *Crit. Rev. Biotechnol.*, vol. 38, no. 2, pp. 199–217, 2018, doi: 10.1080/07388551.2017.1331336.
- [31] Q. K. Beg, M. Kapoor, L. Mahajan, and G. S. Hoondal, “Microbial xylanases and their industrial applications: A review,” *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 56, no. 3–4, pp. 326–338, 2001, doi: 10.1007/s002530100704.

- [32] S. Blossé, “La biomasse lignocellulosique, un milieu poreux particulier : étude expérimentale de sa dégradation par hydrolyse enzymatique,” 2023.
- [33] A. T. W. M. Hendriks and G. Zeeman, “Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass,” *Bioresour. Technol.*, vol. 100, no. 1, pp. 10–18, 2009, doi: 10.1016/j.biortech.2008.05.027.
- [34] P. Kumar, D. M. Barrett, M. J. Delwiche, and P. Stroeve, “Methods for pretreatment of lignocellulosic biomass for efficient hydrolysis and biofuel production,” *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 48, no. 8, pp. 3713–3729, 2009, doi: 10.1021/ie801542g.
- [35] Y. Sun and J. Cheng, “Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production : a review q,” vol. 83, pp. 1–11, 2002.
- [36] C. Sánchez, “Lignocellulosic residues: Biodegradation and bioconversion by fungi,” *Biotechnol. Adv.*, vol. 27, no. 2, pp. 185–194, 2009, doi: 10.1016/j.biotechadv.2008.11.001.
- [37] Z. Anwar, M. Gulfraz, and M. Irshad, “Agro-industrial lignocellulosic biomass a key to unlock the future bio-energy: A brief review,” *J. Radiat. Res. Appl. Sci.*, vol. 7, no. 2, pp. 163–173, 2014, doi: 10.1016/j.jrras.2014.02.003.
- [38] J.-P. Tagutchou and P. Naquin, “Caractérisation et traitement thermo-chimique des coques d’anacarde en vue de leur valorisation énergétique dans les procédés de transformation artisanale de noix de cajou,” *Déchets, Sci. Tech.*, no. 62, pp. 21–24, 2012, doi: 10.4267/dechets-sciences-techniques.2722.
- [39] P. A. Diedhiou, “Thèse présentée en cotutelle pour l ’ obtention du grade de Docteur de l ’ UTC,” 2017.
- [40] P. K. Keshav, C. Banoth, S. N. Kethavath, and B. Bhukya, “Lignocellulosic ethanol production from cotton stalk: an overview on pretreatment, saccharification and fermentation methods for improved bioconversion process,” *Biomass Convers. Biorefinery*, vol. 13, no. 6, pp. 4477–4493, 2023, doi: 10.1007/s13399-021-01468-z.
- [41] M. F. F. Husna and S. Vasantharuba, “Analysis and Comparison of Peanut Shell’s Cellulose Content,” *Int. Conf. Sci. Technol. "Building Sustain. Futur. Through Technol. Transform.*, no. Icst, pp. 131–135, 2022.
- [42] “Mango sector / Characterization of waste - BIOSTAR - BIONERGY FOR SMES IN WEST AFRICA.” <https://www.biostar-afrique.org/en/the-sectors/characterization-of-waste/mango-sector> (accessed Jul. 20, 2022).
- [43] “Caractérisation des résidus / Les filières - BIOSTAR, des bioénergies pour les PME d’Afrique de l’Ouest.” <https://www.biostar-afrique.org/les-filières/caracterisation-des->

residus (accessed Aug. 25, 2023).

- [44] A. Yousuf, D. Pirozzi, and F. Sannino, *Fundamentals of lignocellulosic biomass*. INC, 2019.
- [45] F. Xu and Y. Li, “Biomass Digestion,” *Encycl. Sustain. Technol.*, vol. 3, no. 2015, pp. 197–204, 2017, doi: 10.1016/B978-0-12-409548-9.10108-3.
- [46] P. Mckendry, “Energy production from biomass (part 1): overview of biomass,” vol. 83, no. July 2001, pp. 37–46, 2002.
- [47] N. Boucherba, “Valorisation des résidus agro-industriels,” p. 73, 2015.
- [48] S. RAZAFINJOARY, “Valorisation de la biomasse pour produire de l ’ electricite par gazeification de la region d ’ alaotra mangoro,” 2009.
- [49] A. A. Khan, W. de Jong, P. J. Jansens, and H. Spliethoff, “Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 90, no. 1, pp. 21–50, 2009, doi: 10.1016/j.fuproc.2008.07.012.
- [50] R. Crehay and D. Marchal, “La filière bois-énergie : dossier réalisé par ValBiom pour le compte de la DGTRE,” *ValBiom - Valoris. la biomasse asbl*, p. 58, 2004, [Online]. Available: www.valbiom.be.
- [51] I. Obernberger, “Reached developments of biomass combustion technologies and future outlook,” *Proc. 17th Eur. Biomass Conf.*, no. March 2007, pp. 20–37, 2009.
- [52] J. Werther, M. Saenger, E. U. Hartge, T. Ogada, and Z. Siagi, “Combustion of agricultural residues,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 26, no. 1, pp. 1–27, 2000, doi: 10.1016/S0360-1285(99)00005-2.
- [53] Nations Unies, “Conseil économique et social,” vol. 11693, 2020.
- [54] S. Dasappa, P. J. Paul, H. S. Mukunda, N. K. S. Rajan, G. Sridhar, and H. V. Sridhar, “Biomass gasification technology - A route to meet energy needs,” *Curr. Sci.*, vol. 87, no. 7, pp. 908–916, 2004.
- [55] J. P. Ciferno and J. J. Marano, “Benchmarking biomass gasification technologies for fuels, chemicals and hydrogen production,” *US Dep. Energy. Natl. Energy*, no. June, p. 58, 2002, [Online]. Available: <http://seca.doe.gov/technologies/coalpower/gasification/pubs/pdf/BMassGasFinal.pdf>.
- [56] E. G. Pereira, J. N. Da Silva, J. L. De Oliveira, and C. S. MacHado, “Sustainable energy: A review of gasification technologies,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 7, pp. 4753–4762, 2012, doi: 10.1016/j.rser.2012.04.023.
- [57] F. Ricoul, “Association d’un procédé de gazéification avec une pile à combustible haute température (SOFC) pour la production d’électricité à partir de biomasse Président,” p.

- 280, 2016, [Online]. Available: <http://archive.bu.univ-nantes.fr/pollux/fichiers/download/af35f259-85a5-4b4c-aded-92cb404f0278>.
- [58] S. K. Sansaniwal, K. Pal, M. A. Rosen, and S. K. Tyagi, “Recent advances in the development of biomass gasification technology: A comprehensive review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 72, no. December 2015, pp. 363–384, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.01.038.
- [59] A. Molino, S. Chianese, and D. Musmarra, “The State of the Art Overview of the Biomass Gasification Technology,” *Curr. Sustain. Energy Reports*, vol. 8, no. 4, pp. 282–295, 2021, doi: 10.1007/s40518-021-00196-2.
- [60] M. Yan, N. Afxentiou, and P. A. Fokaides, “The State of the Art Overview of the Biomass Gasification Technology,” *Curr. Sustain. Energy Reports*, vol. 8, no. 4, pp. 282–295, 2021, doi: 10.1007/s40518-021-00196-2.
- [61] S. Jean-Marie, “La Gazéification | Encyclopédie de l’énergie <https://www.encyclopedie-energie.org/la-gazeification/>,” pp. 1–13, 2019.
- [62] C. Loha, M. K. Karmakar, S. De, and P. K. Chatterjee, “Gasifiers: Types, Operational Principles, and Commercial Forms,” *Energy, Environ. Sustain.*, pp. 63–91, 2018, doi: 10.1007/978-981-10-7335-9_3.
- [63] S. L. Narnaware, N. L. Panwar, T. Gupta, and K. K. Meena, “Bubbling Fluidized Bed Gasification of Biomass: A Review on the Effect of Selected Operational Parameters,” *Biointerface Res. Appl. Chem.*, vol. 13, no. 5, 2023, doi: 10.33263/BRIAC135.474.
- [64] C. A. Díaz González and L. Pacheco Sandoval, “Sustainability aspects of biomass gasification systems for small power generation,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 134, no. August, 2020, doi: 10.1016/j.rser.2020.110180.
- [65] F. Barry, M. Sawadogo, M. Bologo, I. W. K. Ouédraogo, and T. Dogot, “Key barriers to the adoption of biomass gasification in Burkina Faso,” *Sustain.*, vol. 13, no. 13, pp. 1–14, 2021, doi: 10.3390/su13137324.
- [66] F. Barry, “Evaluation des conditions de développement d’une filière de gazéification de biomasse agricole au Burkina Faso,” 2023.
- [67] T. Y. A. Fahmy, Y. Fahmy, F. Mobarak, M. El-Sakhawy, and R. E. Abou-Zeid, “Biomass pyrolysis: past, present, and future,” *Environ. Dev. Sustain.*, vol. 22, no. 1, pp. 17–32, 2020, doi: 10.1007/s10668-018-0200-5.
- [68] A. Demirbaş and G. Arin, “An overview of biomass pyrolysis,” *Energy Sources*, vol. 24, no. 5, pp. 471–482, 2002, doi: 10.1080/00908310252889979.
- [69] S. Wang, G. Dai, H. Yang, and Z. Luo, “Lignocellulosic biomass pyrolysis mechanism:

- A state-of-the-art review,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 62, pp. 33–86, 2017, doi: 10.1016/j.pecs.2017.05.004.
- [70] G. Perkins, T. Bhaskar, and M. Konarova, “Process development status of fast pyrolysis technologies for the manufacture of renewable transport fuels from biomass,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 90, no. March, pp. 292–315, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.03.048.
- [71] M. Raza *et al.*, “Progress of the pyrolyzer reactors and advanced technologies for biomass pyrolysis processing,” *Sustain.*, vol. 13, no. 19, pp. 1–42, 2021, doi: 10.3390/su131911061.
- [72] G. Wang *et al.*, “A review of recent advances in biomass pyrolysis,” *Energy and Fuels*, vol. 34, no. 12, pp. 15557–15578, 2020, doi: 10.1021/acs.energyfuels.0c03107.
- [73] M. N. Uddin *et al.*, “An overview of recent developments in biomass pyrolysis technologies,” *Energies*, vol. 11, no. 11, 2018, doi: 10.3390/en11113115.
- [74] A. V. Bridgwater and S. A. Bridge, “A Review of Biomass Pyrolysis and Pyrolysis Technologies,” *Biomass Pyrolysis Liq. Upgrad. Util.*, pp. 11–92, 1991, doi: 10.1007/978-94-011-3844-4_2.
- [75] A. N. Amenaghawon, C. L. Anyalewechi, C. O. Okieimen, and H. S. Kusuma, *Biomass pyrolysis technologies for value-added products: a state-of-the-art review*, vol. 23, no. 10. Springer Netherlands, 2021.
- [76] T. Kan, V. Strezov, and T. J. Evans, “Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 57, pp. 1126–1140, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.185.
- [77] P. Roy and G. Dias, “Prospects for pyrolysis technologies in the bioenergy sector: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 77, no. March, pp. 59–69, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.03.136.
- [78] M. I. Jahirul, M. G. Rasul, A. A. Chowdhury, and N. Ashwath, “Biofuels production through biomass pyrolysis- A technological review,” *Energies*, vol. 5, no. 12, pp. 4952–5001, 2012, doi: 10.3390/en5124952.
- [79] C. Sawatdeenarunat, K. C. Surendra, D. Takara, H. Oechsner, and S. K. Khanal, “Anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: Challenges and opportunities,” *Bioresour. Technol.*, vol. 178, pp. 178–186, 2015, doi: 10.1016/j.biortech.2014.09.103.
- [80] T. Kunatsa and X. Xia, “A review on anaerobic digestion with focus on the role of biomass co-digestion, modelling and optimisation on biogas production and enhancement,” *Bioresour. Technol.*, vol. 344, 2022, doi:

- 10.1016/j.biortech.2021.126311.
- [81] X. Ge, F. Xu, and Yebo Li, “Solid-state anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: Recent progress and perspectives,” pp. 1–40, 2016.
- [82] G. Bastide, “Fiche Technique Méthanisation,” *Ademe*, pp. 56–63, 2015.
- [83] P. P. Argalis and K. Vegere, “Perspective biomethane potential and its utilization in the transport sector in the current situation of Latvia,” *Sustain.*, vol. 13, no. 14, 2021, doi: 10.3390/su13147827.
- [84] L. Yang, F. Xu, X. Ge, and Y. Li, “Challenges and strategies for solid-state anaerobic digestion of lignocellulosic biomass,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 44, pp. 824–834, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.01.002.
- [85] K. Timonen, T. Sinkko, S. Luostarinen, E. Tampio, and K. Joensuu, “LCA of anaerobic digestion: Emission allocation for energy and digestate,” *J. Clean. Prod.*, vol. 235, pp. 1567–1579, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.06.085.
- [86] S. De Meester, J. Demeyer, F. Velghe, A. Peene, H. Van Langenhove, and J. Dewulf, “The environmental sustainability of anaerobic digestion as a biomass valorization technology,” *Bioresour. Technol.*, vol. 121, no. July, pp. 396–403, 2012, doi: 10.1016/j.biortech.2012.06.109.
- [87] N. Boontian, “Conditions of the Anaerobic Digestion of Biomass,” *Int. J. Biol. Biomol. Agric. Food Biotechnol. Eng.*, vol. 8, no. 9, pp. 1036–1040, 2014, [Online]. Available: scholar.waset.org/1999.1/9999472.
- [88] P. Weiland, “Biogas production: Current state and perspectives,” *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 85, no. 4, pp. 849–860, 2010, doi: 10.1007/s00253-009-2246-7.
- [89] V. N. Gunaseelan, “Anaerobic digestion of biomass for methane production: A review,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 13, no. 1–2, pp. 83–114, 1997, doi: 10.1016/S0961-9534(97)00020-2.
- [90] S. Meryem, “Les procédés de digestion anaérobie pour la production du Biogaz,” *Rech. Développement*, vol. 28, pp. 2–3, 2013.
- [91] V. Kastner, W. Somitsch, and W. Schnitzhofer, “The anaerobic fermentation of food waste: A comparison of two bioreactor systems,” *J. Clean. Prod.*, vol. 34, pp. 82–90, 2012, doi: 10.1016/j.jclepro.2012.03.017.
- [92] C. Sawatdeenarunat *et al.*, “Anaerobic biorefinery: Current status, challenges, and opportunities,” *Bioresour. Technol.*, vol. 215, pp. 304–313, 2016, doi: 10.1016/j.biortech.2016.03.074.
- [93] S. Paul and A. Dutta, “Resources , Conservation & Recycling Challenges and

- opportunities of lignocellulosic biomass for anaerobic digestion,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 130, no. March 2017, pp. 164–174, 2018, doi: 10.1016/j.resconrec.2017.12.005.
- [94] L. Breitenmoser *et al.*, “Anaerobic digestion of biowastes in India: Opportunities, challenges and research needs,” *J. Environ. Manage.*, vol. 236, no. June 2018, pp. 396–412, 2019, doi: 10.1016/j.jenvman.2018.12.014.
- [95] S. Fichtner and H. Meyr, *Strategic Supply Chain Planning in Biomass-Based Industries: A Literature Review of Quantitative Models*. 2017.
- [96] N. Z. Atashbar, N. Labadie, and C. Prins, “Modeling and optimization of biomass supply chains: A review and a critical look,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 12, pp. 604–615, 2016, doi: 10.1016/j.ifacol.2016.07.742.
- [97] B. Sharma, R. G. Ingalls, C. L. Jones, and A. Khanchi, “Biomass supply chain design and analysis : Basis , overview , modeling , challenges , and future,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 24, pp. 608–627, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.03.049.
- [98] A. A. Rentizelas, *Biomass supply chains*. Woodhead Publishing Limited, 2013.
- [99] A. De Meyer, J. Almeida, W. Achten, B. Muys, D. Cattrysse, and J. Van Orshoven, “Incorporating life cycle impact assessment in mathematical model to optimize strategic decisions in biomass-for-bioenergy supply chains,” *Proc. from LCA XIII Int. Conf. “Fulfilling LCA’s Promise,”* pp. 24–33, 2013.
- [100] F. Mafakheri and F. Nasiri, “Modeling of biomass-to-energy supply chain operations : Applications , challenges and research directions,” *Energy Policy*, vol. 67, pp. 116–126, 2014, doi: 10.1016/j.enpol.2013.11.071.
- [101] B. H. Ba, “Modélisation et optimisation de chaines d ’ approvisionnement en biomasses pour des bioraffineries Spécialité :,” 2016.
- [102] N. Z. Atashbar, N. Labadie, and C. Prins, “Modelling and optimisation of biomass supply chains : a review,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 7543, no. July, pp. 1–25, 2017, doi: 10.1080/00207543.2017.1343506.
- [103] O. Sun and N. Fan, “A Review on Optimization Methods for Biomass Supply Chain: Models and Algorithms, Sustainable Issues, and Challenges and Opportunities,” *Process Integr. Optim. Sustain.*, vol. 4, no. 3, pp. 203–226, 2020, doi: 10.1007/s41660-020-00108-9.
- [104] S. M. Zahraee, N. Shiwakoti, and P. Stasinopoulos, “Biomass and Bioenergy Biomass supply chain environmental and socio-economic analysis : 40-Years comprehensive review of methods , decision issues , sustainability challenges , and the way forward,”

- Biomass and Bioenergy*, vol. 142, no. June, p. 105777, 2020, doi: 10.1016/j.biombioe.2020.105777.
- [105] M. A. Quddus, N. U. Ibne Hossain, M. Mohammad, R. M. Jaradat, and M. S. Roni, “Sustainable network design for multi-purpose pellet processing depots under biomass supply uncertainty,” *Comput. Ind. Eng.*, vol. 110, pp. 462–483, 2017, doi: 10.1016/j.cie.2017.06.001.
- [106] S. Gold and S. Seuring, “Supply chain and logistics issues of bio-energy production,” *J. Clean. Prod.*, vol. 19, no. 1, pp. 32–42, 2011, doi: 10.1016/j.jclepro.2010.08.009.
- [107] L. Axelsson, M. Franzén, M. Ostwald, G. Berndes, G. Lakshmi, and N. H. Ravindranath, “Perspective: Jatropha cultivation in southern India: Assessing farmers’ experiences,” *Biofuels, Bioprod. Biorefining*, vol. 6, no. 3, pp. 246–256, 2012, doi: 10.1002/bbb.
- [108] J. A. M. Browne, A. H. J. Boyd, J. Allen, and M. Browne, “Logistics management and costs of biomass fuel supply,” 2010.
- [109] Y. S. Yadav and Y. K. Yadav, “Biomass supply chain management and challenges,” *Value-Chain Biofuels Fundam. Technol. Stand.*, pp. 429–444, 2021, doi: 10.1016/B978-0-12-824388-6.00016-6.
- [110] D. Tilman *et al.*, “Beneficial Biofuels—The Food, Energy, and Environment Trilemma,” pp. 4–5.
- [111] J. Mula, D. Peidro, M. Díaz-madroñero, and E. Vicens, “Mathematical programming models for supply chain production and transport planning,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 204, no. 3, pp. 377–390, 2010, doi: 10.1016/j.ejor.2009.09.008.
- [112] B. H. Ba, C. Prins, and C. Prodhon, “An Overview of OR Models for Biomass Supply Chains,” pp. 174–182, 2014, doi: 10.5220/0004777001740182.
- [113] J. E. Santibañez-aguilar, J. B. González-campos, J. M. Ponce-ortega, M. Serna-gonzález, and M. M. El-halwagi, “Optimal planning and site selection for distributed multiproduct biorefineries involving economic, environmental and social objectives,” *J. Clean. Prod.*, vol. 65, pp. 270–294, 2014, doi: 10.1016/j.jclepro.2013.08.004.
- [114] T. Lin, L. F. Rodríguez, Y. N. Shastri, A. C. Hansen, and K. C. Ting, “Integrated strategic and tactical biomass-biofuel supply chain optimization,” *Bioresour. Technol.*, vol. 156, pp. 256–266, 2014, doi: 10.1016/j.biortech.2013.12.121.
- [115] C. Cambero, T. Sowlati, M. Marinescu, and D. Röser, “Strategic optimization of forest residues to bioenergy and biofuel supply chain,” no. August 2014, pp. 439–452, 2015, doi: 10.1002/er.
- [116] S. Samsatli, N. J. Samsatli, and N. Shah, “BVCM: A comprehensive and flexible toolkit

- for whole system biomass value chain analysis and optimisation - Mathematical formulation,” *Appl. Energy*, vol. 147, pp. 131–160, 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.01.078.
- [117] B. H. Ba, C. Prins, and C. Prodhon, “Models for optimization and performance evaluation of biomass supply chains: An Operations Research perspective,” *Renew. Energy*, pp. 1–13, 2015, doi: 10.1016/j.renene.2015.07.045.
- [118] L. Camara, “Planification tactique-opérationnelle des chaînes d ’ approvisionnement durables en boucle fermée (Logistique inverse) Par,” 2019.
- [119] A. De Meyer, D. Cattrysse, and J. Van Orshoven, “A generic mathematical model to optimise strategic and tactical decisions in biomass-based supply chains (OPTIMASS),” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 000, pp. 1–18, 2015, doi: 10.1016/j.ejor.2015.02.045.
- [120] Y. Wang, J. Wang, J. Schuler, D. Hartley, T. Volk, and M. Eisenbies, “Optimization of harvest and logistics for multiple lignocellulosic biomass feedstocks in the northeastern United States,” *Energy*, vol. 197, p. 117260, 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.117260.
- [121] S. Akhtari, T. Sowlati, and V. C. Griess, “Integrated strategic and tactical optimization of forest-based biomass supply chains to consider medium-term supply and demand variations,” *Appl. Energy*, vol. 213, no. June, pp. 626–638, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.10.017.
- [122] S. Akhtari, T. Sowlati, and K. Day, “The effects of variations in supply accessibility and amount on the economics of using regional forest biomass for generating district heat,” *Energy*, vol. 67, pp. 631–640, 2014, doi: 10.1016/j.energy.2014.01.092.
- [123] N. Shabani and T. Sowlati, “A mixed integer non-linear programming model for tactical value chain optimization of a wood biomass power plant,” *Appl. Energy*, vol. 104, pp. 353–361, 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2012.11.013.
- [124] N. Geng and Y. Sun, “Multiobjective Optimization of Sustainable WCO for Biodiesel Supply Chain Network Design,” *Discret. Dyn. Nat. Soc.*, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/6640358.
- [125] S. Bairamzadeh, M. Saidi-Mehrabad, and M. S. Pishvaei, “Modelling different types of uncertainty in biofuel supply network design and planning: A robust optimization approach,” *Renew. Energy*, vol. 116, pp. 500–517, 2018, doi: 10.1016/j.renene.2017.09.020.
- [126] S. K. Han and G. E. Murphy, “Solving a woody biomass truck scheduling problem for a transport company in Western Oregon, USA,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 44, pp. 47–55, 2012, doi: 10.1016/j.biombioe.2012.04.015.

- [127] B. Recio, F. Rubio, and J. A. Criado, “A decision support system for farm planning using AgriSupport II,” *Decis. Support Syst.*, vol. 36, no. 2, pp. 189–203, 2003, doi: 10.1016/S0167-9236(02)00134-3.
- [128] K. T. Malladi and T. Sowlati, “Optimization of operational level transportation planning in forestry: a review,” *Int. J. For. Eng.*, vol. 28, no. 3, pp. 198–210, 2017, doi: 10.1080/14942119.2017.1362825.
- [129] C. Ortiz-Astorquiza, I. Contreras, and G. Laporte, “Multi-level facility location problems,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 267, no. 3, pp. 791–805, 2018, doi: 10.1016/j.ejor.2017.10.019.
- [130] K. Calvert, “Geomatics and bioenergy feasibility assessments: Taking stock and looking forward,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 2, pp. 1117–1124, 2011, doi: 10.1016/j.rser.2010.11.014.
- [131] M. Ullah, M. Vaezi, A. Kumar, and J. Bell, “Assessment of the waste-to-energy potential from Alberta’s food processing industry,” *Can. Biosyst. Eng. / Le Genie des Biosyst. au Canada*, vol. 59, pp. 1–9, 2017, doi: 10.7451/CBE.2017.59.8.1.
- [132] J. Cao, B. Pang, X. Mo, and F. Xu, “A new model that using transfer stations for straw collection and transportation in the rural areas of China: A case of Jinghai, Tianjin,” *Renew. Energy*, vol. 99, pp. 911–918, 2016, doi: 10.1016/j.renene.2016.07.061.
- [133] R. L. Graham, B. C. English, and C. E. Noon, “A Geographic Information System-based modeling system for evaluating the cost of delivered energy crop feedstock,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 18, no. 4, pp. 309–329, 2000, doi: 10.1016/S0961-9534(99)00098-7.
- [134] A. Allman, C. Lee, M. Martín, and Q. Zhang, “Biomass waste-to-energy supply chain optimization with mobile production modules,” *Comput. Chem. Eng.*, vol. 150, p. 107326, 2021, doi: 10.1016/j.compchemeng.2021.107326.
- [135] M. Saghaei, H. Ghaderi, and H. Soleimani, “Design and optimization of biomass electricity supply chain with uncertainty in material quality, availability and market demand,” *Energy*, vol. 197, p. 117165, 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.117165.
- [136] L. D. F. Bambara, M. Sawadogo, D. Roy, J. Blin, D. Anciaux, and S. K. Ouiminga, *Wild and cultivated biomass supply chain for biofuel production. A comparative study in West Africa*, vol. 53. 2019.
- [137] E. León-Olivares, H. Minor-Popocatl, O. Aguilar-Mejía, and D. Sánchez-Partida, “Optimization of the Supply Chain in the Production of Ethanol from Agricultural Biomass Using Mixed-Integer Linear Programming (MILP): A Case Study,” *Math.*

- Probl. Eng.*, vol. 2020, 2020, doi: 10.1155/2020/6029507.
- [138] J. Wu, J. Zhang, W. Yi, H. Cai, Y. Li, and Z. Su, “Agri-biomass supply chain optimization in north China: Model development and application,” *Energy*, vol. 239, p. 122374, 2022, doi: 10.1016/j.energy.2021.122374.
- [139] L. M. Reyes-Barquet *et al.*, “Multi-Objective Optimal Design of a Hydrogen Supply Chain Powered with Agro-Industrial Wastes from the Sugarcane Industry: A Mexican Case Study,” *Mathematics*, vol. 10, no. 3, 2022, doi: 10.3390/math10030437.
- [140] I. Awudu and J. Zhang, “Uncertainties and sustainability concepts in biofuel supply chain management: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 2, pp. 1359–1368, 2012, doi: 10.1016/j.rser.2011.10.016.
- [141] Y. C. Ahn, I. B. Lee, K. H. Lee, and J. H. Han, “Strategic planning design of microalgae biomass-to-biodiesel supply chain network: Multi-period deterministic model,” *Appl. Energy*, vol. 154, pp. 528–542, 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.05.047.
- [142] F. A. Al-Noweam, I. A. El-Khouly, and K. S. El-Kilany, “Multi-objective optimization of biomass supply chain networks,” *Proc. Int. Conf. Ind. Eng. Oper. Manag.*, vol. 2018, no. JUL, pp. 2151–2161, 2018.
- [143] Y. Dian, J. Shiun, S. Ra, and W. Alwi, “Multi-objective optimal design for integrated palm oil mill complex with consideration of effluent elimination,” vol. 202, 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.117767.
- [144] M. Kaoma and S. H. Gheewala, “Sustainability performance of lignocellulosic biomass-to-bioenergy supply chains for Rural Growth Centres in Zambia,” *Sustain. Prod. Consum.*, vol. 28, pp. 1343–1365, 2021, doi: 10.1016/j.spc.2021.08.007.
- [145] M. Rabbani, N. A. Saravi, H. Farrokhi-Asl, S. F. W. T. Lim, and Z. Tahaei, “Developing a sustainable supply chain optimization model for switchgrass-based bioenergy production: A case study,” *J. Clean. Prod.*, vol. 200, pp. 827–843, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.07.226.
- [146] H. Fernández-Puratich, R. Rebolledo-Leiva, D. Hernández, J. E. Gómez-Lagos, B. Armengot-Carbo, and J. V. Oliver-Villanueva, “Bi-objective optimization of multiple agro-industrial wastes supply to a cogeneration system promoting local circular bioeconomy,” *Appl. Energy*, vol. 300, no. April, 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117333.
- [147] G. Ferro, R. Minciardi, E. Podestà, and M. Robba, “An optimization model for the sizing of the biomass plants’ supply chain,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 5, pp. 114–119, 2018, doi: 10.1016/j.ifacol.2018.06.220.

- [148] M. Sawadogo, L. D. F. Bambara, D. Anciaux, D. Roy, and J. Blin, “Optimization of *Balanites aegyptiaca* seeds supply chain for biofuel production in West Africa sahelian regions,” 2017.
- [149] D. L. F. Bambara, “Analyse et optimisation de la durabilité des systèmes de production de biocarburants oléagineux en Afrique de l’ Ouest,” 2018.
- [150] “Burkina Faso: Plan d’Action National des Energies Renouvelables (PANER) Période [2015-2020/2030],” 2020.
- [151] Ministère de l’Environnement de l’Eau et de l’Assainissement, “Tableau de bord de l’environnement 2021,” pp. 1–137, 2023.
- [152] Ministère de l’Energie, “Annuaire statistique 2019 du Ministère de l’Energie,” 2020.
- [153] M. Ouedraogo *et al.*, “Characterization of sugar cane bagasse ash from Burkina Faso for cleaner cement production: Influence of calcination temperature and duration,” *Results Mater.*, vol. 14, no. November 2021, p. 100275, 2022, doi: 10.1016/j.rinma.2022.100275.
- [154] ECREEE, “Faits marquants , Leçons apprises: FasoBiogaz,” 2015.
- [155] S. Audouin, A. Chapuis, S. Derra, C. G. Djerma, M.-H. Dabat, and L. Gazull, “Un Cadre D’ Analyse Pour Evaluer Les Filières De Production De Biocarburants a Base D’ Huiles Vegetales En Afrique De L’ Ouest,” 2013, no. 1, doi: 10.13140/2.1.4426.3684.
- [156] Banque Mondiale, “Note sectorielle sur les forêts: Pour une gestion durable des forêts,” p. 116, 2022.
- [157] African energy commision, “African energy efficiency database for residential sector,” 2017.
- [158] EASYPol, “Analyse des impacts Financiers et économiques de la filière bois- énergie organisée approvisionnant la ville de Ouagadougou,” 2007.
- [159] F. Barry, M. Sawadogo, I. W. K. Ouédraogo, M. Traoré/Bologo, and T. Dogot, “Geographical and economic assessment of feedstock availability for biomass gasification in Burkina Faso,” *Energy Convers. Manag. X*, vol. 13, no. December 2021, 2022, doi: 10.1016/j.ecmx.2021.100163.
- [160] FAO, *Résidus agricoles et sous-produits agro-industriels en Afrique de l’Ouest*. 2014.
- [161] “Comment produire de l’énergie électrique? - Greenwatt.” <https://www.greenwatt.fr/produire-de-l-energie-electrique/> (accessed Nov. 16, 2024).
- [162] S. Villard, J. A. Sancho, Y. Baguignan, and M. S. Aïde, “Capitalisation des technologies innovantes de valorisation des biodéchets,” vol. 33, no. 0, p. 71, 2018.
- [163] Organisation Néerlandaise de Développement (SNV-Burkina), “Evaluation finale pour la

- capitalisation des resultats du projet gazoriz : amelioration de la production de riz etuve a bama par gazeification de balles de riz,” 2017.
- [164] Ministère de l’Energie, “Stratégie dans le domaine de l’ énergie 2019-2023,” 2018.
- [165] Institut de l’ énergie et de l’ environnement de la Francophonie (IEPF), “Les technologies à haute performance énergétique fiche n° 7: les foyers améliorés,” 2014.
- [166] Réseau Climat Développement, “Etat des lieux sur l’ utilisation des foyers améliorés au Burkina Faso,” pp. 1–16, 2013.
- [167] “SE4ALL:[Burkina Faso]: Evaluation rapide et analyse d’ écart,” pp. 1–41, 2020.
- [168] B. Ouedraogo, “Tarification du bois-énergie au Burkina Faso : la problématique de l’ internalisation des coûts sociaux liés à l’ exploitation de l’ énergie,” no. December, 2015, doi: 10.13140/RG.2.1.1793.1600.
- [169] S. Villard, A. Bamogo, and J. A. Sancho, “Etude de faisabilité Valorisation de la coque de noix de cajou Burkina Faso,” vol. 33, no. 0, pp. 1–65, 2021.
- [170] G. Chidikofan, “Développement méthodologique pour l’ évaluation des performances et de la durabilité des systèmes de production d’ électricité par gazéification de biomasse en milieu rural : Etude de cas au Burkina-Faso Grâce Chidikofan To cite this version : HAL Id :,” 2018.
- [171] MDICAPME/MEFP, “Arrêté conjoint n°2024-003/MDICAPME/MEFP portant énumération des éléments de la structure de prix du Gaz Butane et fixation de ses prix.” 2024.
- [172] MDICAPME/MEFP, “Arrêté conjoint n°2024-002/MDICAPME/MEFP portant fixation des prix de vente détail au consommateur des hydrocarbures.” 2024.
- [173] MDICAPME/MEFP, “Arrêté conjoint n°2024-001/MDICAPME/MEFP portant composition des structures de prix des hydrocarbures.” .
- [174] ME/MINEFID/MCIA, “Arrete-interministériel-n°2020-033/ME/MINEFID/MCIA portant conditions d’ éligibilité et modalités de jouissance de l’ exonération de la taxe sur la Valeur Ajoutéesur les importation et les ventes de matériel solaire.” 2020.
- [175] R. Lal, “World crop residues production and implications of its use as a biofuel,” *Environ. Int.*, vol. 31, no. 4, pp. 575–584, 2005, doi: 10.1016/j.envint.2004.09.005.
- [176] F. Kemausuor, A. Kamp, S. T. Thomsen, E. C. Bensah, and H. Stergård, “Assessment of biomass residue availability and bioenergy yields in Ghana,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 86, pp. 28–37, 2014, doi: 10.1016/j.resconrec.2014.01.007.
- [177] F. Odoi-Yorke, L. K. Osei, E. Gyamfi, and M. S. Adaramola, “Assessment of crop residues for off-grid rural electrification options in Ghana,” *Sci. African*, vol. 18, no.

- November, p. e01435, 2022, doi: 10.1016/j.sciaf.2022.e01435.
- [178] J. Portugal-Pereira, R. Soria, R. Rathmann, R. Schaeffer, and A. Szklo, “Agricultural and agro-industrial residues-to-energy: Techno-economic and environmental assessment in Brazil,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 81, no. April, pp. 521–533, 2015, doi: 10.1016/j.biombioe.2015.08.010.
- [179] M. Junginger, A. Faaij, R. Van Den Broek, A. Koopmans, and W. Hulscher, “Fuel supply strategies for large-scale bio-energy projects in developing countries. Electricity generation from agricultural and forest residues in Northeastern Thailand,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 21, no. 4, pp. 259–275, 2001, doi: 10.1016/S0961-9534(01)00034-4.
- [180] F. Zoma and M. Sawadogo, “A multicriteria approach for biomass availability assessment and selection for energy production in Burkina Faso: A hybrid AHP-TOPSIS approach,” *Heliyon*, vol. 9, no. 10, p. e20999, 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e20999.
- [181] A. Tolessa, “Bioenergy potential from crop residue biomass resources in Ethiopia,” *Heliyon*, vol. 9, no. 2, p. e13572, 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e13572.
- [182] Direction Générale des Études et des Statistiques Sectorielles (DGESS), “Annuaire des statistiques agricoles 2019,” 2020.
- [183] Direction Générale des Études et des Statistiques Sectorielles (DGESS), “Annuaire des statistiques agricoles 2020,” 2021. [Online]. Available: <https://pacte.agriculture.bf/wp-content/uploads/2020/02/Annuaire-des-Statistiques-Agricoles-2018-MAAH-2020.pdf>.
- [184] INSD, “Annuaire statistique 2022,” 2023.
- [185] J. C. Terrapon-Pfaff, “Linking energy- and land-use systems: Energy potentials and environmental risks of using agricultural residues in Tanzania,” *Sustainability*, vol. 4, no. 3, pp. 278–293, 2012, doi: 10.3390/su4030278.
- [186] Agri Logic, “Analyse de la chaîne de valeur des fruits transformés au Burkina Faso, au Mali et en Côte d’Ivoire,” *Rvo*, 2019.
- [187] T. Morato, M. Vaezi, and A. Kumar, “Assessment of energy production potential from agricultural residues in Bolivia,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 102, no. November 2018, pp. 14–23, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2018.11.032.
- [188] Conseil Burkinabé de l’Anacarde (CBA), “Rapport annuel 2021 sur la filiere anacarde au burkina faso,” 2021.
- [189] Professionnel de la Transformation de la Mangue du Burkina (PTRAMAB), “Transformation de la mangue campagne 2022,” 2023.
- [190] I. ; Nygaard *et al.*, *Résidus agricoles pour la production de l’énergie au Mali*. 2012.
- [191] L. Gérault and A. Bonneville, “Schéma régional biomasse des pays de la loire,” 2019.

- [192] S. J. Gerssen-Gondelach, D. Saygin, B. Wicke, M. K. Patel, and A. P. C. Faaij, “Competing uses of biomass: Assessment and comparison of the performance of bio-based heat, power, fuels and materials,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 40, pp. 964–998, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.07.197.
- [193] Z. Tan, S. Liu, N. Bliss, and L. L. Tieszen, “Current and potential sustainable corn stover feedstock for biofuel production in the United States,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 47, pp. 372–386, 2012, doi: 10.1016/j.biombioe.2012.09.022.
- [194] A. Sultana, A. Kumar, and D. Harfield, “Development of agri-pellet production cost and optimum size,” *Bioresour. Technol.*, vol. 101, no. 14, pp. 5609–5621, 2010, doi: 10.1016/j.biortech.2010.02.011.
- [195] M. Stumborg, L. Townley-Smith, and E. Coxworth, “Sustainability and economic issues for cereal crop residue export,” *Can. J. Plant Sci.*, vol. 76, no. 4, pp. 669–673, 1996, doi: 10.4141/cjps96-117.
- [196] R. L. Hoskinson, D. L. Karlen, S. J. Birrell, C. W. Radtke, and W. W. Wilhelm, “Engineering, nutrient removal, and feedstock conversion evaluations of four corn stover harvest scenarios,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 31, no. 2–3, pp. 126–136, 2007, doi: 10.1016/j.biombioe.2006.07.006.
- [197] M. D. Montross and C. L. Crofcheck, “Effect of stover fraction and storage method on glucose production during enzymatic hydrolysis,” *Bioresour. Technol.*, vol. 92, no. 3, pp. 269–274, 2004, doi: 10.1016/j.biortech.2003.09.007.
- [198] FAO, “Bioénergie et sécurité alimentaire évaluation rapide (BEFS RA) Manuel d’Utilisation,” 2014.
- [199] INGESAHEL, “Etude De Faisabilite D’Une Valorisation Des Residus Agricoles Et Agro-Industriels Comme Combustibles Domestiques Au Senegal,” no. 221, pp. 1–28, 1998.
- [200] T. Godjo, J.-P. Tagutchou, P. Naquin, and R. Gourdon, “Valorisation des coques d’anacarde par pyrolyse au Bénin,” *Déchets, Sci. Tech.*, no. N°70, pp. 11–18, 2015, doi: 10.4267/dechets-sciences-techniques.3282.
- [201] S. O. Jekayinfa and O. S. Omisakin, “The energy potentials of some agricultural wastes as local fuel materials in Nigeria,” *Agric. Eng. Int. CIGR Ejournal*, vol. 7, pp. 1–10, 2005.
- [202] “Résultats des résidus au Burkina Faso / Mangue - BIOSTAR, des bioénergies pour les PME d’Afrique de l’Ouest,” 3AD. <https://www.biostar-afrique.org/filieres-agroalimentaires/mangue/resultats-des-residus-au-burkina-faso> (accessed May 10,

- 2024).
- [203] P. Sissoko, “Le microdosage d’engrais : une technique d’amélioration des moyens d’existence des producteurs pauvres au Sahel. Cas des exploitations agricoles à base de mil et de sorgho au Mali,” *Thèse Dr. Univ. Liège-Gembloux Agro-bio Tech*, p. 269, 2019.
- [204] J. Ouedraogo, I. Serme, M. B. Pouya, S. B. Sanon, K. Ouattara, and F. Lompo, “Improvement of sorghum productivity through introducing integrated soil fertility management options in the Northern sudanian zone of Burkina Faso,” *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, vol. 14, no. 9, pp. 3262–3274, 2020, doi: 10.4314/ijbcs.v14i9.23.
- [205] Cluster Sécurité Alimentaire Burkina Faso, “Cartographie de l’insécurité alimentaire et nutritionnelle,” pp. 1–11, 2023, [Online]. Available: https://fscluster.org/sites/default/files/documents/fiche-de-communication-ch-mars-2023_24032023_0.pdf.
- [206] J. J. Wang, Y. Y. Jing, C. F. Zhang, and J. H. Zhao, “Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 9, pp. 2263–2278, 2009, doi: 10.1016/j.rser.2009.06.021.
- [207] S. D. Pohekar and M. Ramachandran, “Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning - A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 8, no. 4, pp. 365–381, 2004, doi: 10.1016/j.rser.2003.12.007.
- [208] J. A. Scott, W. Ho, and P. K. Dey, “A review of multi-criteria decision-making methods for bioenergy systems,” *Energy*, vol. 42, no. 1, pp. 146–156, 2012, doi: 10.1016/j.energy.2012.03.074.
- [209] M. Hoogwijk, A. Faaij, R. Van Den Broek, G. Berndes, D. Gielen, and W. Turkenburg, “Exploration of the ranges of the global potential of biomass for energy,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 25, no. 2, pp. 119–133, 2003, doi: 10.1016/S0961-9534(02)00191-5.
- [210] D. Marchal, F. van Stappen, and Y. Schenkel, “Critères et indicateurs de production «durable» des biocombustibles solides: État des lieux et recommandations,” *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, vol. 13, no. 1, pp. 165–176, 2009.
- [211] Energy Transition Task Force, “Criteria for sustainable biomass production,” 2006.
- [212] I. Ju, J. Van Dam, and M. Junginger, “Overview of recent developments in sustainable biomass certification,” vol. 32, pp. 749–780, 2008, doi: 10.1016/j.biombioe.2008.01.018.
- [213] H. Doukas, K. D. Patlitzianas, and J. Psarras, “Supporting sustainable electricity technologies in Greece using MCDM,” *Resour. Policy*, vol. 31, no. 2, pp. 129–136, 2006, doi: 10.1016/j.resourpol.2006.09.003.

- [214] K. Christa and W. Elisabeth, "Biomass Report.," *Biomass Rep.*, vol. 1, pp. 1–129, 2004, [Online]. Available: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=buh&AN=17510131&site=ehost-live>.
- [215] S. Saelee, B. Paweewan, R. Tongpool, T. Witoon, J. Takada, and K. Manusboonpurmpool, "Biomass Type Selection for Boilers Using TOPSIS Multi-Criteria Model," no. November, 2014, doi: 10.7763/IJESD.2014.V5.474.
- [216] F. Sitorus and P. R. Brito-Parada, "A multiple criteria decision making method to weight the sustainability criteria of renewable energy technologies under uncertainty," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 127, no. May, p. 109891, 2020, doi: 10.1016/j.rser.2020.109891.
- [217] G. Sakthivel, M. Ilangkumaran, and A. Gaikwad, "MECHANICAL ENGINEERING A hybrid multi-criteria decision modeling approach for the best biodiesel blend selection based on ANP-TOPSIS analysis," *AIN SHAMS Eng. J.*, 2014, doi: 10.1016/j.asej.2014.08.003.
- [218] D. Sharma, D. Claudio, and S. Sridhar, "Comparison of AHP-TOPSIS and AHP-AHP methods in multi-criteria decision-making problems Deepak Sharma *, Srinivasan Sridhar and," vol. 34, no. 2, pp. 203–223, 2020.
- [219] T. L. Saaty, "How to make a decision: the Analytic Hierarchy Process." 1989.
- [220] H. Wikström and R. Adolfsson, "Field Burning of Crop Residues," no. 62, 2004.
- [221] E. Cassou, "Agricultural Pollution Field Burning."
- [222] FAO, *Estimating Greenhouse Gas Emissions in Agriculture*. 2015.
- [223] IPCC, *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. 2006.
- [224] Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MELCC), *Guide de quantification des émissions de gaz à effet de serre*. 2019.
- [225] L. U. O. Yuxiang, W. Wei, W. A. N. Xiao, D. Zhou, and Z. H. U. Cuiping, "Estimation of methane and nitrous oxide emissions from biomass waste in China : A case study in Hebei Province," no. January, 2010, doi: 10.1007/s11431-009-0411-y.
- [226] D. Cardoen, P. Joshi, L. Diels, P. Sarma, and D. Pant, "Agriculture Biomass in India : Part 2 . Post-harvest losses , cost and environmental impacts ."
- [227] P. Laris *et al.*, "Methane gas emissions from savanna fires: what analysis of local burning regimes in a working West African landscape tell us," *Biogeosciences*, vol. 18, no. 23, pp. 6229–6244, 2021, doi: 10.5194/bg-18-6229-2021.
- [228] C. Xin, T. Zhang, S. Tsai, Y. Zhai, and J. Wang, "applied sciences An Empirical Study

- on Greenhouse Gas Emission Calculations Under Different Municipal Solid Waste Management Strategies,” 2020.
- [229] G.-H. Tzeng and J.-J. Hang, *Making, Multiple Attribute Decision*. CRC Press. Boca Raton, 2011.
- [230] C.-L. Hwang and K. Yoon, “Methods for Information on Attribute Given,” *Lect. Notes Econ. Math. Syst.*, pp. 58–191, 1981.
- [231] N. Munier, E. Hontoria, and F. Jiménez-Sáez, *Strategic Approach in Multi-Criteria Decision Making A Practical Guide for Complex Scenarios*. 2019.
- [232] A. Amini and A. Alinezhad, “Sensitivity Analysis of TOPSIS Technique: The Results of Change in the Weight of One Attribute on the Final Ranking of Alternatives,” *J. Optim. Ind. Eng.*, vol. 7, no. 2011, pp. 23–28, 2011.
- [233] P. Jusakulvijit, A. Bezama, and D. Thrän, “Criteria prioritization for the sustainable development of second-generation bioethanol in Thailand using the Delphi-AHP technique,” *Energy. Sustain. Soc.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–25, 2021, doi: 10.1186/s13705-021-00313-5.
- [234] L. Cutz, P. Haro, D. Santana, and F. Johnsson, “Assessment of biomass energy sources and technologies: The case of Central America,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 58, pp. 1411–1431, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.322.
- [235] M. Amer and T. U. Daim, “Selection of renewable energy technologies for a developing county: A case of Pakistan,” *Energy Sustain. Dev.*, vol. 15, no. 4, pp. 420–435, 2011, doi: 10.1016/j.esd.2011.09.001.
- [236] S. Kheybari, F. Mahdi Rezaie, and J. Rezaei, “Measuring the Importance of Decision-Making Criteria in Biofuel Production Technology Selection,” *IEEE Trans. Eng. Manag.*, vol. 68, no. 2, pp. 483–497, 2021, doi: 10.1109/TEM.2019.2908037.
- [237] S. Van Holsbeeck and S. K. Srivastava, “Feasibility of locating biomass-to-bioenergy conversion facilities using spatial information technologies: A case study on forest biomass in Queensland, Australia,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 139, no. May, p. 105620, 2020, doi: 10.1016/j.biombioe.2020.105620.
- [238] D. Alfonso, C. Perpiñá, A. Pérez-Navarro, E. Peñalvo, C. Vargas, and R. Cárdenas, “Methodology for optimization of distributed biomass resources evaluation, management and final energy use,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 33, no. 8, pp. 1070–1079, 2009, doi: 10.1016/j.biombioe.2009.04.002.
- [239] S. Firouzi, M. S. Allahyari, M. Isazadeh, A. Nikkhah, and S. Van Haute, “Hybrid multi-criteria decision-making approach to select appropriate biomass resources for biofuel

- production,” *Sci. Total Environ.*, vol. 770, p. 144449, 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144449.
- [240] R. N. Ossei-Bremang and F. Kemausuor, “A decision support system for the selection of sustainable biomass resources for bioenergy production,” *Environ. Syst. Decis.*, vol. 41, no. 3, pp. 437–454, 2021, doi: 10.1007/s10669-021-09810-6.
- [241] R. E. H. Sims, “Bioenergy to mitigate for climate change and meet the needs of society, the economy and the environment,” *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Chang.*, vol. 8, no. 4, pp. 349–370, 2003, doi: 10.1023/B:MITI.0000005614.51405.ce.
- [242] C. Cambero and T. Sowlati, “Incorporating social benefits in multi-objective optimization of forest-based bioenergy and biofuel supply chains,” *Appl. Energy*, vol. 178, pp. 721–735, 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.06.079.
- [243] L. Čuček, J. J. Klemeš, P. S. Varbanov, and Z. Kravanja, “Reducing the dimensionality of criteria in multi-objective optimisation of biomass energy supply chains,” *Chem. Eng. Trans.*, vol. 29, pp. 1231–1236, 2012, doi: 10.3303/CET1229206.
- [244] B. Mota, A. Carvalho, M. I. Gomes, and A. P. Barbosa-Povoa, *Design and Planning of Sustainable Supply Chains*, vol. 36, no. 2014. Elsevier, 2015.
- [245] Z. Chen and S. Andresen, “A multiobjective optimization model of production-sourcing for sustainable supply chain with consideration of social, environmental, and economic factors,” *Math. Probl. Eng.*, vol. 2014, 2014, doi: 10.1155/2014/616107.
- [246] J. E. Santibañez-aguilar, J. B. González-campos, J. M. Ponce-ortega, M. Serna-gonzález, and M. M. El-halwagi, “Planification et sélection de site optimales pour le biore distribué multiproduit fi neries impliquant des objectifs économiques , environnementaux et sociaux,” vol. 65, pp. 270–294, 2014, doi: 10.1016/j.jclepro.2013.08.004.
- [247] H. Thunman, C. Gustavsson, A. Larsson, I. Gunnarsson, and F. Tengberg, “Economic assessment of advanced biofuel production via gasification using cost data from the GoBiGas plant,” *Energy Sci. Eng.*, vol. 7, no. 1, pp. 217–229, 2019, doi: 10.1002/ese3.271.
- [248] P. Pradhan, P. Gadkari, S. M. Mahajani, and A. Arora, “A conceptual framework and techno-economic analysis of a pelletization-gasification based bioenergy system,” *Appl. Energy*, vol. 249, no. March, pp. 1–13, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.04.129.
- [249] D. Varshney, P. Mandade, and Y. Shastri, “Multi-objective optimization of sugarcane bagasse utilization in an Indian sugar mill,” *Sustain. Prod. Consum.*, vol. 18, pp. 96–114, 2019, doi: 10.1016/j.spc.2018.11.009.
- [250] Y. Huang *et al.*, “A feasibility analysis of distributed power plants from agricultural

- residues resources gasification in rural China,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 121, no. October 2018, pp. 1–12, 2019, doi: 10.1016/j.biombioe.2018.12.007.
- [251] T. M. Sooriyaarachchi, I. T. Tsai, S. El Khatib, A. M. Farid, and T. Mezher, “Job creation potentials and skill requirements in, PV, CSP, wind, water-to-energy and energy efficiency value chains,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 52, pp. 653–668, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.07.143.
- [252] E. Llera Sastresa, A. A. Usón, I. Z. Bribián, and S. Scarpellini, “Local impact of renewables on employment: Assessment methodology and case study,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 2, pp. 679–690, 2010, doi: 10.1016/j.rser.2009.10.017.
- [253] M. Ortega, P. del Río, P. Ruiz, and C. Thiel, “Employment effects of renewable electricity deployment. A novel methodology,” *Energy*, vol. 91, pp. 940–951, 2015, doi: 10.1016/j.energy.2015.08.061.
- [254] J. J. Cartelle Barros, M. Lara Coira, M. P. de la Cruz López, and A. del Caño Gochi, “Comparative analysis of direct employment generated by renewable and non-renewable power plants,” *Energy*, vol. 139, pp. 542–554, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.08.025.
- [255] E. Llera, S. Scarpellini, A. Aranda, and I. Zabalza, “Forecasting job creation from renewable energy deployment through a value-chain approach,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 21, pp. 262–271, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2012.12.053.
- [256] B. S. How, K. Y. Tan, and H. L. Lam, “Transportation decision tool for optimisation of integrated biomass flow with vehicle capacity constraints,” *J. Clean. Prod.*, vol. 136, pp. 197–223, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.05.142.
- [257] S. Wang, X. Huang, C. Yin, and A. Richel, “A critical review on the key issues and optimization of agricultural residue transportation,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 146, no. July 2020, p. 105979, 2021, doi: 10.1016/j.biombioe.2021.105979.
- [258] C. Pike-Burke, “Multi-objective Optimization,” *Stud. Comput. Intell.*, vol. 938, pp. 7–16, 2021, doi: 10.1007/978-3-030-63773-6_2.
- [259] B. Steinberg and G. Yin, *Fran Sérgio Lobato Multi-Objective Optimization Problems Concepts and Self- Adaptive Parameters with Mathematical and Engineering Applications*. .
- [260] R. T. Marler and J. S. Arora, “The weighted sum method for multi-objective optimization: New insights,” *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 41, no. 6, pp. 853–862, 2010, doi: 10.1007/s00158-009-0460-7.
- [261] I. P. Stanimirović, M. L. Zlatanović, and M. D. Petković, “On the linear weighted sum method for multi-objective optimization,” *Sci. J. Facta Univ.*, vol. 26, pp. 49–63, 2011.

- [262] H. Mausser, “Normalization and Other Topics in Multi-Objective Optimization.pdf,” *Proc. fields-MITACS Ind. Probl. Work.*, vol. 2, pp. 89–101, 2006, [Online]. Available: <http://www.maths-in-industry.org/miis/233/1/fmipw1-6.pdf>.
- [263] Organisation internationale du Travail, *Les principes et droits fondamentaux au travail dans les sociétés coopératives de producteurs de coton au Burkina Faso: une évaluation des besoins*. 2022.
- [264] Office Nationale de l’Eau et de l’Assainissement, “Tarifs-ONEA_2021,” p. 90, 2022.
- [265] Société Nationale d’Electricité du Burkina (SONABEL), “Rapport d’activités 2022,” no. 30 Mar 2013, 2022, [Online]. Available: <http://www.sonabel.bf>.
- [266] K. K. Sakariya, P. N. Sarsavadia, P. M. Chauhan, S. V. Kelaiya, and M. L. Ramani, “Physicochemical properties and proximate analysis of cotton stalks biomass,” vol. 7, no. 6, pp. 1375–1378, 2019.
- [267] M. A. Brand, R. C. Jacinto, R. Antunes, and A. B. da Cunha, “Production of briquettes as a tool to optimize the use of waste from rice cultivation and industrial processing,” *Renew. Energy*, vol. 111, pp. 116–123, 2017, doi: 10.1016/j.renene.2017.03.084.
- [268] A. Chapuis, “Sustainable design of oilseed-based biofuel supply chains : the case of Jatropha in Burkina Faso To cite this version :,” 2015.
- [269] “Professionnel et efficace machine à presser l’huile de coque de cajou - Alibaba.com.” <https://french.alibaba.com/g/cashew-shell-oil-press-machine.html> (accessed Nov. 16, 2024).
- [270] O. SANOGO, K. HARO, R. C. M. COMPAORE, and K. P. Reine Pélagie KOURAOGO, “Evolution du Facteur d’émission électrique des réseaux électriques des pays de l’Afrique Subsaharienne : cas du Burkina Faso,” *Sci. Tech.*, vol. 40, no. I, pp. 1–9, 2021.
- [271] N. Narendra, V. Ramakrishnan, A. Thomas, U. Arvind Lambodhar, and K. Suhas, “Characterization and feasibility of biogas yield using mango fruit peels and durva grass,” *Mater. Today Proc.*, vol. 47, no. xxxx, pp. 4624–4629, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.05.479.
- [272] T. Tesfaye, “Valorisation of Mango Fruit By-products: Physicochemical Characterisation and Future Prospect Crystalline nanocellulose View project Valorization of corncobs View project Valorisation of Mango Fruit By-products: Physicochemical Characterisation and Future,” vol. 50, no. Figure 2, pp. 22–34, 2017, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/317278903>.
- [273] T. T. Manhongo, A. Chimphango, P. Thornley, and M. Röder, “Techno-economic and environmental evaluation of integrated mango waste biorefineries.,” *J. Clean. Prod.*, vol.

- 325, p. 129335, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129335.
- [274] B. A. Mogess, “FRUIT PEELS AND COW DUNG UNDER ANAEROBIC,” no. August, 2019.
- [275] M. M. Abdel Daiem and N. Said, “Energetic, economic, and environmental perspectives of power generation from residual biomass in Saudi Arabia,” *Alexandria Eng. J.*, vol. 61, no. 5, pp. 3351–3364, 2022, doi: 10.1016/j.aej.2021.08.049.
- [276] J. Rutovitz, E. Dominish, and J. Downes, “Calculating global energy sector jobs 2015 methodology update 2015,” 2015.
- [277] M. Ram, E. Development, and A. Aghahosseini, “Job creation during the global energy transition towards 100 % renewable power system by 2050,” no. July, 2019, doi: 10.1016/j.techfore.2019.06.008.
- [278] Y. Huang *et al.*, “A feasibility analysis of distributed power plants from agricultural residues resources gasification in rural China,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 121, no. December 2018, pp. 1–12, 2019, doi: 10.1016/j.biombioe.2018.12.007.
- [279] S. Supraja, A. A. Hierarchy, and P. Ahp, “A Comparative Study by AHP and TOPSIS for the Selection of All Round Excellence Award,” pp. 314–319, 2016.
- [280] I. Emovon and O. S. Oghenenyrovwho, “Application of MCDM method in material selection for optimal design: A review,” *Results Mater.*, vol. 7, no. June, p. 100115, 2020, doi: 10.1016/j.rinma.2020.100115.
- [281] H. K. Jeswani, A. Whiting, and A. Azapagic, “Environmental and Economic Sustainability of Biomass Heat in the UK,” *Energy Technol.*, vol. 8, no. 11, 2020, doi: 10.1002/ente.201901044.

Annexes

Annexe 1 : Questionnaire adressé aux parties prenantes pour l'évaluation des critères pour la sélection des résidus à des fins énergétiques au Burkina Faso

Le but de ce questionnaire est de classer par ordre d'importance relative et d'attribuer un poids aux dimensions et critères pouvant influencer le choix d'un résidu agricole (résidus de cultures et résidus agro-industriels) pour la production de bioénergie au Burkina Faso. Une sélection des dimensions et leurs critères associés a déjà été préalablement effectuée grâce à une revue de littérature scientifique ainsi qu'une adaptation au contexte du Burkina Faso.

Le tableau suivant nous donne les critères retenus ainsi qu'une petite description de ces critères

Critères	Description
Disponibilité et accessibilité de la biomasse	La biomasse sélectionnée doit être disponible en volume suffisant, sur des sites de production accessibles avec des possibilités d'augmentation de volume de production dans un futur proche
Utilisation concurrente	La biomasse sélectionnée pour la production de l'énergie ne peut menacer ni l'approvisionnement en nourriture, ni les autres utilisations locales (approvisionnement énergétique, médicaments, matériaux de construction)
Potentiel de pollution	La valorisation de la biomasse sélectionnée doit contribuer à la réduction des incidences négatives de l'accumulation de cette biomasse sur l'eau, le sol, l'air et la biodiversité.
Impact économique	L'utilisation de la biomasse sélectionnée doit contribuer à réduire les pertes et manques à gagner et favoriser le développement de l'économie locale
Contenu énergétique de la biomasse	La quantité d'énergie récupérée lors la valorisation de la biomasse sélectionnée doit être intéressante
Disponibilité des technologies appropriées	La biomasse pour laquelle il existe des technologies de valorisation matures est préférée

Le but du questionnaire est donc de voir quels sont les dimensions et les critères les plus importants lorsqu'on parle de la sélection de biomasse pour une valorisation énergétique au Burkina.

Pour cela l'échelle de comparaison suivante sont définies :

Langage	Abréviation	Valeur correspondante
Egaux	E	1
Modérément important	W	3
Plus important	FS	5
Vraiment plus important	VS	7
Absolument plus important	AS	9

Valeur intermédiaires	-	2, 4, 6, 8
Faiblement plus important		2
Entre modéré et plus important		4
Entre plus important et vraiment plus important		6
Entre vraiment et absolument plus important		8

Exemple : Pour la section de réponse au questionnaire, cet exemple peut aider à comprendre aux questions posées.

Question : Comment compareriez-vous le critère « Utilisation concurrente » par rapport au critère « Potentiel de pollution » ?

Egale importance Modérément plus important Absolument plus important
 Plus important Vraiment plus important Absolument moins important
 Moins important Vraiment moins important Modérément moins important

A cette question, on veut savoir entre les deux critères comparés, lequel est le plus important et à quel degré. Si par exemple, le répondant pense que lors de la sélection d'une biomasse pour une valorisation en énergie que le critère **Utilisation concurrente** (c'est-à-dire le fait que l'utilisation de la biomasse sélectionnée ne doit pas menacer ni l'approvisionnement en nourriture, ni les utilisations locales de la biomasse) est Absolument plus importante que le critère **Potentiel de pollution** (c'est-à-dire le fait que la valorisation va contribuer à réduire les impacts négatifs de la non valorisation de cette biomasse sur l'eau, le sol, l'air et la biodiversité);

Dans ces conditions, le répondant cochera la case **Absolument plus importante** comme suit :

Egale importance Modérément plus important Absolument plus important
 Plus important Vraiment plus important Absolument moins important
 Moins important Vraiment moins important Modérément moins important

Mais si au contraire le répondant pense que le critère Potentiel de pollution est Absolument plus importante que le critère Utilisation concurrente, alors le répondant cochera la case **Absolument moins importante**. Cela signifie tout simplement que le critère Utilisation concurrente est Absolument moins importante que le critère Potentiel de pollution.

Les sessions suivantes sont destinées aux questions.

Comparaisons des critères.

1. Comment compariez-vous le critère « Disponibilité et accessibilité de la biomasse » par rapport au critère « Utilisation concurrente »

Egale importance Modérément plus important Absolument plus important
Plus important Vraiment plus important Absolument moins important
Moins important Vraiment moins important Modérément moins important

2. Comment compariez-vous le critère « Disponibilité et accessibilité de la biomasse » par rapport au critère « Potentiel de pollution »

Egale importance Modérément plus important Absolument plus important
Plus important Vraiment plus important Absolument moins important
Moins important Vraiment moins important Modérément moins important

3. Comment compariez-vous le critère « Disponibilité et accessibilité de la biomasse » par rapport au critère « Impact économique »

Egale importance Modérément plus important Absolument plus important
Plus important Vraiment plus important Absolument moins important
Moins important Vraiment moins important Modérément moins important

4. Comment compariez-vous le critère « Disponibilité et accessibilité de la biomasse » par rapport au critère « Contenu énergétique de la biomasse »

Egale importance Modérément plus important Absolument plus important
Plus important Vraiment plus important Absolument moins important
Moins important Vraiment moins important Modérément moins important

5. Comment compariez-vous le critère « Disponibilité et accessibilité de la biomasse » par rapport au critère « Disponibilité des technologies appropriées »

Egale importance Modérément plus important Absolument plus important

Plus important Vraiment plus important Absolument moins important
Moins important Vraiment moins important Modérément moins important

6. Comment compariez-vous le critère « Utilisation concurrente » par rapport au critère « Potentiel de pollution »

Egale importance Modérément plus important Absolument plus important
Plus important Vraiment plus important Absolument moins important
Moins important Vraiment moins important Modérément moins important

7. Comment compariez-vous le critère « Utilisation concurrente » par rapport au critère « Impact économique »

Egale importance Modérément plus important Absolument plus important
Plus important Vraiment plus important Absolument moins important
Moins important Vraiment moins important Modérément moins important

8. Comment compariez-vous le critère « Utilisation concurrente » par rapport au critère « Contenu énergétique de la biomasse »

Egale importance Modérément plus important Absolument plus important
Plus important Vraiment plus important Absolument moins important
Moins important Vraiment moins important Modérément moins important

9. Comment compariez-vous le critère « Utilisation concurrente » par rapport au critère « Disponibilité des technologies appropriées »

Egale importance Modérément plus important Absolument plus important
Plus important Vraiment plus important Absolument moins important
Moins important Vraiment moins important Modérément moins important

10. Comment compariez-vous le critère « Potentiel de pollution » par rapport au critère « Impact économique »

Egale importance Modérément plus important Absolument plus important

Plus important Vraiment plus important Absolument moins important
Moins important Vraiment moins important Modérément moins important

11. Comment comparez-vous le critère « Potentiel de pollution » par rapport au critère « Contenu énergétique de la biomasse »

Egale importance Modérément plus important Absolument plus important
Plus important Vraiment plus important Absolument moins important
Moins important Vraiment moins important Modérément moins important

12. Comment comparez-vous le critère « Potentiel de pollution » par rapport au critère « Disponibilité des technologies appropriées »

Egale importance Modérément plus important Absolument plus important
Plus important Vraiment plus important Absolument moins important
Moins important Vraiment moins important Modérément moins important

13. Comment comparez-vous le critère « Impact économique » par rapport au critère « Contenu énergétique de la biomasse »

Egale importance Modérément plus important Absolument plus important
Plus important Vraiment plus important Absolument moins important
Moins important Vraiment moins important Modérément moins important

14. Comment comparez-vous le critère « Impact économique » par rapport au critère « Disponibilité des technologies appropriées »

Egale importance Modérément plus important Absolument plus important
Plus important Vraiment plus important Absolument moins important
Moins important Vraiment moins important Modérément moins important

15. Comment comparez-vous le critère « Contenu énergétique de la biomasse » par rapport au critère « Disponibilité des technologies appropriées »

Egale importance Modérément plus important Absolument plus important

Plus important Vraiment plus important Absolument moins important
Moins important Vraiment moins important Modérément moins important

Annexe 2 : technologies de prétraitement

Broyeur thermique



Capacité de 200 kg/heure à 4 tonnes/heure
Type de moteur : Diesel

Broyeur électrique



Capacité : 200 kg/heure à 4 tonnes/heure
Puissance : 11 kW à 22kW

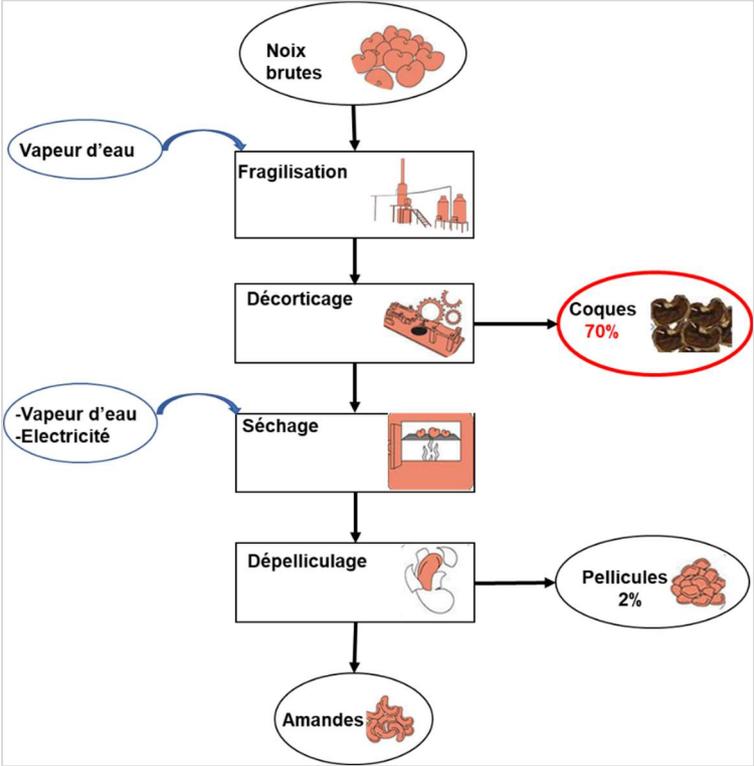
Presse de coques d'anacarde



Capacité : 0,2 tonne/heure à 5 tonne/heure
Moteur électrique
Consommation électrique 50 kWh/tonne

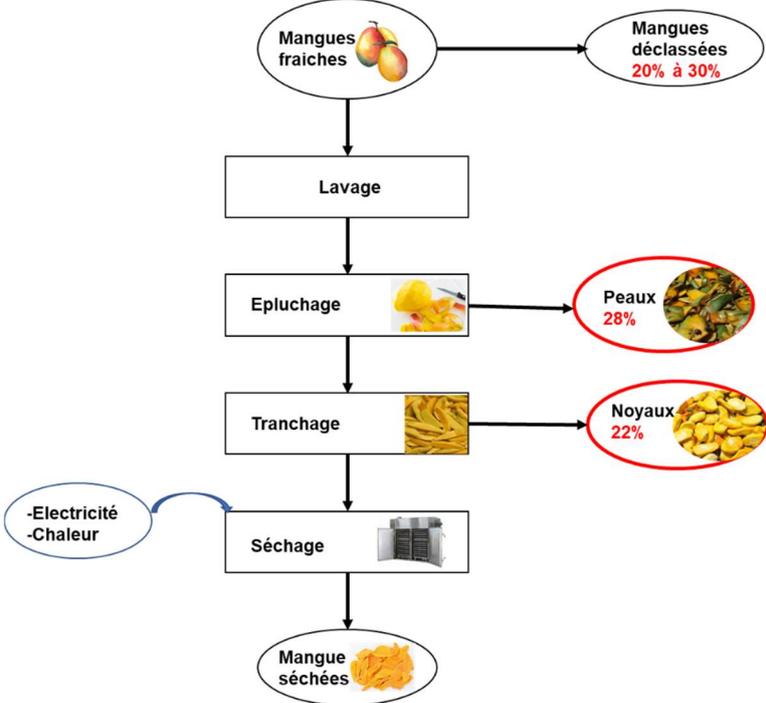
Annexe 3 : Processus de production des biomasses dans les unités agroindustrielles

Processus de transformation des noix de cajou



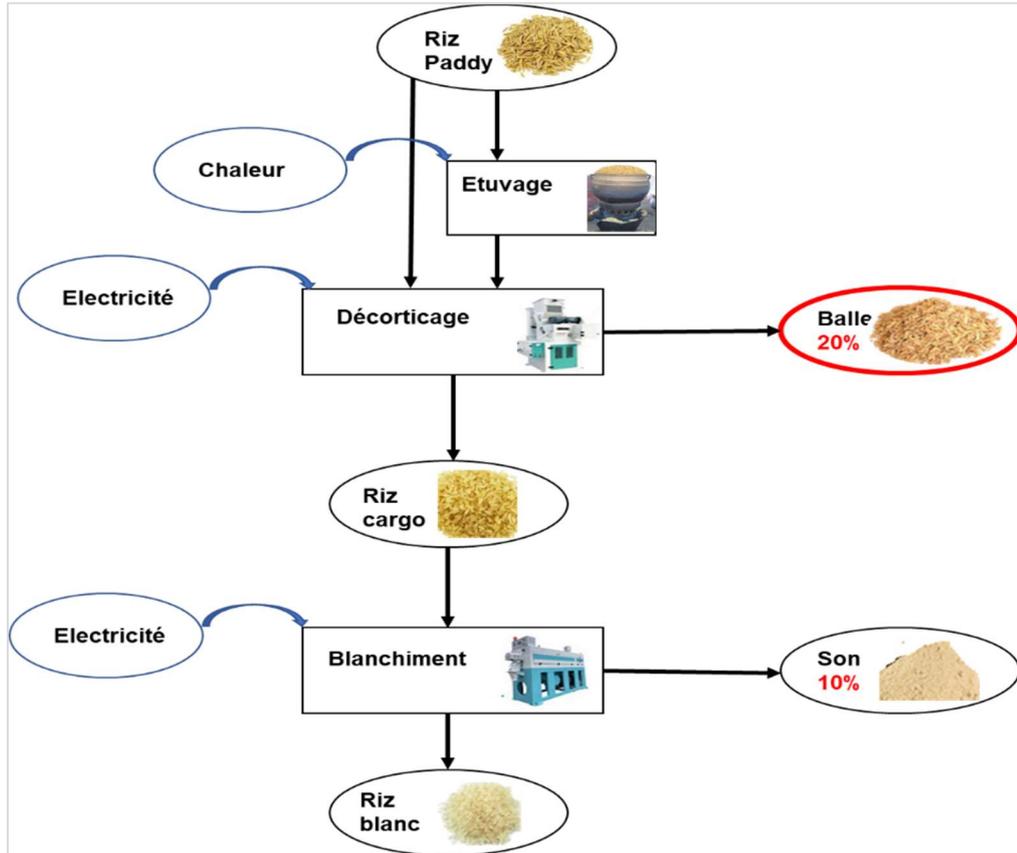
Etapas de la transformation des noix de cajou

Processus de transformation (séchage de la mangue)



Etapas de la transformation de la mangues fraîches en mangues séchées

✚ **Processus de transformation du riz paddy**



Etapes de la transformation du riz paddy

Annexe 4 : Distances entre les différents sites

1. Distances entre les sites de biomasses (S) et les sites de prétraitement (J)

	J1	J2	J3	J4	J5		J1	J2	J3	J4	J5
S1	33	60	112	25	31	S43	69	23	161	68	67
S2	33	59	113	25	32	S44	85	26	177	85	83
S3	34	60	112	26	32	S45	54	22	147	55	53
S4	2	66	98	12	1	S46	34	102	62	32	35
S5	15	80	87	24	17	S47	35	54	118	28	33
S6	14	79	88	23	16	S48	78	144	26	76	77
S7	16	81	85	23	17	S49	34	47	122	30	33
S8	33	55	116	26	31	S50	73	10	168	75	72
S9	34	56	116	27	32	S51	31	98	65	28	32
S10	14	82	84	21	16	S52	84	148	52	88	86
S11	33	56	115	26	31	S53	57	12	152	60	56
S12	15	80	87	23	16	S54	74	141	33	74	75
S13	14	81	83	18	15	S55	88	25	181	89	86
S14	15	81	86	23	17	S56	46	114	51	45	47
S15	9	70	94	4	8	S57	15	55	109	17	13
S16	1	68	96	13	2	S58	40	29	135	42	39
S17	2	66	98	14	3	S59	115	180	54	118	116
S18	58	40	144	54	56	S60	81	148	34	82	82
S19	5	71	92	9	5	S61	67	17	160	67	66
S20	15	72	92	2	14	S62	82	41	169	79	80
S21	27	73	96	15	26	S63	94	31	187	95	93
S22	28	72	97	16	26	S64	17	84	82	24	19
S23	95	160	46	97	96	S65	56	14	151	59	55
S24	29	47	119	27	28	S66	24	45	118	26	23
S25	45	26	139	46	44	S67	122	187	51	123	123
S26	97	164	38	99	99	S68	33	73	100	22	32
S27	21	83	87	31	23	S69	78	145	38	80	80
S28	47	112	54	40	47	S70	110	177	41	111	111
S29	82	150	14	79	83	S71	71	136	51	74	72
S30	50	114	62	54	51	S72	37	100	74	43	38
S31	40	28	135	43	39	S73	94	29	189	96	93
S32	16	76	88	5	15	S74	22	90	75	24	23
S33	16	53	111	19	15	S75	46	39	135	43	45
S34	62	10	157	64	61	S76	33	39	126	34	32
S35	92	160	26	92	94	S77	116	181	54	118	117
S36	55	120	55	58	56	S78	65	23	157	64	64
S37	34	55	116	27	32	S79	11	58	105	14	10
S38	20	83	85	29	22	S80	118	184	51	120	119
S39	101	166	48	104	103	S81	29	39	125	33	28
S40	31	38	126	34	30	S82	13	61	106	25	13
S41	69	136	33	68	70	S83	14	57	109	24	14
S42	17	81	83	10	17	S84	52	23	145	55	51

S85	40	104	69	46	42		S103	49	116	48	45	50
S86	85	33	176	84	84		S104	94	54	177	90	92
S87	119	187	34	119	120		S105	76	16	170	77	75
S88	43	111	53	42	44		S106	67	28	157	66	66
S89	39	105	62	41	40		S107	72	38	159	69	71
S90	25	91	73	20	25		S108	84	151	31	85	85
S91	53	118	58	57	55		S109	26	94	70	26	27
S92	68	28	158	66	66		S110	31	92	81	39	33
S93	54	54	132	47	52		S111	124	191	48	125	125
S94	81	149	24	80	82		S112	59	14	153	61	58
S95	57	49	138	51	56		S113	57	11	153	60	56
S96	51	22	145	52	50		S114	92	27	187	94	91
S97	50	116	57	54	52		S115	47	113	50	42	47
S98	78	39	165	75	77		S116	53	15	149	57	52
S99	8	68	98	21	10		S117	35	66	108	25	33
S100	61	126	53	64	62		S118	39	42	128	36	37
S101	64	39	150	60	62		S119	62	33	150	59	60
S102	61	128	45	63	62		S120	9	63	100	9	7

2. Distances entre les sites de prétraitement et le site de conversion

(J)	(K)
J1	2
J2	69
J3	95
J4	11
J5	2

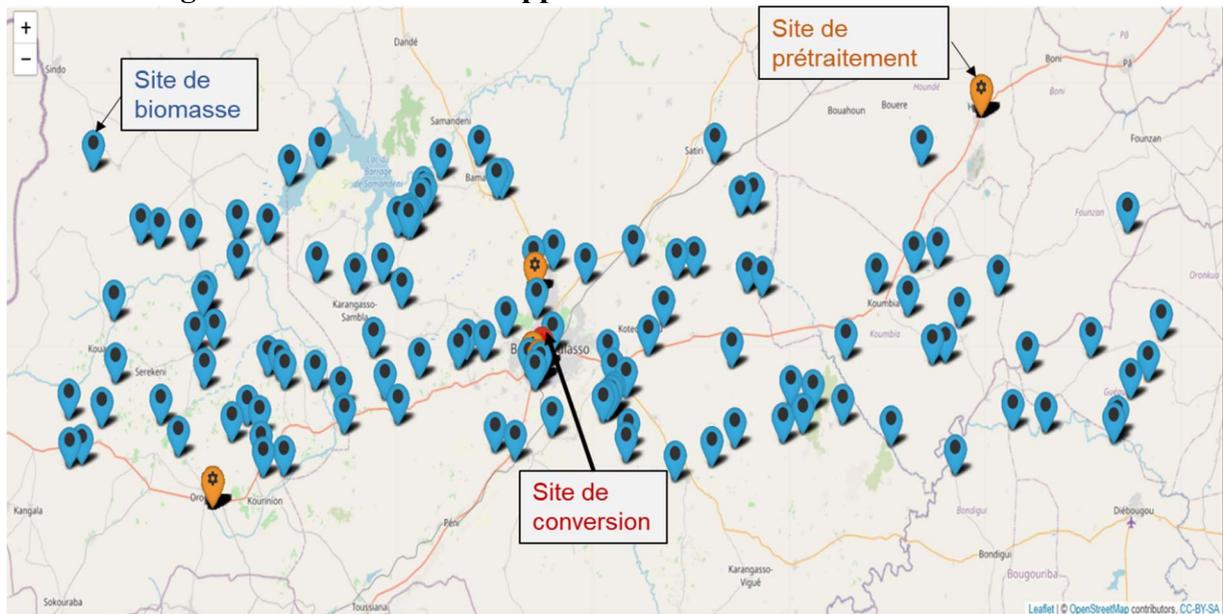
3. Distances entre les sites de biomasse (S) et le site de conversion (K)

S3	32		S16	2		S31	40		S46	33		S61	67
S2	33		S17	4		S32	14		S47	34		S62	82
S3	33		S18	58		S33	17		S48	76		S63	95
S4	3		S19	3		S34	63		S49	34		S64	17
S5	15		S20	13		S35	92		S50	74		S65	57
S6	15		S21	26		S36	54		S51	30		S66	24
S7	16		S22	26		S37	33		S52	84		S67	121
S8	32		S23	94		S38	21		S53	58		S68	32
S9	33		S24	29		S39	101		S54	73		S69	78
S10	145		S25	45		S40	32		S55	88		S70	110
S11	32		S26	97		S41	68		S56	45		S71	71
S12	15		S27	22		S42	15		S57	15		S72	37
S13	13		S28	45		S43	69		S58	41		S73	95
S14	16		S29	81		S44	85		S59	115		S74	21
S15	7		S30	49		S45	55		S60	80		S75	46
S76	34		S85	40		S94	80		S103	48		S112	59

S77	115		S86	86		S95	57		S104	94		S113	58
S78	65		S87	119		S96	51		S105	76		S114	93
S79	11		S88	42		S97	50		S106	68		S115	45
S80	118		S89	38		S98	78		S107	72		S116	54
S81	38		S90	23		S99	10		S108	83		S117	34
S82	15		S91	53		S100	61		S109	25		S118	39
S83	15		S92	68		S101	64		S110	31		S119	62
S84	52		S93	53		S102	61		S111	124		S120	8

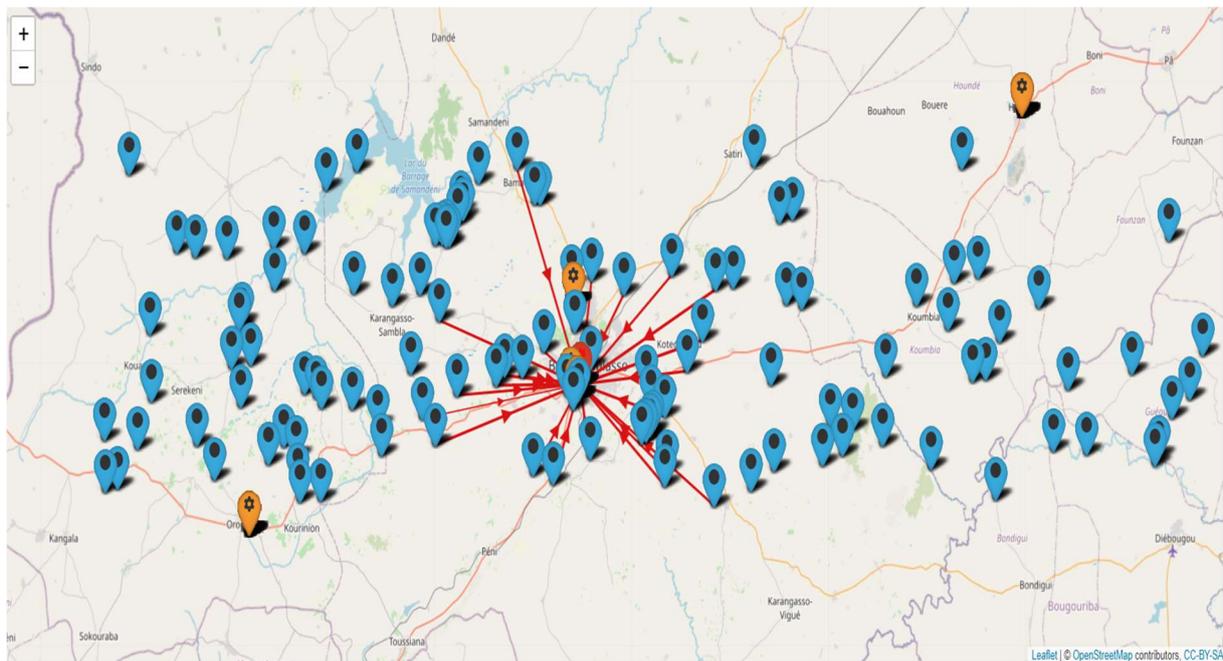
Annexe 5 : Les différentes chaînes d'approvisionnement

1. Configuration de la chaîne d'approvisionnement examinée



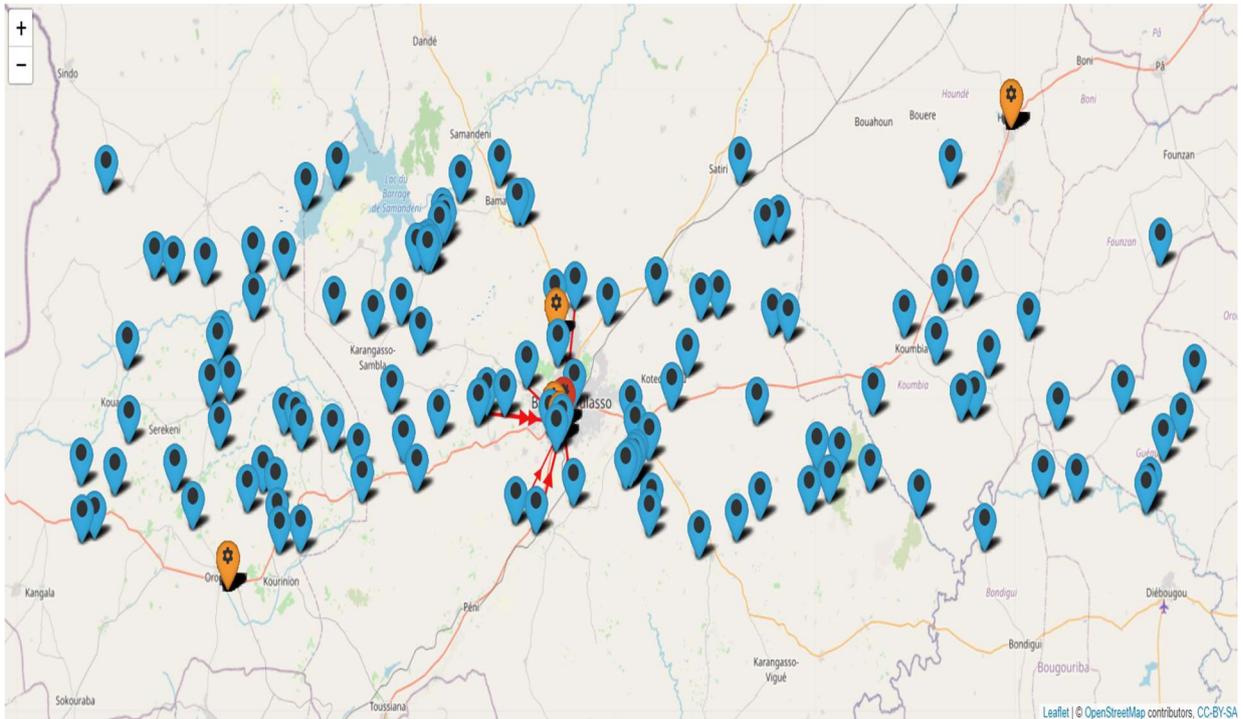
2. Configuration des chaînes d'approvisionnement optimales pour la filière des Tiges de cotonnier

a- Pour la production électrique



Chaîne d'approvisionnement optimale pour la production d'électricité

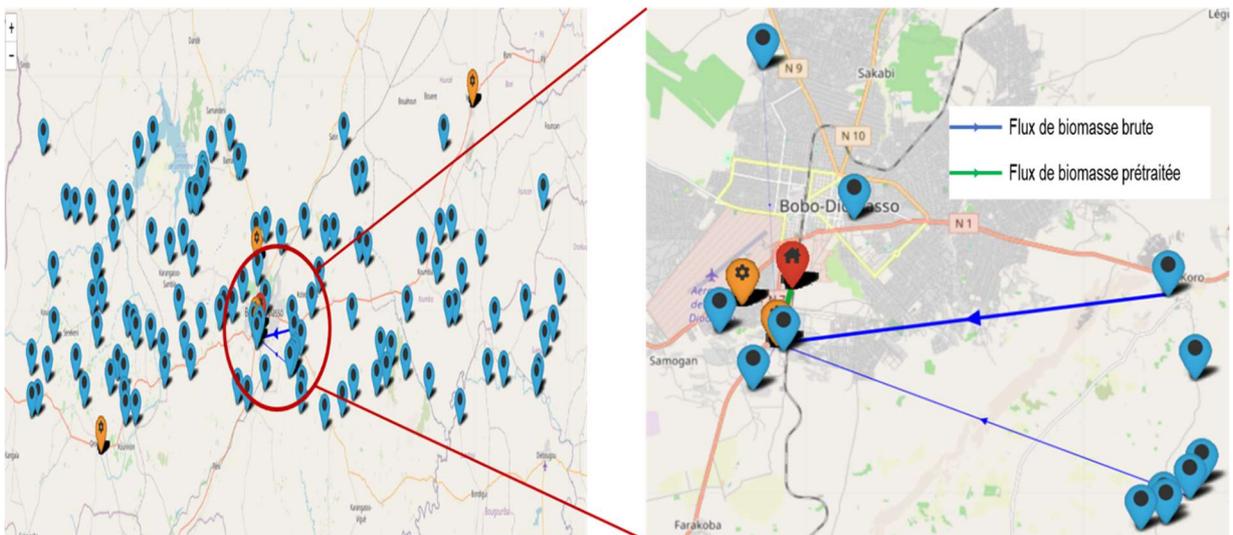
b- Pour la production de la chaleur



Chaîne d'approvisionnement optimale pour la production de la chaleur

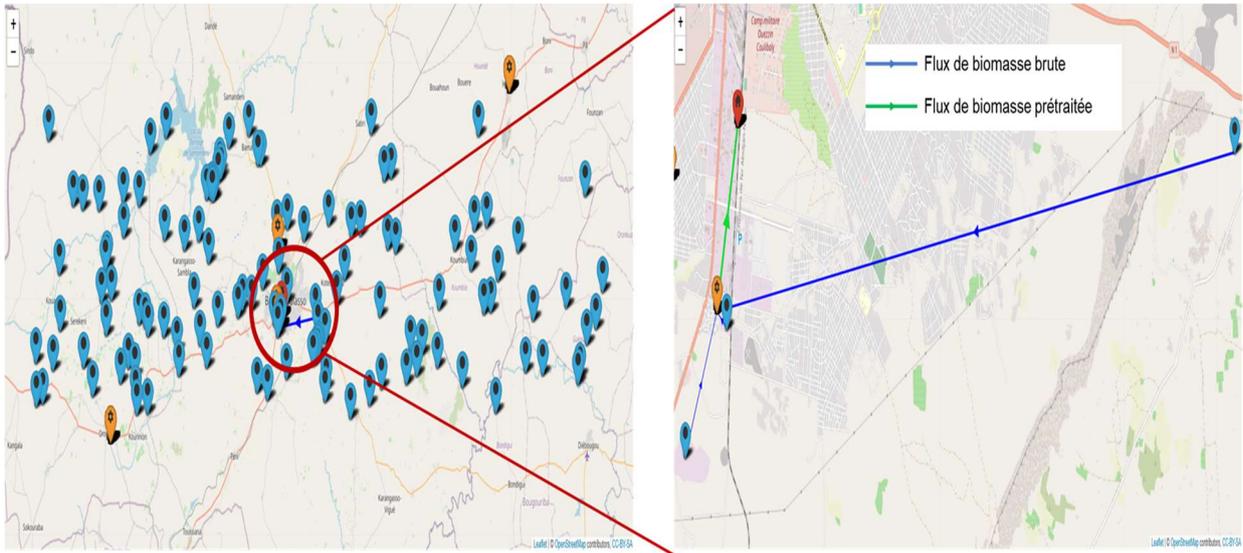
3. Configuration des chaînes d'approvisionnement optimales pour la filière des coques d'anacarde (CA)

a- Pour la production électrique



Chaîne d'approvisionnement optimale pour la production d'électricité

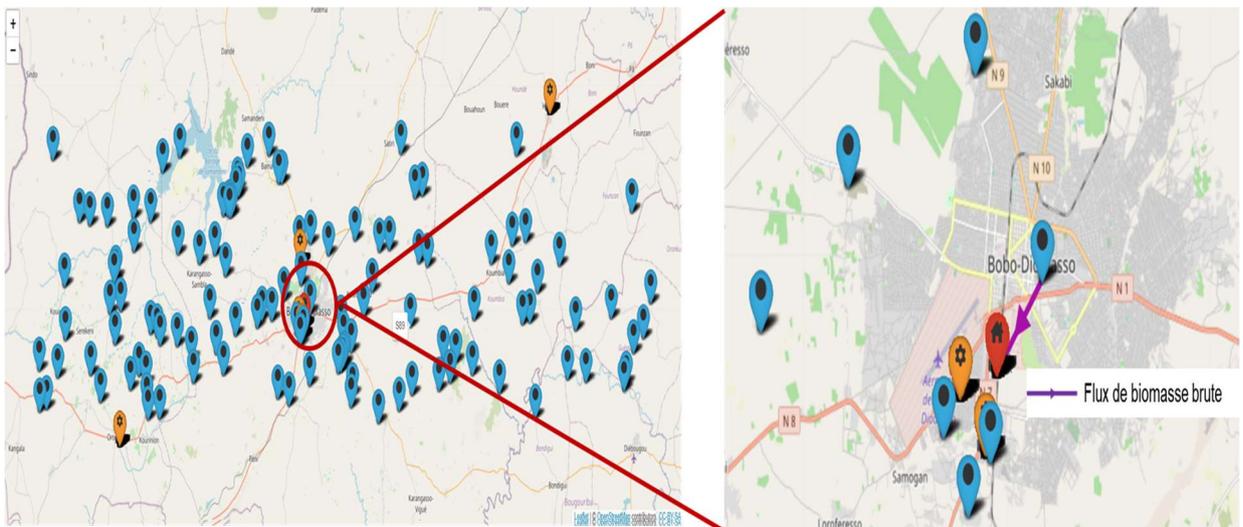
b- Pour la production de la chaleur



Chaine d'approvisionnement optimale pour la production de la chaleur

4. Configuration des chaines d'approvisionnement optimales pour la filière de la balle de riz (BR)

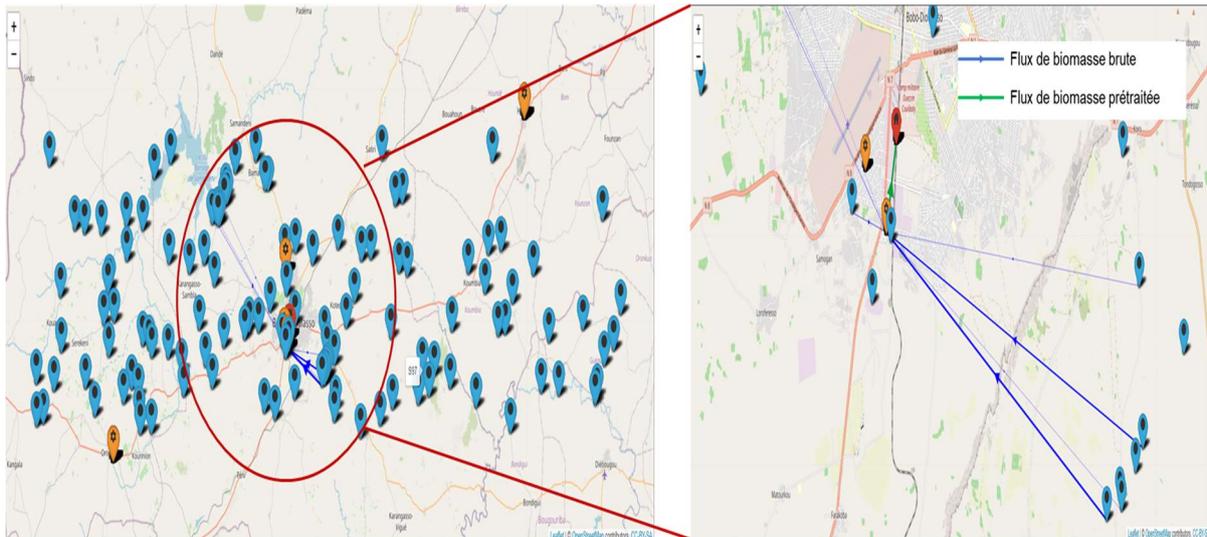
- Pour la production de l'électricité et de la chaleur



Chaine d'approvisionnement optimale pour la production d'électricité et de la chaleur

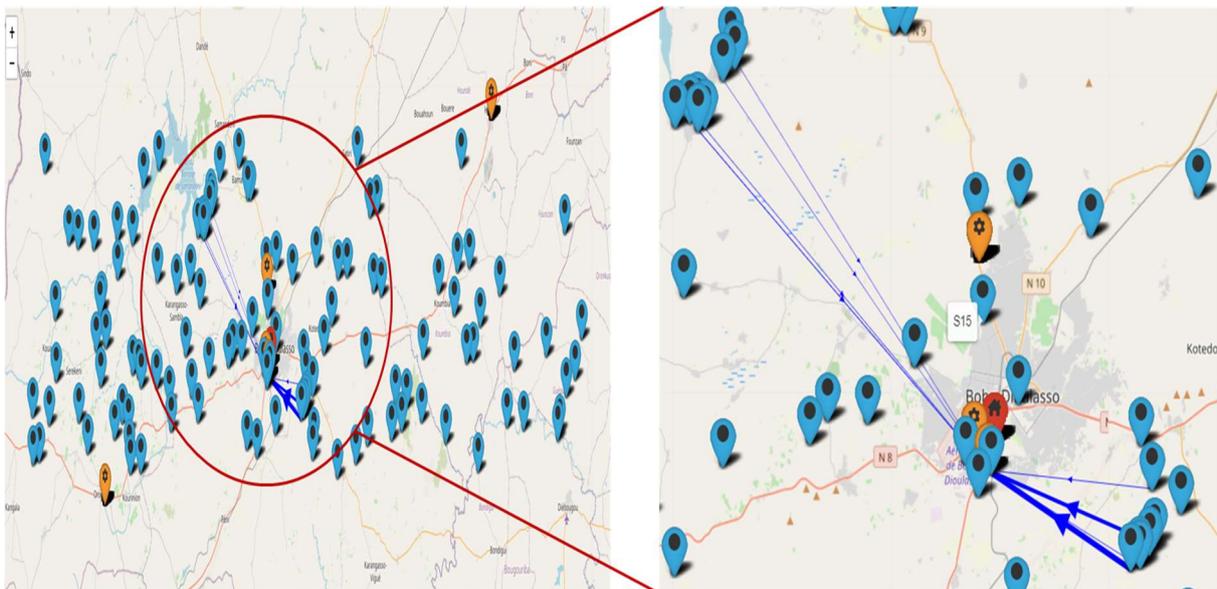
5- Configuration des chaînes d'approvisionnement optimales pour la filière des noyaux de mangue (NM)

a- Pour la production de l'électricité



Chaîne d'approvisionnement optimale pour la production d'électricité

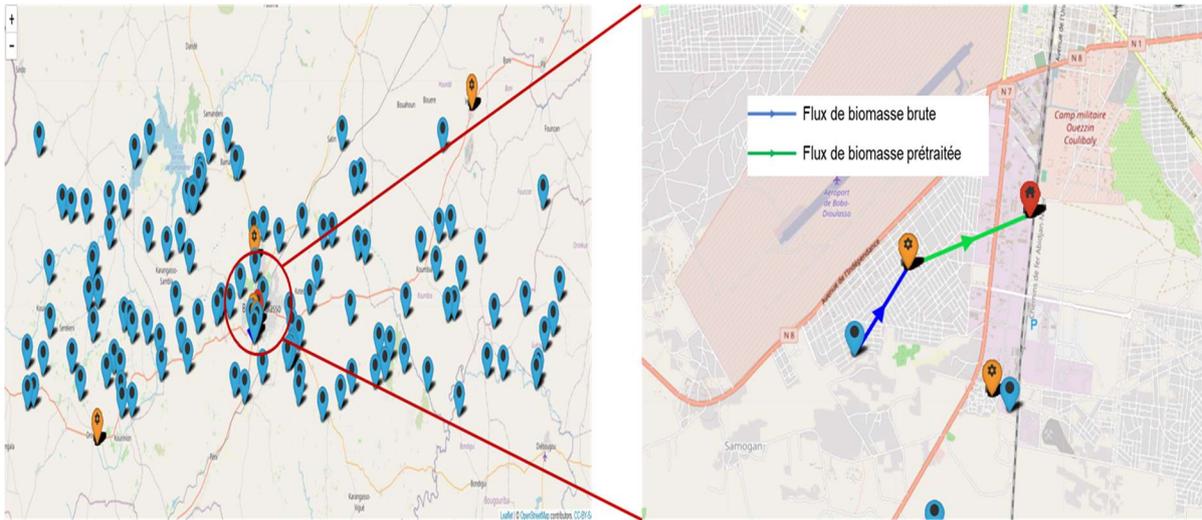
b- Pour la production de la chaleur



Chaîne d'approvisionnement optimale pour la production de la chaleur

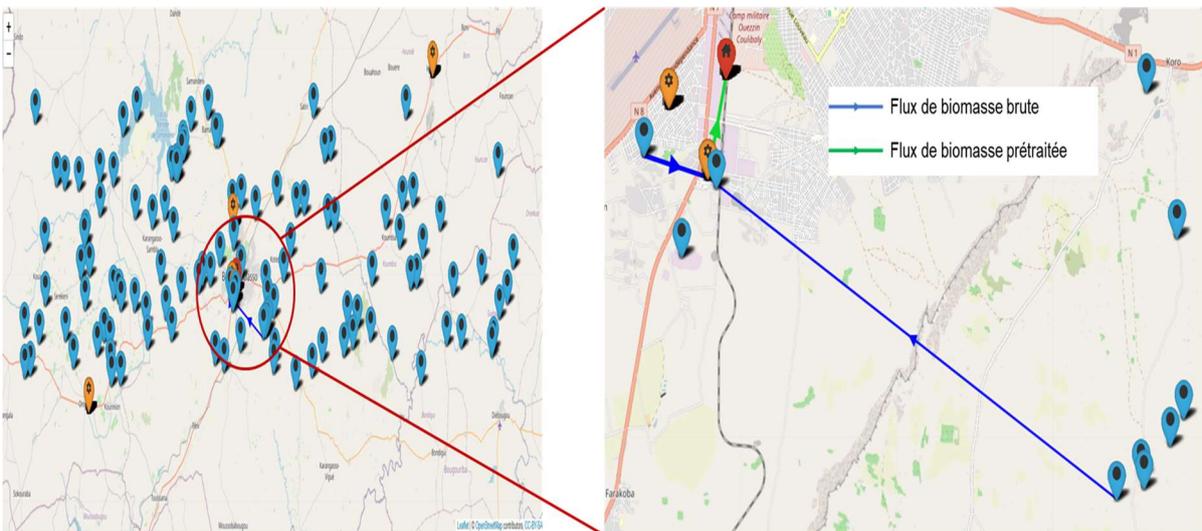
6- Configuration des chaînes d'approvisionnement optimales pour la filière des épiluchures de mangue (EM)

a- Pour la production de l'électricité



Chaîne d'approvisionnement optimale pour la production d'électricité

b- Pour la production de la chaleur



Chaîne d'approvisionnement optimale pour la production de la chaleur