

COMMUNAUTÉ FRANÇAISE DE
BELGIQUE

UNIVERSITÉ DE LIÈGE - GEMBOUX
AGRO-BIO TECH (ULiège – Gx ABT)

ECONOMIE ET DÉVELOPPEMENT
RURALE

BURKINA FASO

INSTITUT INTERNATIONAL
D'INGÉNIERIE, DE L'EAU ET DE
L'ENVIRONNEMENT (2iE)

LABORATOIRE ENERGIES
RENOUVELABLES ET EFFICACITÉ
ENERGÉTIQUE (LabEREE)

Evaluation des conditions de développement d'une filière de gazéification de biomasse agricole au Burkina Faso

Thèse en cotutelle

Dissertation originale en vue de l'obtention du grade de

DOCTORAT EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'EAU, DE L'ÉNERGIE ET DE
L'ENVIRONNEMENT, Spécialité : Energie

&

DOCTORAT EN SCIENCES AGRONOMIQUES ET INGÉNIERIE BIOLOGIQUE

Fanta BARRY

Membres du Jury :

M. Yves BECKERS, Professeur Ordinaire, ULiège – Gx ABT, Belgique
M. Hervé JEANMART, Professeur, UCLouvain, Belgique
M. Achille A. DIENDERE, Maître de Conférences CAMES, UTS, Burkina Faso
M. Oumar SANOGO, Directeur de Recherches CAMES, CNRST/IRSAT, Burkina Faso
M. Frédéric LEBEAU, Professeur, ULiège – Gx ABT, Belgique
M. Igor W.K. OUEDRAOGO, Maître de conférences CAMES, Institut 2iE, Burkina Faso
M. Thomas DOGOT, Docteur, Chargé de cours, ULiège – Gx ABT, Belgique
Mme. Marie SAWADOGO, Maître de conférences CAMES, Institut 2iE, Burkina Faso

Président du jury
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Co-Directeur de thèse
Co-Directeur de thèse
Examinatrice

Année civile : 2023

Copyright : © BARRY Fanta 30 – 11 - 2022.

Aux termes de la loi belge du 30 juin 1994 sur le droit d'auteur et les droits voisins, seul l'auteur a le droit de reproduire partiellement ou complètement cet ouvrage de quelques façons et de quelque forme que ce soit ou d'en autoriser la reproduction partielle ou complète de quelques manières et sous quelque forme que ce soit. Toute photocopie ou reproduction sous autre forme est donc faite en violation de ladite loi et de ses modifications ultérieures.

Fanta BARRY. (2023). "Evaluation des conditions de développement d'une filière de gazéification de biomasse agricole au Burkina Faso". Thèse rédigée français en cotutelle entre l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement et Université de Liège/Gembloux Agro-Bio Tech, Ouagadougou et Gembloux, Burkina Faso et Belgique, 200 pages, 25 tableaux, 31 figures.

Résumé

La présente thèse a porté sur l'évaluation des conditions technico-économiques de développement de la filière de gazéification de la biomasse au Burkina Faso. Pour ce faire, des informations qualitatives ont été collectées à partir d'entretiens de groupe avec les parties prenantes du secteur de l'énergie. Puis, un benchmarking a été réalisé sur la technologie de pyrolyse. L'application de la méthode d'analyse hiérarchique (AHP) a permis de relever les barrières les plus importantes à l'adoption de la gazéification. La recherche s'est par la suite focalisée sur l'analyse plus approfondie des barrières critiques à l'appropriation de la technologie. Une approche d'analyse statistique considérant les paramètres d'évaluation de la disponibilité réelle de la biomasse a permis d'estimer trois niveaux de potentiel des résidus de cultures et agro-industriels pour l'année 2018. Le calcul s'est basé sur des ratios de résidus spécifiques à chaque biomasse en fonction du type de culture et de la production agricole.

A l'issue des analyses, 27 barrières ont été identifiées et classées par ordre de priorité en cinq catégories d'ordre technique, économique et financier, socioculturel et organisationnel, politique et institutionnel, et écologique et géographiques. Les catégories « socioculturelles et organisationnelles » et « écologiques et géographiques », et plus particulièrement la quantité de biomasse disponible et l'organisation de la filière sont apparues comme les plus critiques pour l'adoption de la gazéification. Ainsi, une meilleure évaluation du potentiel de biomasse valorisable et une meilleure organisation de la filière sont indispensables pour la mise en œuvre de la technologie de gazéification.

Concernant la disponibilité de la biomasse, le gisement théorique des résidus agricoles est estimé à 8 millions de tonnes pour l'année 2018 constitué en majorité des résidus de céréales. Les interviews de terrain révèlent qu'il existe une forte concurrence dans l'utilisation des résidus, empêchant leur valorisation énergétique à l'échelle industrielle. Seules les tiges de cotonnier et les balles de riz sont valorisables à 75 % et à 20 % des quantités produites. Selon les estimations réalisées, le potentiel mobilisable pour la bioénergie serait, respectivement, de 723 260 et 6 497 tonnes avec un potentiel énergétique d'environ 297 125 Tep et 2 685 Tep. Le stock de résidus le plus important est enregistré dans les localités à forte production agricole telles que les Hauts-Bassins et la Boucle du Mouhoun.

L'ensemble de la chaîne de production du syngas à partir de ces résidus mobilisables a été paramétré en utilisant une approche d'analyse de chaîne de valeur. Compte tenu de l'absence d'une chaîne de valeur opérationnelle de production d'énergie par gazéification au Burkina Faso, les analyses ont été réalisées sur la base de simulations et d'hypothèses utilisant les connaissances locales, complétées par des entretiens individuels avec des transporteurs et des négociants de produits

agricoles, des opérateurs ayant déjà utilisé la technologie, et des rapports de projets de gazéification. Il en ressort que l'activité cruciale en amont de la chaîne de production est l'acquisition de la biomasse, contribuant à plus de 60 % dans la formation du coût de revient global. En aval, la filière de production de syngas par gazéification des résidus mobilisables ne peut être compétitive avec le marché du gaz butane que si la technologie est fabriquée localement.

Les résidus agricoles pourraient contribuer durablement à la satisfaction des besoins futurs en bioénergie du secteur agro-industriel du pays. Pour y parvenir, les futurs opérateurs devraient se spécialiser à la transformation de la biomasse et établir des partenariats avec des structures qui soutiennent la mobilisation de la biomasse. Ils gagneraient à recourir à la sous-traitance pour la réalisation des activités intermédiaires telles que le transport et le prétraitement de la biomasse.

Mots-clés : barrières à l'adoption, résidus agricoles, potentiel durable, gazéification, chaîne de valeur, Burkina Faso.

Fanta BARRY. (2023). "Evaluation des conditions de développement d'une filière de gazéification de biomasse agricole au Burkina Faso". Thèse rédigée français en cotutelle entre l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement et Université de Liège/Gembloux Agro-Bio Tech, Ouagadougou et Gembloux, Burkina Faso et Belgique, 200 pages, 25 tableaux, 31 figures.

Abstract

This thesis assessed the technical and economic conditions for the development of the biomass gasification sector in Burkina Faso. To do this, qualitative information was collected from group interviews with stakeholders in the energy sector. Then, a benchmarking was conducted on the pyrolysis technology. The application of the hierarchical analysis method (AHP) was used to identify the most important barriers to the adoption of gasification. The research then focused on further analysis of the critical barriers to technology adoption. A statistical analysis approach considering parameters for assessing actual biomass availability was used to estimate three levels of crop and agro-industrial residue potential for the year 2018. The calculation was based on specific residue ratios for each biomass according to the type of crop and agricultural production.

As a result of the analyses, 27 barriers were identified and prioritized into five categories of technical, economic and financial, socio-cultural and organizational, political and institutional, and ecological and geographic. The categories "socio-cultural and organizational" and "ecological and geographic", especially the amount of biomass available and the organization of the value chain, were found to be the most critical for the adoption of gasification. Thus, a better evaluation of the potential of recoverable biomass and a better organization of the sector are essential for the implementation of the gasification technology.

Regarding the availability of biomass, the theoretical deposit of agricultural residues is estimated at 8 million tons for the year 2018, consisting mainly of cereal residues. Field interviews reveal that there is strong competition in the use of residues, preventing their energy recovery on an industrial scale. Only cotton stalks and rice husks are recoverable at 75% and 20% of the quantities produced. According to estimates, the potential for bioenergy is 723,260 and 6,497 tons respectively, with an energy potential of approximately 297,125 toe and 2,685 toe. The largest stock of residues is recorded in localities with high agricultural production such as the "Hauts-Bassins" and the "Boucle du Mouhoun".

The entire syngas production chain from these mobilizable residues was modeled using a value chain analysis approach. Given the absence of an operational gasification energy production value chain in Burkina Faso, the analyses were based on simulations and assumptions using local knowledge, supplemented by individual interviews with transporters and traders of agricultural products, operators who have already used the technology, and reports from gasification projects. It was found that the crucial activity upstream of the production chain is the acquisition of biomass, contributing more than 60% of the overall cost. Downstream, the syngas production chain by gasification of mobilizable residues can only be competitive with the butane gas market if the technology is manufactured locally.

Agricultural residues could make a sustainable contribution to meeting the future bioenergy needs of the country's agro-industrial sector. To achieve this, future operators should be specialized in biomass processing and establish partnerships with structures that support biomass mobilization. They would benefit from outsourcing intermediate activities such as transport and pre-processing of biomass.

Keywords: adoption barriers, agricultural residues, sustainable potential, gasification, value chain, Burkina Faso.

Remerciements

La présente thèse a été réalisée dans le cadre d'un projet de recherche et développement intitulé « Contribution à la satisfaction des besoins énergétiques en milieu rural par gazéification de résidus agricoles au Burkina Faso, PRD2017 2022 », financé par l'Académie de Recherche et de l'Enseignement Supérieur de la Fédération Wallonie-Bruxelles (Belgique) - Commission de la Coopération au Développement (ARES-CCD) et coordonné par l'Université Catholique de Louvain (UCLouvain) et l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE). Elle s'est déroulée sur quatre années académiques en cotutelle entre l'Institut 2iE et l'Université de Liège/Gembloux Agro Bio-Tech (ULiège – Gx ABT). Cette thèse s'achève grâce à la contribution de plusieurs personnes auxquelles j'adresse ma profonde reconnaissance.

Je remercie très sincèrement mes promoteurs de thèse les Docteurs Igor W. K. OUEDRAOGO, Maître de conférences, Directeur de l'Ecole doctorale à l'Institut 2iE et Thomas DOGOT, Chargé de cours au Laboratoire d'Economie et Développement rural de l'ULiège – Gx ABT, et mes encadrantes Docteurs Marie SAWADOGO, Maître de conférences à l'Institut 2iE, Responsable du Laboratoire énergies renouvelables et efficacité énergétique (LabEREE) et Maïmouna BOLOGO/TRAORE, Maître assistante à l'Institut 2iE, Responsable du Département sciences humaines, sociales et managériales (SHSM) au Laboratoire Eaux Hydrosystèmes et Agriculture (LEHSA) pour leur accueil au sein de leur institution, la confiance, les conseils, la rigueur et les orientations scientifiques, leur disponibilité, les encouragements et la mise en contact avec d'autres Experts en Analyse sociale de cycle de vie, Docteure Florence VAN STAPPEN, Project Manager at Walloon Agricultural Research Centre (CRA-W) Belgium et les Docteurs KEMAUSUOR et RAMDE, du Centre d'énergie à l'Université de Kwame Kuruma de Kumassi (Ghana) que je remercie pour l'accueil au sein de leur structure, la franche collaboration et la contribution dans le recadrage des objectifs de la thèse et de l'approche méthodologique adoptée.

J'adresse toute ma reconnaissance aux membres du comité de thèse et aux membres du jury pour leur contribution à l'amélioration de la qualité scientifique de ce travail à travers leurs critiques, suggestions et l'instruction du manuscrit de thèse. Spécialement au Professeur Philippe LEBAILLY, Responsable du Laboratoire d'Economie et Développement rural de Gembloux Agro-Bio Tech pour l'autorisation de mon inscription dans son département, les critiques, l'orientation, les conseils et le suivi de cette thèse ; au Professeur Frédéric LEBEAU de l'ULiège pour les critiques, l'orientation, les conseils et le suivi de cette thèse et au Professeur Hervé JEANMART, Coordonnateur nord de Projet PRD GasCal à l'Université Catholique de Louvain (UCLouvain), pour l'organisation, la coordination des mobilités pour la Belgique, la disponibilité et l'orientation scientifique.

Je remercie l'ensemble du personnel de l'Institut 2iE et de l'ULiège en particulier la Direction de la recherche, de l'Ecole doctorale, du LabEREE, du LEHSA, du Laboratoire d'Economie et Développement rural de Gembloux Agro-Bio Tech et du

Centre pour le Partenariat et la Coopération au Développement (PACODEL) pour la franche collaboration, la contribution à la recherche lors des animations scientifiques. Je remercie spécifiquement Docteur Sayon Sadio SIDIBE, Maître de conférences à l'Institut 2iE et Coordonnateur sud du Projet PRD GasCal, pour les encouragements et la coordination des activités de la thèse et des mobilités en Belgique ; Mesdames Nadine STOFFELEN, Lindsay LEBEAU, Alexia GUSU, Manon VAN DE WEGHE et Sarah DIEU, pour l'organisation de mes séjours en Belgique et des différents aspects administratifs relatifs à ma formation. Je suis très reconnaissante envers Madame Christine FADEUR pour m'avoir facilitée l'accès à la documentation.

J'adresse mes remerciements au personnel du Centre National de Recherche Scientifique et Technologique (CNRST), de l'Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA) et du Centre de Recherches Agricoles, Environnementales et de Formation (CREAF), mon institution d'origine pour avoir autorisé la réalisation de cette thèse et l'octroi d'un voyage d'étude à l'Université de « Kwame Kuruma » de Kumassi (Ghana). Il s'agit spécialement du Docteur Oumar SANOGO, Directeur de Recherche et Délégué Général Adjoint chargé de la Recherche et de la Coopération (DGA/RC) au CNRST pour les conseils et les orientations au début de cette thèse, des Docteurs Léopold SOME, Directeur de Recherche, actuellement à la retraite, Alice NARE, Maître de recherche à l'Institut de Recherche en Sciences Appliquées et Technologies (IRSAT), Lassina SANOU, Chargé de Recherche au Centre de Recherches Environnementales et Agricoles (DRREA) de Saria pour les conseils et les encouragements tout le long de cette thèse. Je remercie également les Docteurs Eveline SAWADOGO/COMPAORE, Chargé de recherche et Responsable de la cellule macroéconomie et économie des filières (CMEF), pour les conseils, les orientations et les encouragements ; Aïssata N'DIAYE WEREME, Maître de recherche à l'INERA et chargée de mission au Ministère de l'Agriculture, pour avoir facilité l'accès aux données quantitatives sur la production agricole ; Farid TRAORE, Chargé de recherche à l'INERA pour les conseils, les encouragements, les orientations dans l'évaluation des rendements des cultures à partir des images satellitaires et la mise à contact avec un Expert en télédétection à l'« University of Southern Queensland », le Docteur Louis Amani KOUADIO que je remercie pour sa disponibilité et son accompagnement.

Je remercie particulièrement les agents de la fondation DREYER, les acteurs du projet ATMOSFair, l'Union des Groupements des Etuveuses de riz à Bama (UGER-B), les Responsables des associations de transformateurs d'anacarde et de mangue, des huileries, les agents techniques d'agriculture, les agents techniques coton, les agents du Ministère en charge de l'Energie, les agents du Centre Songhaï à Porto Novo (Bénin) pour avoir facilité l'accès aux informations.

Je remercie mes aînés, amis et collègues de l'Institut de développement rural (IDR), de l'INERA, de la filière AGRINOVIA, de l'institut 2iE, de l'équipe du projet GasCal et de Gx ABT pour la fraternité, les encouragements et les conseils.

Je remercie mes parents, mes petites sœurs, mon neveu Sidi et son épouse, mes voisines et voisins de maison, pour leur soutien permanent, les bénédictions et l'appui dans la garde de ma fille durant mes mobilités. Spécialement, je remercie ma fille pour avoir été la source de mon engagement. Toutes mes excuses pour la souffrance que je t'ai infligée à cause de mes absences durant mes mobilités.

Je suis reconnaissante à tous ceux qui ont apporté leur soutien multiforme à la réalisation de cette thèse. Que Dieu vous bénisse !

Table de matières

Résumé	i
Abstract.....	iii
Remerciements	v
Table de matières.....	viii
Liste des figures.....	xii
Liste des tableaux	xiv
Liste des abréviations	xv
Introduction générale.....	1
1. Contexte socio-économique et énergétique du Burkina Faso.....	1
2. Situation de la biomasse au Burkina Faso	3
3. Problématique et positionnement scientifique.....	4
4. Objectifs et hypothèses de recherche.....	6
5. Méthodologie générale et plan du manuscrit de thèse.....	7
Chapitre 1: Cadre conceptuel et théorique.....	12
1.1. Cadre conceptuel.....	13
1.1.1. Définition et typologie de biomasse	13
1.1.2. Différents procédés de valorisation énergétique de la biomasse	14
1.1.3. Retour d'expérience de gazéification dans les pays en développement	19
1.1.4. Les aspects législatifs et réglementaires des énergies renouvelables au Burkina Faso.....	23
1.1.5. Les aspects institutionnels du secteur de l'énergie au Burkina Faso.....	25
1.2. Cadre théorique	26
1.2.1. La théorie de l'action raisonnée.....	26
1.2.2. Le modèle d'acceptation de la technologie	27
1.2.3. La théorie de diffusion de l'innovation	27
1.2.4. La sociologie de la traduction ou théorie de l'acteur-réseau	31
1.2.5. La théorie de l'utilité espérée.....	32

1.2.6. Méthodes économétriques d'analyse des facteurs d'adoption des innovations	33
1.2.7. État de l'art sur les méthodes de classement des facteurs d'adoption des technologies.....	34
1.2.8. État de l'art sur les méthodes d'analyse de chaîne de valeur	40
1.2.8.1. Concepts de filière, chaîne de valeur et chaîne d'approvisionnement	40
1.2.8.2. Différence entre filière, chaîne de valeur et chaîne d'approvisionnement	45
1.2.8.3. Méthodes d'analyse de chaîne de valeur	46
1.2.8.4. Modèle de chaîne de valeur pour la production de bioénergies	49
1.2.9. Etat de l'art sur les méthodes d'analyse de la disponibilité de la biomasse	49
1.3. Conclusion partielle	52
Chapitre 2: Méthodologie de recherche	57
2.1. Justification du choix de la zone de recherche.....	58
2.2. Identification des barrières d'adoption de la gazéification	61
2.2.1. Études de cas de la pyrolyse au Burkina Faso : point de référence du Benchmarking	61
2.2.2. Collecte des données	62
2.2.3. Méthode d'analyse du processus hiérarchique	63
2.2.4. Analyse de sensibilité.....	65
2.3. Méthode et paramètres d'évaluation de la disponibilité de la biomasse.....	66
2.3.1. Quantité potentielle théorique de biomasse.....	67
2.3.2. Utilisation compétitive des résidus de culture et potentiel mobilisable	68
2.3.3. Potentiel énergétique	69
2.3.4. Distribution spatiale de la biomasse.....	70
2.3.5. Accessibilité économique des résidus mobilisables	70
2.3.5.1. Méthode de calcul du coût de revient.....	70
2.3.5.2. Réseau d'approvisionnement en biomasse et limite de l'analyse.....	71
2.3.5.3. Postes des coûts totaux liés à la mobilisation de la biomasse	72
2.4. Méthode d'analyse de la chaîne de valeur production de l'énergie par gazéification.....	72

2.5. Conclusion partielle	75
Chapitre 3: Mise en évidence des barrières au déploiement de la gazéification au Burkina Faso.....	79
3.1. Description de l'environnement de la gazéification au Burkina Faso.....	79
3.1.1. Cas d'intervention à Po	80
3.1.2. Cas d'intervention à Dano	81
3.1.3. Cas d'intervention à Bama	83
3.2. Processus d'installation de la pyrolyse au Burkina Faso	86
3.3. Analyse comparative des facteurs d'adoption des technologies	89
3.4. Arbre hiérarchique des barrières d'adoption de la gazéification.....	92
3.4.1. Barrières techniques	93
3.4.2. Barrières économiques et financières	94
3.4.3. Barrières socioculturelles et organisationnelles.....	94
3.4.4. Barrières politiques, gouvernementales et institutionnelles	94
3.4.5. Barrières écologiques et géographiques	95
3.5. Hiérarchisation des sous-catégories de barrières	95
3.6. Analyse de sensibilité.....	102
3.7. Conclusion partielle	103
Chapitre 4: Analyse de la chaîne de valeur de production du syngas par gazéification de biomasse au Burkina Faso	107
4.1. Description de la chaîne de valeur de production d'énergie par gazéification de biomasse au Burkina Faso.....	107
4.2. Analyse organisationnelle et fonctionnelle de la chaîne de valeur	108
4.2.1. Filière courte : cas d'une filière balles de riz - énergie.....	109
4.2.2. Filière longue : cas d'une filière tiges de cotonnier - énergie.....	110
4.2.2.1. La collecte de la biomasse	110
4.2.2.2. Le transport.....	111
4.2.2.3. Le stockage de la biomasse	111
4.2.2.4. Le prétraitement de la biomasse	112
4.2.2.5. La conversion énergétique de la biomasse par gazéification.....	113

4.3. Disponibilité de biomasse agricole au Burkina Faso	113
4.3.1. Évolution des résidus agricoles au Burkina Faso	114
4.3.2. Disponibilité théorique des résidus agricoles	115
4.3.3. Usages compétitifs des résidus agricoles	117
4.3.4. Potentiels mobilisables et énergétiques des résidus agricoles	118
4.4. Analyse financière de la chaîne de valeur « production d'énergie par gazéification de la biomasse » au Burkina Faso	121
4.4.1. Récolte ou collecte des résidus.....	121
4.4.2. Transport de la biomasse.....	122
4.4.3. Stockage de la biomasse.....	125
4.4.4. Prétraitement de la biomasse.....	126
4.4.5. Accessibilité des résidus mobilisables pour la production du syngas	129
4.4.6. Analyse de sensibilité.....	132
4.5. Conclusion partielle	133
Chapitre 5: Discussion générale	137
5.1. Soutenabilité de la gazéification	137
5.2. Disponibilité des résidus agricoles.....	138
5.3. Compétitivité de la chaîne de production du syngas.....	139
5.4. Quel avenir pour la gazéification au Burkina Faso ?.....	140
Conclusion générale	143
Références bibliographiques	147
Annexes.....	i

Liste des figures

Figure 1 : Évolution de la production végétale au Burkina Faso	4
Figure 2 : Schéma de synthèse des procédés de conversion énergétique de la biomasse	14
Figure 3 : Les phases pour une adoption de l'innovation	29
Figure 4 : Différentes activités de la chaîne de valeur.....	42
Figure 5 : Chaîne d'approvisionnement de la biomasse agricole	44
Figure 6 : Processus d'analyse de la chaîne de valeur	48
Figure 7 : Organigramme de l'approche méthodologique.....	58
Figure 8 : Carte représentative des zones d'étude	59
Figure 9 : Représentation graphique de la commune de Bama	60
Figure 10 : Représentation graphique de la commune de Dano	60
Figure 11 : Représentation graphique de la commune de Po	61
Figure 12 : Image illustrative des entretiens de groupe.....	63
Figure 13 : Niveaux d'évaluation de la disponibilité de la biomasse agricole.....	66
Figure 14 : Dispositif du gazogène installé à Po : a) réacteur et b) filtres pour le nettoyage du syngas produit	81
Figure 15 : Champ solaire installé à Dano : a) Miroirs, vue de face ; b) Miroirs, vue de dos ; c) Corrosion des miroirs et du capteur solaire.....	82
Figure 16 : Technique d'étuvage du riz paddy : a) par combustion indirecte sur un foyer à balles de riz et b) environnement d'étuvage du riz pollué de fumées	83
Figure 17 : Dispositif des gazogènes installés à Bama.....	85
Figure 18 : Processus décisionnel de non développement de la gazéification au Burkina Faso.....	86
Figure 19 : Illustration de quelques technologies de pyrolyse du Burkina Faso	88
Figure 20 : Structure hiérarchique des barrières à l'adoption de la gazéification au Burkina Faso.....	93
Figure 21 : Résultats d'analyse de sensibilité : a) variation des barrières SCO par rapport à celles PGI et b) variation des barrières SCO par rapport à celles EG	102
Figure 22 : Filière biomasse agricole – énergie au Burkina Faso.....	107
Figure 23 : Représentation graphique de la valorisation énergétique dans l'agro-alimentaire traditionnel par gazéification au Burkina Faso	108
Figure 24 : Représentation schématique des types de filières de gazéification de biomasse au Burkina Faso	109
Figure 25 : Représentation schématique de la filière de gazéification de tiges de cotonnier	110
Figure 26 : Photographie des techniques de stockage de la biomasse :a) stockage des tiges de mil sur un hangar, b) stockage des coques d'arachide sur la paille et c) stockage sur une bâche	112
Figure 27 : Evolution des quantités des résidus agricoles sur le plan national.....	114

Figure 28 : Taille du gisement théorique national des résidus agricoles en 2018..	115
Figure 29: Densité des tiges de cotonnier dans les provinces du Burkina Faso	121
Figure 30 : Représentation du transport avec des sites de stockage intermédiaires	128
Figure 31 : Variation des coûts de revient : a) d'acquisition des tiges de cotonnier et b) du transport des tiges de cotonnier.....	132

Liste des tableaux

Tableau 1 : Avantages et limites des méthodes multicritères.....	36
Tableau 2 : Échelle de Saaty	64
Tableau 3 : Valeur de l'indice aléatoire en fonction de la taille de la matrice.....	65
Tableau 4 : Rapport résidu/produit moyen appliqué à chaque résidu étudié.....	68
Tableau 5 : Echantillon de collecte d'informations	69
Tableau 6 : Paramètres généraux des gazogènes à co-courant à vendre	74
Tableau 7 : Facteurs déterminants l'adoption des technologies.....	90
Tableau 8 : Pondération des sous catégories des barrières techniques.....	96
Tableau 9 : Pondération des sous catégories des barrières économiques et financières.....	96
Tableau 10 : Pondération des sous catégories de barrières socioculturelles et organisationnelles	97
Tableau 11 : Pondération des sous catégories de barrières politiques, gouvernementales et institutionnelles.....	97
Tableau 12 : Pondération des sous catégories de barrières écologiques et géographiques.....	98
Tableau 13 : Classification des différentes catégories d'obstacles à l'adoption de la gazéification.....	98
Tableau 14 : Hiérarchisation globale des barrières déterminant l'adoption de la gazéification.....	100
Tableau 15 : Disponibilité théorique des résidus agricoles en 2018 par région....	116
Tableau 16 : Utilisation compétitive des résidus agricoles	117
Tableau 17 : Potentiels mobilisable et énergétique des balles de riz en 2018 par région.....	119
Tableau 18 : Potentiels mobilisable et énergétique des tiges de cotonnier en 2018 par région.....	120
Tableau 19 : Coût de revient lié au transport de la biomasse.....	124
Tableau 20 : Coût de revient du stockage des tiges de cotonnier.....	126
Tableau 21 : Coût de revient lié au prétraitement de la biomasse.....	127
Tableau 22 : Part des activités dans le coût de revient global des tiges de cotonnier mobilisées du marché à l'entrée du centre de gazéification	128
Tableau 23 : Coût de revient des tiges de cotonnier mobilisées du champ à l'entrée du centre de gazéification	129
Tableau 24 : Coût de revient d'un kWh de syngas issue des résidus mobilisables	130
Tableau 25 : Comparaison du prix de revient du kWh de différentes sources d'énergie en fonction des options subventionnées et non subventionnées.....	131

Liste des abréviations

ABER	: Agence Burkinabè pour l'Electrification Rurale
AHP	: Analytic Hierarchy Process
ANEREE	: Agence des Energies Renouvelables et de l'Efficacité Energétique
ANT	: Actor Network Theory
ARES-CCD	: Académie de Recherche et de l'Enseignement Supérieur - Commission de la Coopération au Développement
ARSE	: Autorité de Régulation du Secteur de l'Energie
BAD	: Banque Africaine de Développement
C ₂ H ₂	: Acétylène
C ₂ H ₄	: Ethylène
C ₂ H ₆	: Ethane
CH ₄	: Méthane
CEDEAO	: Communauté Economique des Etats de l'Afrique de l'Ouest
CMEF	: Cellule Macroéconomie et Economie des Filières
CNRST	: Centre National Centre National de Recherche Scientifique et Technologique
CNS	: Conseil National de la Statistique
CO	: Monoxyde de carbone
CO ₂	: Dioxyde de carbone
CREAF	: Centre de Recherches Agricoles, Environnementales et de Formation
DGEC	: Direction Générale des Energies Conventionnelles
DGEE	: Direction Générale de l'Efficacité Energétique
DGER	: Direction Générale des Energies Renouvelables
DRREA	: Direction Régionale de Recherches Environnementales et Agricoles
ELECTRE	: Elimination Et Choix Traduisant la Réalité
FAO	: Food and Agriculture Organisation
H ₂	: Dihydrogène
IDR	: Institut de Développement Rural
INERA	: Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles
INSD	: Institut National de la Statistique et de la Démographie
2iE	: Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
IRSAT	: Institut de Recherche en Sciences Appliquées et Technologies
LabEREE	: Laboratoire Energies Renouvelables et Efficacité Energétique

LEHSA	: Laboratoire Eaux Hydrosystèmes et Agriculture
LEHSA	: Laboratoire Eaux Hydrosystèmes et Agriculture
MAUT	: Multi Attribute Utility Theory
N ₂	: Dinitrate
PACODEL	: Centre pour le Partenariat et la Coopération au Développement
PANEE	: Plan d'Actions National pour l'Efficacité Energétique
PCI	: Pouvoir Calorifique Inférieur
PNDES	: Plan National de Développement Economique et Social
PRD GasCal	: Projet de Recherche et Développement
PROMETHEE	: Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations
SE4ALL	: Sustainable Energy For ALL
SHSM	: Département sciences humaines, sociales et managériales
SNV	: Netherlands Development Organization
SOFITEX	: Société des Fibres et Textiles
SONABEL	: Société Nationale d'Electricité du Burkina
SPCPSA	: Secrétariat Permanent de la Coordination des Politiques Sectorielles Agricoles
UCLouvain	: Université Catholique de Louvain
UGER-B	: Union des Groupements des Etuveuses de riz à Bama
UJKZ	: Université Joseph Ki Zerbo
ULiège–Gx ABT	: Université de Liège/Gembloux Agro-Bio Tech
UNERIZ	: Union Nationale des Etuveuses de Riz
UTS	: Université Thomas Sankara
VCA4D	: Value Chain Analysis for Development

Introduction générale

Cette section expose d'abord le contexte énergétique des pays de l'Afrique de l'Ouest, en particulier celui du Burkina Faso, et le rôle de la biomasse comme source de production de chaleur et d'électricité pour les agro-industries. La problématique de l'efficacité des technologies de production d'énergie dans le contexte du Burkina Faso est ensuite présentée tout en soulignant le cas de l'échec de la gazéification. L'objectif global de la thèse est d'apporter un éclairage socio-économique sur les potentialités qu'offre cette technologie dans le contexte du Burkina Faso. Un certain nombre de questions se posent essentiellement en lien avec les raisons de cet échec et les conditions susceptibles de soutenir le redéploiement de la technologie. Ainsi, la présente recherche consiste à apporter des éléments de réponse à ces deux questionnements à travers un diagnostic critique. L'introduction s'achève par la présentation des objectifs de recherche et d'un schéma permettant d'illustrer, à travers une approche globale, l'articulation des différentes parties de la thèse et de la méthodologie mise en place pour l'atteinte des objectifs fixés.

1. Contexte socio-économique et énergétique du Burkina Faso

L'Afrique de l'Ouest, avec une population d'environ 300 millions d'habitants, soit le tiers de la population du continent, possède l'un des taux de consommation d'énergie moderne les plus bas au monde, soit 128 kWh en électricité par habitant par an (Ferrenbach et al., 2012). Selon ces auteurs, seulement cinq pays¹ disposaient d'un taux d'accès national à l'électricité supérieur à 30 % en 2009. Au Burkina Faso, le taux d'accès à l'électricité demeure faible à cause de la cherté des sources d'énergie fossiles. En effet, ce taux est de 3,16 % en milieu rural en 2018 contre 68,69 % en milieu urbain (ME, 2019). Cependant, des progrès considérables y ont été réalisés en matière de développement. Le pourcentage d'enfants inscrits à l'école primaire est passé de 12,2 % en 1971 à près de 88 % en 2015. L'espérance de vie à la naissance, quant à elle, est passée de 34 ans en 1960 à presque 60 en 2015. Le Produit Intérieur Brut (PIB) par habitant a progressé ces dernières années, avec un taux de croissance de 3,9 % en 2015 à 5,7 % en 2019 (INSD, 2020). Malgré les progrès enregistrés dans le pays, plus de 40 % de la population vit toujours sous le seuil de pauvreté nationale. L'Indice de Développement Humain (IDH) du pays est passé de 0,334 en 2010 à 0,423 en 2017 occupant le 183^e sur les 189 pays classés. Il est donc indispensable que le développement du pays se poursuive mais il est également crucial de réduire au maximum le recours aux énergies fossiles. Le pays observe une demande croissante en énergie ces dernières années à cause de la tendance à la hausse des activités économiques, avec un taux d'accroissement annuel moyen du PIB de 5,6 % pour la période 2011-2017 (ME, 2018). L'énergie n'est pas accessible pour l'ensemble de la population et son coût élevé influe négativement sur les activités socio-économiques. Le pays connaît une consommation croissante de bois et charbon de bois. Selon INSD (2017), environ

¹ Le Cap-Vert, le Ghana, le Nigéria, la Côte d'Ivoire et le Sénégal

90 % des ménages burkinabè utilisent principalement les combustibles solides tels que le bois et ses dérivés comme source d'énergie. De ce fait, la population rurale du pays dépend quasi exclusivement de la ressource bois pour subvenir à ses besoins énergétiques, limités souvent à la cuisson des aliments et à quelques activités de transformation agroalimentaire. Cette pression sur les forêts et les savanes en vue de la disponibilité quotidienne du bois entraîne une déforestation accrue dans les pays sahéliens et par conséquent, une réduction du couvert végétal (Ozer, 2004). C'est d'ailleurs pour cette raison que le rapport de la FAO (2014b), indique que les superficies des forêts connaissent une perpétuelle diminution résultant de la forte pression anthropique. Cette logique est appuyée par les travaux du Secrétariat Permanent de la Coordination des Politiques Sectorielles Agricoles (SPCPSA) qui précisent que les formations forestières couvraient 11,4 millions d'hectares en 2010 contre 3,9 millions d'hectares en 2017, soit une baisse d'environ 66 % (SPCPSA, 2017). Face à cette situation, l'exploitation des sources d'énergie renouvelable se dévoile comme un moyen pour améliorer la couverture énergétique.

En termes de potentialités en ressources énergétiques renouvelables, le Burkina Faso possède le meilleur ensoleillement en Afrique de l'Ouest avec 8,3 heures d'ensoleillement par jour. Mais, son exploitation demeure incertaine malgré l'amélioration des conditions d'acquisition des équipements (Agbo et al., 2021), (SE4ALL, 2014). Les centrales solaires nécessitent l'aménagement de grands espaces, souvent source de conflits fonciers (IED, 2019). De plus, la durabilité des panneaux photovoltaïques (PV) est limitée par certaines difficultés techniques comme le respect de l'angle d'inclinaison au moment de leur installation afin de favoriser la capture d'une quantité importante d'énergie solaire au cours d'une journée, et leur exploitation. A cela s'ajoute la baisse de la performance des PV à cause de leur encrassement occasionné par une exposition aux intempéries telles les pluies acides, les poussières, la forte température, le sable, les feuilles d'arbres, etc. (Soro et al., 2018 ; Muhammad, 2021). Les ressources naturelles comme l'eau et le vent, produisent de faibles puissances énergétiques. L'énergie éolienne est inexistante car la vitesse des vents est faible, soit 7,2 kilomètres par heure en moyenne sauf en début et en fin de saison de pluies où elle passe à 120 kilomètres par heure lors des manifestations pluvieuses. La construction d'une centrale hydroélectrique passe par l'acquisition de terrain, le déplacement des résidents locaux et l'emploi d'une main d'œuvre qualifiée ou semi-qualifiée, souvent difficile à trouver (Patel, Zhang, and Kumar 2016). Ainsi, la biomasse reste une alternative pour la production d'énergie. Cette ressource a servi à la production de biocarburant et de biogaz au Burkina Faso. Il s'agit du *Jatropha*, une plante non comestible, et des excréments humains. Cependant, les faibles rendements de la culture du *Jatropha* par rapport aux rendements escomptés ont conduit à l'échec de plusieurs projets de production de biocarburant (Groupe e-sud, 2014 ; Bambara, 2018). Quant au biogaz, la manipulation de ces déchets a été l'un des principaux obstacles à l'acceptation des bio-digesteurs (IRENA, 2017).

La part de la biomasse dans le bilan énergétique se situe autour de 80 % au cours des cinq dernières années. La politique de substitution du bois-énergie par le gaz butane reste non viable au regard du poids de la subvention sur le budget de l'État. Le Burkina Faso fait face à un déficit global de l'offre d'électricité de l'ordre de 100 MW. Ce déficit engendre fréquemment des interruptions. Par exemple, le nombre d'interruptions était de 3 352 en 2016 et de 3 126 en 2017 avec un temps moyen annuel de coupure respectif de 172 heures et de 152 heures, équivalent à une quantité d'énergie non distribuée de 30 GWh pour chacune de ces années (ME, 2018). Pour pallier ce déficit, le Burkina Faso importe de l'énergie de la Côte d'Ivoire et du Ghana. Il existe également des interconnexions nationales avec la production solaire sans stockage comme les cas de Zagtouli et de Ziga. Avec ces interconnexions, le pays enregistre moins d'interruptions mais le déficit demeure d'actualité avec un taux de couverture électrique national de 35,58 %.

2. Situation de la biomasse au Burkina Faso

Le Burkina Faso est situé dans la zone de la boucle du fleuve Niger, entre 9°20' et 15°05' de latitude Nord, 5°20' de longitude ouest et 2°03' de longitude est (MEDD, 2012). De part cette situation géographique, il constitue un pays enclavé. Le pays dépend de l'importation de combustibles fossiles pour satisfaire la demande énergétique nationale. Par contre, la force de ses programmes bioénergétiques à l'image de la plupart des pays africains réside dans le secteur agricole. Par exemple, certaines agro-industries mobilisent des balles de riz et des noix de cajou pour produire de la chaleur, de l'électricité et de la vapeur (Diedhiou et al., 2019 ; Kwofie & Ngadi, 2017). La majorité de la population active (environ 80 %) dépend de l'agriculture pour sa subsistance. En 2017-2018, l'agriculture a contribué à près de 28,7 % du produit intérieur brut du pays. Malgré les immenses contributions du secteur agricole à l'économie, il souffre d'une faible mécanisation, d'une baisse de la fertilité des sols et d'aléas climatiques liés à une mauvaise répartition spatiale et temporelle des précipitations (Zongo, 2016). Les principales cultures pratiquées au Burkina Faso sont le mil, le sorgho, le maïs, l'arachide, le riz, le niébé, le voandzou, l'igname, le coton, etc. Les emblavures annuelles occupent environ 13 % de la superficie du pays. Les parcours représentent environ 60 % du territoire national. La Figure 1 donne un aperçu de l'évolution de la production agricole au Burkina Faso depuis 2015.

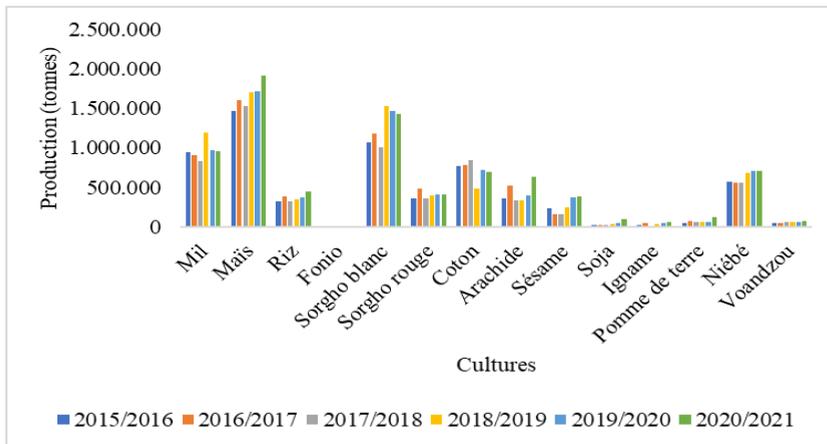


Figure 1 : Évolution de la production végétale au Burkina Faso
 Source : analyse à partir des données du ministère de l'Agriculture
 (DSS/DGESS/MAAHM, 2021b)

Ces cultures fournissent une grande quantité de résidus. Cependant, il n'existe pas de données spécifiques sur le potentiel réel destiné à la valorisation énergétique. Leur disponibilité est fortement dépendante des aléas climatiques et des usages compétitifs (Morato, Vaezi, and Kumar, 2019). En raison de la saisonnalité, les sous-produits agricoles doivent être récoltés puis stockés. Dans certains cas, ces produits doivent être détruits en raison du risque d'infestation de ravageurs. Les résidus de récolte ont diverses utilisations. Par exemple, les résidus de maïs, de sorgho et de mil constituent souvent du fourrage ou du combustible pour les besoins des ménages. Cette situation entraîne une relative disponibilité de la matière première et des coûts de stockage très élevés. L'évaluation des quantités disponibles et accessibles de résidus agricoles devient un enjeu central de la valorisation énergétique. Il ressort alors essentiel de garantir un approvisionnement durable en biomasse pour le développement de produits bioénergétiques.

3. Problématique et positionnement scientifique

La source de biomasse la plus importante en Afrique est le bois, avec un stock total forestier estimé à 7 130 milliards de tonnes en 2010. Mais la quantité disponible par an sans risque de déforestation est plus faible (Berahab, 2019). Outre le bois de chauffe, dont la principale contrainte est la question de la durabilité, les sous-produits et déchets agricoles fournissent de l'énergie à divers secteurs agro-industriels. Les principales cultures tropicales qui fournissent des résidus de culture ou des déchets agro-industriels sont le riz, la canne à sucre et le coton (Louvel and Gromard, 2017). À titre d'exemple, la plupart des pays en développement mobilisent les balles de riz comme source d'énergie pour l'étuvage du riz paddy (Kwofie and Ngadi, 2017). En plus des balles de riz, l'agro-industrie du Burkina Faso utilise les

coques de noix de cajou disponibles localement, qui ne sont pas pleinement exploitées, comme substitut au bois (Diedhiou et al., 2019).

La biomasse est largement utilisée dans les industries traditionnelles et dans les ménages ruraux de la plupart des pays en développement (Bhattacharya, 2003). Dans les systèmes semi-industriels, elle est utilisée pour la production de chaleur ou d'électricité (Wang et al., 2008 ; Makwana, Pandey and Mishra, 2019). L'avantage particulier de la biomasse par rapport aux autres sources d'énergie renouvelable est qu'elle peut être utilisée pour produire des carburants liquides et des matières premières chimiques (Nair et al., 2022; Thomson et al., 2020). L'énergie issue de la biomasse fournit également des avantages environnementaux et socio-économiques pour la population dépendant principalement des activités agricoles. Ainsi, l'intégration de la biomasse dans le mix énergétique contribue à améliorer le niveau de vie de la population locale et la couverture énergétique. Par conséquent, plusieurs technologies ont été développées pour la conversion de la biomasse en carburants et en produits chimiques, parmi lesquelles la gazéification, la pyrolyse et la combustion directe applicables à l'échelle industrielle et agroindustrielle (Patel et al., 2016). La combustion directe est souvent utilisée pour répondre aux besoins en chaleur et en vapeur des agro-industries traditionnelles, mais elle libère des particules et d'autres polluants gazeux nocifs pour la santé humaine et le climat (Höök & Tang, 2013; Basu, 2013). La gazéification et la pyrolyse constituent des alternatives viables à la combustion directe. Ces procédés offrent certains avantages en termes d'efficacité énergétique et les produits qu'ils libèrent sont adaptés pour répondre aux besoins en bioénergie de l'agro-industrie traditionnelle. Ces deux technologies participent à réduire l'utilisation de l'énergie fossile tout en valorisant des déchets, notamment agricoles et agroalimentaires, en les réintégrant dans une boucle de création de valeur ajoutée au sein d'une économie circulaire à travers la création d'emploi (Antar et al., 2021 ; Singh, 2015 ; Kumar et al., 2015 ; Chidikofan, 2017). Néanmoins, dans l'utilisation de la biomasse comme source d'énergie, la gazéification à petite échelle joue un rôle important pour la production d'électricité et les applications de cogénération, améliorant ainsi le bien-être de nombreuses communautés (Thomson et al., 2020). Cependant, l'un des principaux problèmes liés à l'utilisation de la biomasse pour la production de gaz de synthèse est le risque de surexploitation non durable des ressources naturelles (Heidenreich and Foscolo, 2015). La production de biomasse nécessite inévitablement l'accès à la terre. Elle accroît l'inévitable concurrence foncière entre l'alimentation et l'utilisation industrielle. Par conséquent, la disponibilité de la biomasse à l'échelle industrielle doit être estimée en fonction de ces contraintes. Dans le contexte de demande concurrente, une autre considération critique devrait être le développement de procédés visant à améliorer l'efficacité de la conversion de la biomasse pour maximiser l'énergie. Au Burkina Faso, les deux technologies existent mais leur développement est divergent. Si le nombre d'installations de pyrolyse a connu une augmentation, les quelques installations pilotes de la gazéification sont à l'arrêt.

Plusieurs recherches ont abordé les raisons de l'insuffisance du développement de la gazéification de la biomasse (Sansaniwal et al., 2017 ; Foxon et al., 2005).

Certains auteurs ont indexé la non maturité de la technologie, son exigence d'un important investissement et sa complexité comme étant des freins à sa progression (Ruiz et al., 2013). D'autres ont identifié les obstacles plus techniques liés au processus d'épuration du syngas (Asadullah, 2014 ; Sansaniwal et al., 2017 ; Thomson et al., 2020). Les efforts de recherche ont davantage été orientés sur le reformage catalytique et la conception globale du gazogène. Au-delà de la technique, il a été récemment relevé de se focaliser sur la réduction des coûts d'exploitation à travers une minimisation des besoins en équipement (Abazajian, 2018). Toutefois, ces obstacles semblent restés non surmontés malgré les efforts de recherche. En plus, ces obstacles se sont amplifiés avec la vision d'application à grande échelle et un grand nombre de technologies ont échoué à court terme (Thomson et al., 2020 ; Barry et al., 2021). Malgré les multiples recherches visant à améliorer la technologie de gazéification de biomasse, rares sont celles qui ont abordé la question de l'importance relative des différents obstacles. Ainsi, le Projet de Recherche et Développement (PRD) GasCal a été mis en œuvre en vue de contribuer au développement économique du milieu rural au Burkina Faso par le développement de solutions durables de production d'énergie décentralisée de faible puissance unitaire basées sur la gazéification de résidus agricoles. Ce projet est exécuté d'avril 2017 à avril 2022 au Burkina Faso au sein de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) avec la collaboration de l'Université Joseph Ki Zerbo de Ouagadougou (UJKZ), de l'Institut de Recherche en Sciences Appliquées et Technologies (IRSAT), de l'Université Catholique de Louvain (UCLouvain), et l'Université de Liège/Gembloux Agro-Bio Tech (ULiège/Gx ABT), sous le financement de l'Académie de Recherche et de l'Enseignement Supérieur-Commission de la Coopération au Développement (ARES-CCD). Il s'appuie sur le renforcement des connaissances des chercheurs, des techniciens et des experts dans le domaine de la gazéification à travers des thèses, des stages, des sessions de formation, un cluster local, du renforcement de deux plateformes expérimentales, la conception locale d'une technologie de gazéification optimisée et adaptée à la biomasse déchet. C'est dans ce cadre que s'inscrit la présente thèse en vue d'apporter un éclairage socio-économique sur les potentialités qu'offre cette technologie en s'interrogeant sur les conditions de développement d'une filière de gazéification de biomasse agricole dans le contexte Burkinabè. En particulier, quels sont les déterminants clés susceptibles d'expliquer le blocage de l'adoption de la gazéification au Burkina Faso. La disponibilité des résidus est-elle un facteur bloquant à l'adoption de la technologie de gazéification? Le syngas issu de ces résidus est-il compétitif avec le marché local ?

4. Objectifs et hypothèses de recherche

Au regard de la problématique de recherche, la présente thèse contribue à comprendre les échecs de la gazéification de la biomasse et les conditions nécessaires susceptibles de soutenir une relance de cette filière en s'inspirant du

succès de la pyrolyse. En d'autres termes, elle vise globalement à évaluer les conditions de déploiement de la filière de gazéification de la biomasse agricole comme source d'énergie thermique de qualité au Burkina Faso. Il s'agit spécifiquement :

- d'identifier les barrières clés à l'adoption de la gazéification de biomasse agricole ;
- de déterminer le gisement de biomasse réellement accessible pour la gazéification ;
- d'analyser la chaîne de valeur de la production de syngas par gazéification de biomasse.

Pour atteindre ces objectifs, la recherche formule trois hypothèses spécifiques, à partir de l'hypothèse principale qui est qu'il existe des conditions de déploiement de la filière de gazéification de la biomasse agricole comme source d'énergie thermique de qualité au Burkina Faso. La première hypothèse spécifique se base sur l'idée qu'il pourrait exister des facteurs liés à l'environnement social et physique de la technologie de gazéification pouvant constituer des freins à son adoption au Burkina Faso. La deuxième hypothèse soutient que l'accessibilité et la disponibilité des résidus agricoles dépendent des usages concurrentiels et de leur distribution spatiale. La troisième quant à elle, postule que les moyens logistiques et organisationnels de la chaîne de production du syngas déterminent le développement de la filière de gazéification de biomasse.

5. Méthodologie générale et plan du manuscrit de thèse

La démarche adoptée pour l'atteinte des objectifs de recherche a consisté d'abord à réaliser une revue de la littérature sur les modes de conversion énergétique de la biomasse et les différentes approches d'analyse des facteurs d'adoption des technologies, d'estimation de la disponibilité et de l'accessibilité de la biomasse agricole, et de l'analyse de la chaîne de valeur de production d'énergie. Cette investigation a permis d'adopter un cadre méthodologique pour la recherche autour des trois objectifs spécifiques.

Pour l'atteinte du premier objectif, une visite des sites d'installation de la technologie de gazéification et un benchmarking ont été réalisés auprès des utilisateurs des installations de pyrolyses, des transformateurs (trices) de riz, d'huilerie, des agents en charge de l'énergie, des personnes ressources et des experts de l'énergie. Après la collecte des données, une analyse du contenu des informations a été effectuée. Les poids des barrières ont été déterminés suivant un indice de cohérence des jugements pour identifier une hiérarchie des barrières les plus pertinentes, validée par une analyse de sensibilité.

Dans le deuxième objectif, des données issues des statistiques agricoles et de la littérature ont constitué la base de l'analyse des différents niveaux de potentiel de biomasse. Des données complémentaires ont été collectées à travers des entretiens semi-structurés auprès des producteurs agricoles, des transformatrices de riz, des agents techniques de l'agriculture et des correspondants-coton en vue de cerner les

utilisations concurrentes des résidus agricoles. Le cadre méthodologique du troisième objectif a porté notamment sur l'analyse de la chaîne de valeur basée sur des hypothèses de calcul formulées à partir du contexte du terrain.

Après l'introduction générale, objet de la présente section, le reste de la thèse est structuré en cinq chapitres suivant les objectifs de recherche fixés. Le premier chapitre concerne une recherche bibliographique sur les thématiques du sujet de thèse. En effet, les concepts relatifs à la biomasse, à ses voies de valorisation possibles et à la gazéification de biomasse y sont introduits. Après la définition des concepts relatifs au sujet de la thèse, le chapitre se focalise sur les approches potentielles d'analyse des facteurs d'adoption des innovations technologiques, sur les méthodes d'aide à la décision et sur le cadre d'évaluation de la disponibilité de la biomasse. Le deuxième chapitre décrit l'approche méthodologique adoptée pour la présente recherche. Le troisième chapitre fournit un aperçu sur l'environnement sociotechnique des cas d'étude de la gazéification et les barrières clés d'adoption de la gazéification de biomasse agricole. Le quatrième chapitre analyse la chaîne de valeur « production d'énergie par gazéification de biomasse au Burkina Faso ». Le cinquième chapitre discute les résultats les plus pertinents avant de conclure la recherche puis de souligner les implications des principaux enseignements, et d'envisager les perspectives pour des futures recherches.

1

Cadre conceptuel et théorique

Chapitre 1: Cadre conceptuel et théorique

La biomasse est l'une des sources d'énergie renouvelable la plus utilisée dans le monde. Elle fournit de la chaleur et de l'électricité grâce à des technologies de production d'énergie comme la gazéification. Ainsi, la première partie de ce chapitre présente et précise les différentes notions abordées dans la thèse afin d'en délimiter le cadre conceptuel. Il s'agit tout d'abord de spécifier les caractéristiques physiques de la biomasse et ses voies de valorisation possibles avec un accent particulier sur le procédé de gazéification. Ainsi, les concepts ayant trait à la biomasse et à ses caractéristiques fondamentales sont définis. À la suite de la description de ces concepts, les différentes voies de valorisation de la biomasse, notamment la biomasse sèche, sont introduites en mettant l'accent sur la technologie de gazéification. Pour terminer cette première section du chapitre, un état des connaissances sur la gazéification de la biomasse dans les pays en développement est présenté. Cette revue de la littérature permettra également de recenser les principaux problèmes qui empêchent le déploiement de la gazéification dans ces pays tout en mettant en exergue les lacunes de la littérature concernant l'analyse des barrières d'adoption de la gazéification. Enfin, un état des lieux sur l'environnement institutionnel et législatif en vigueur au Burkina Faso participera à la délimitation du cadre opérationnel de la recherche.

La deuxième partie de ce chapitre développe le cadre théorique de la recherche au centre duquel figurent les théories traitant de l'adoption des innovations.

Les recherches sur l'adoption des innovations abondent dans la littérature. L'analyse bibliographique montre qu'il est difficile d'examiner l'adoption des innovations sans parler de leur diffusion et vice-versa, ces deux notions étant intimement liées. Depuis les années 1960, des travaux sur les notions de diffusion et d'adoption des innovations ont été effectués dans divers domaines parmi lesquels le domaine agricole, l'économie, la sociologie, la communication, le marketing, la santé publique. Une synthèse bibliographique requiert un positionnement dans un courant de pensée cadrant avec la recherche. C'est pourquoi, cette section présente quelques modèles et approches d'analyse de la diffusion et de l'adoption des innovations technologiques disponibles dans la littérature.

La démarche méthodologique adoptée par les auteurs dans chacune des approches est également décrite tout en relevant leurs insuffisances en vue de baliser le cadre opérationnel de la présente recherche. Ce dernier sera complété par une revue des méthodes d'analyse de la disponibilité de la biomasse et par un aperçu sur les concepts de chaîne de valeur de manière générale mais aussi sur leur application aux filières de production de la bioénergie.

1.1. Cadre conceptuel

1.1.1. Définition et typologie de biomasse

La définition de la biomasse est complexe dans la littérature et diffère suivant les domaines d'application. Certains auteurs la considèrent comme étant une mesure de la production de la végétation, notamment la matière sèche, exprimée en kilogramme par jour et par hectare. Cette matière sèche décrit toute forme de végétation dépourvue de son contenu en eau (Merkovic-orenstein and Samb, 2018). Elle désigne l'ensemble des produits organiques, d'origine animale ou végétale (Basu, 2010). Pour d'autres, le terme biomasse correspond à une matière solide complexe, organique ou inorganique et biogénique, formée à partir de processus naturels et/ou anthropiques, et composée de minéraux (Vassilev et al., 2012), (Vassilev et al., 2010). Cette dernière forme de biomasse est considérée dans la présente recherche.

Les types de biomasse se distinguent selon leur teneur en humidité, le type d'utilisation et leur composition chimique (Tursi, 2019 ; Panwar, 2011). Selon la teneur en humidité, la biomasse sèche se différencie de celle humide. La biomasse sèche dérive de la forêt, des scieries, de l'agriculture, des industries agro-alimentaires, des cultures énergétiques et des formations herbacées. La biomasse humide, quant à elle, découle des effluents d'élevage, des effluents liquides des agro-industries et des déchets ménagers. Elle est associée souvent à son échelle d'utilisation à la terminologie « biomasse traditionnelle » et « biomasses modernes » (Amie Assouh et al., 2005). La biomasse dite traditionnelle correspond aux combustibles (bois de feu, résidus agricoles et forestiers) non transformés destinés à la cuisson et au chauffage domestique. Le terme « biomasse moderne » est employé pour une biomasse utilisée à l'échelle industrielle pour la production soit de chaleur, d'électricité ou de biocarburant.

De par sa composition chimique, trois catégories de biomasse se déclinent : la biomasse lignocellulosique, la biomasse à glucide et la biomasse oléagineuse. La biomasse lignocellulosique est riche en substances de structure peu hydrolysables. Elle est constituée entre autres de bois, de paille, de rafle, de tige et de coques. La biomasse à glucide, elle est riche en substances glucidiques, des déchets issus des sous-produits agricoles tels que les betteraves sucrières, les cannes à sucre, etc. La biomasse oléagineuse regroupe des déchets riches en lipides, comme les résidus issus du colza, du palmier à huile, etc.

Les propriétés de la biomasse déterminent le choix du processus de conversion et toutes les difficultés opérationnelles qui peuvent apparaître. Le choix de la source de biomasse est également dépendant de la forme de l'énergie demandée. Les principales propriétés intéressantes sont : la teneur en humidité (intrinsèque et extrinsèque), le pouvoir calorifique, la composition, les proportions de carbone et de matières volatiles, la teneur en cendres ou en résidus, la teneur en métaux alcalins et le rapport cellulose/lignine. Pour les processus de conversion « secs », les premières propriétés sont importantes, alors que pour les processus « humides », la première et la dernière propriétés sont essentielles.

1.1.2. Différents procédés de valorisation énergétique de la biomasse

La conversion énergétique de la biomasse permet de recueillir l'énergie obtenue après oxydation du combustible. Le choix d'une voie de conversion est fonction du type et de la quantité de biomasse disponible, de la forme d'énergie finale souhaitée, des conditions économiques et environnementales. Ainsi, les potentielles technologies de conversion existantes dans la littérature à savoir les voies thermochimique, biochimique et mécanique, peuvent être utilisées au Burkina Faso (Figure 2).

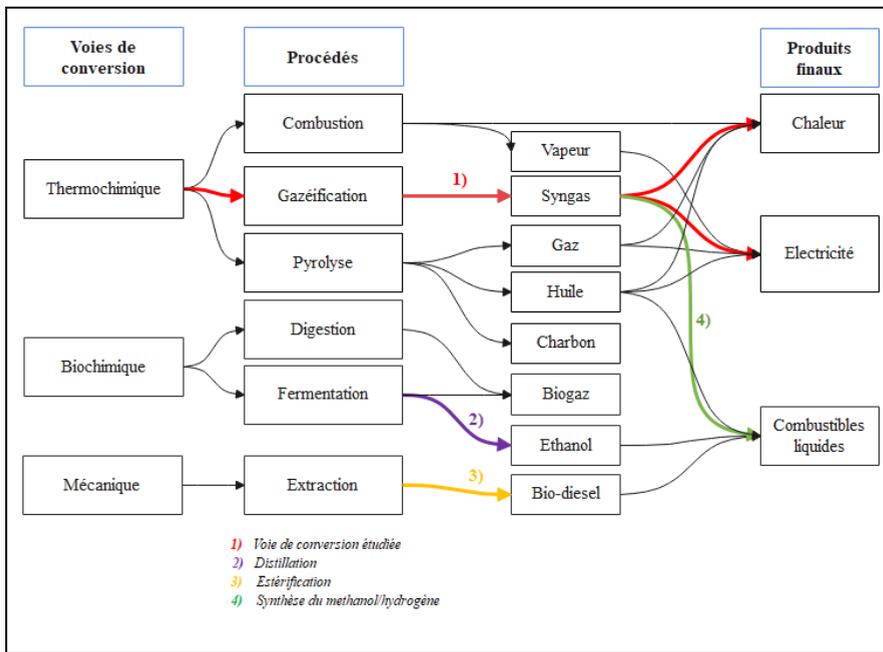


Figure 2 : Schéma de synthèse des procédés de conversion énergétique de la biomasse
Source : inspiré de Algieri et al. (2019).

La voie biochimique est la dégradation de la matière organique par une action microbienne et enzymatique. Cette voie se compose de trois procédés : la digestion anaérobie, la fermentation et la transestérification. Cette voie est utilisée pour la conversion des biomasses humides. La voie mécanique, essentiellement l'extraction, permet de produire les huiles. La voie thermochimique est un ensemble de processus intervenant sous l'action de la chaleur et produisant des changements de nature chimique. Les trois principaux procédés de conversion thermochimique de la biomasse couramment développés sont la combustion, la pyrolyse et la gazéification

(Groupe de Travail PyroGaz, 2015 ; Ademe, 2004 ; Mohan et al., 2006 ; Mermoud, 2006).

La combustion est utilisée pour convertir la biomasse en chaleur et/ou en électricité. Elle consiste à libérer, sous l'effet de la température, une matière volatile sous forme d'un mélange de vapeur d'huile et de goudrons dont la combustion produit une flamme, suivie de la combustion proprement dite où le composé de carbone réagit avec l'oxygène pour produire du dioxyde de carbone (CO₂) alors que la matière inerte se transforme en déchets solides ou en cendres. La quantité d'air détermine la qualité du gaz. Lorsqu'elle est insuffisante, la combustion est incomplète et par conséquent, il se produit un gaz toxique. Dans le cas contraire, elle emporte une partie de la chaleur dans les fumées (Koppejan and Sjaak Loo, 2012).

Le principe de la pyrolyse consiste à décomposer thermiquement la biomasse (400-700°C) en absence d'air jusqu'à la libération de la matière volatile (Tanger et al., 2013). Du point de vue étymologique, « pyro » équivaut à « feu » et « lyse » à « coupure ». Cette réaction produit des gaz permanents, des vapeurs condensables et un solide en proportion variable selon les conditions opératoires et pouvant être valorisés à différents niveaux.

La pyrolyse lente est une technique très ancienne, utilisée pour la production d'environ 35 % de charbon de bois, de 35 % de vapeurs condensables et de 30 % de gaz incondensables comme le dioxyde de carbone, le monoxyde de carbone, le dihydrogène et les hydrocarbures. Ces fractions peuvent évoluer sous certaines conditions de température et de pression. Elle sert principalement à produire le charbon, d'où son appellation de procédé de carbonisation. Ce charbon est généralement destiné à l'usage domestique et industriel.

Les techniques et les matériels développés pour la production de charbon de bois sont connus depuis de très nombreuses années. On distingue trois modes opératoires de carbonisation à savoir la carbonisation par combustion partielle où l'énergie nécessaire à la carbonisation est fournie par la combustion d'une partie de la charge ; la carbonisation par chauffage externe au cours de laquelle l'énergie nécessaire est fournie à la charge par un foyer de chauffage externe, par l'intermédiaire d'une surface d'échange, et la carbonisation par contact de gaz chauds où l'énergie est fournie par la mise en contact direct de la charge et d'un gaz chaud provenant d'un foyer externe.

La pyrolyse dite rapide ou flash a pour objectif la production d'un produit liquide énergiquement ou chimiquement valorisable. Elle donne des produits différents de la pyrolyse lente. Les particules sont soumises à un fort gradient de température dans un temps extrêmement court et les vapeurs formées sont refroidies très rapidement pour éviter les recombinaisons et les craquages. Le chauffage rapide produit peu de charbon, essentiellement des composés liquides et ou gazeux selon le temps de séjour dans le réacteur (Alauddin et al., 2010).

Le concept de pyrolyse rapide est apparu dans les années 1970 après le premier choc pétrolier, l'objectif étant alors la production de gaz. Les gaz obtenus par pyrolyse présentent un pouvoir calorifique plus important que celui obtenu dans

certaines procédés classiques de gazéification. Plus tard en début des années 1980, les orientations de la pyrolyse rapide ont progressivement évolué vers la production de liquides. L'ablation consiste à imposer un contact plus ou moins direct entre la biomasse et une surface chaude en mouvement relatif permettant d'éliminer les produits primaires de pyrolyse. Les procédés ablatifs, qui permettent l'utilisation de fortes granulométries, ont montré que la pyrolyse rapide peut aboutir à d'importants rendements en liquides, qui sont en fait les produits primaires. À partir de ce moment, la pyrolyse rapide fut, plutôt destinée à la production de liquides ou bio-oil. Cette conception de la pyrolyse rapide est celle prévalant actuellement même si des études plus récentes ont prouvé que, sous certaines conditions, certains procédés sont susceptibles d'être orientés vers une production maximale de gaz rejoignant ainsi les objectifs des années 70.

La composition typique des différents produits obtenus dans le cas de la pyrolyse rapide de la matière sèche est la suivante :

- 40 - 65 % de vapeur condensable hors eau
- 10 - 20 % de charbon
- 5 - 25 % de gaz
- 10 - 20 % d'eau

Ces valeurs moyennes varient selon le type de réacteur. Par exemple, le réacteur cyclone permet d'obtenir entre 3 à 5 % de charbon et plus de gaz ou de vapeurs condensables.

L'augmentation de la production de charbon est due aux conditions opératoires telles que l'augmentation de la taille des particules et de la pression de travail, la diminution de température finale et de la vitesse de chauffage du réacteur. Inversement, ces conditions fournissent des huiles de pyrolyse. Il s'agit essentiellement de la diminution de la taille des particules pour les procédés en lits fluidisés ou transportés, de l'augmentation de la vitesse de chauffage jusqu'à des températures de 450 - 550°C et de la réduction du temps de séjour des vapeurs dans le réacteur. Les huiles contiennent une proportion d'eau importante, soit 20 % de la production globale de la pyrolyse, sans considérer l'eau de l'humidité initiale de la biomasse. Des réactions secondaires des vapeurs produisent le gaz sous condition d'augmenter le temps de séjour des vapeurs avec une température supérieure à 500°C.

La technologie de pyrolyse s'appuie sur des décennies d'expérience avec la gazéification du charbon.

La gazéification est considérée comme un procédé de conversion de la matière solide à base de carbone (charbon, bois, paille, etc.) en gaz de synthèse ou syngas, composé de dihydrogène (H_2), de l'oxyde de carbone (CO), de dioxyde de carbone (CO_2) et du méthane (CH_4) (Wang et al., 2008). La transformation s'effectue sous l'effet d'un agent de gazéification (air, oxygène, vapeur) en quantité limitée, afin d'éviter la combustion complète, et à une haute température variant entre 500 et 1000°C en fonction de la technologie (Ciferno & Maran, 2002 ;

Ajay Kumar et al., 2009). Elle peut donc être considérée comme une optimisation de la pyrolyse afin d'améliorer le rendement en gaz. En remplaçant l'air par l'oxygène comme agent de gazéification, l'azote est éliminé et favorise la production de gaz à haut pouvoir calorifique. La vitesse de chauffage, la conception du réacteur et le post-traitement des gaz sont les principales barrières de contrôle de la production de produits gazeux propres et de haute qualité issus de la gazéification (Alauddin et al., 2010).

Parmi ces procédés thermo-chimiques, la gazéification offre de meilleurs rendements thermiques et électriques pour les niveaux de puissance requis en production décentralisée aussi bien pour l'alimentation des entreprises isolées que pour les mini-réseaux publics. La présente recherche étant orientée vers l'amélioration des besoins en chaleur pour les agro-industries du Burkina Faso, les filières de conversion thermo-chimique et en particulier la gazéification fera l'objet de plus d'investigation.

Le procédé de gazéification se décompose en plusieurs étapes à savoir le séchage et la pyrolyse de la biomasse, l'oxydation des matières volatiles, le craquage et reformage des goudrons, et la gazéification du char (Ciferno and Marano, 2002).

Lors de l'étape de séchage, la biomasse a généralement un taux d'humidité supérieur à 10 % (massique sur base humide). De ce fait, une étape de séchage intervient au sein même du réacteur de gazéification, pendant la montée en température. Cette étape dépend du taux d'humidité de la biomasse, car elle influence considérablement le procédé de gazéification et notamment les rendements énergétiques. La vapeur d'eau produite joue également un rôle important en ce sens qu'elle constitue un réactif pour les étapes ultérieures de reformage des gaz et de gazéification du char. Pour des biomasses très humides avec des taux d'humidité au-delà de 30 %, un séchage préalable en amont du procédé est nécessaire afin d'abaisser le taux d'humidité à une teneur acceptable pour le réacteur de gazéification.

Pendant l'étape de pyrolyse, la biomasse est chauffée sous atmosphère inerte jusqu'à une température de l'ordre de 500°C. Ainsi, les divers constituants de la biomasse se dégradent à différents niveaux de température : entre 200°C et 350°C, les hémicelluloses ; entre 250 et 400°C, la cellulose et entre 200 et 500°C, les lignines. Des matières volatiles et un résidu poreux carboné appelé le char sont ainsi produits. Les matières volatiles regroupent des gaz incondensables essentiellement le monoxyde de carbone (CO), le dioxyde de carbone (CO₂), le dihydrogène (H₂), le méthane (CH₄), l'acétylène (C₂H₂), l'éthylène (C₂H₄), l'éthane (C₂H₆), et des gaz condensables tels que la vapeur d'eau et les goudrons. Ces derniers sont des composés organiques, condensables à des températures inférieures à 300 - 400°C. Trois sortes de goudrons se distinguent. Les goudrons primaires (furane, furfural, levoglucosane) qui sont issus de la première décomposition des celluloses, des lignines et des hémicelluloses (pyrolyse) ; les goudrons secondaires (phénol, pyridine) qui proviennent de la conversion des goudrons primaires ; et les goudrons tertiaires constitués d'aromatiques alkylés, d'hydrocarbures aromatiques polycycliques, de naphthalènes, de fluoranthènes, et de chrysènes, qui sont issus de la

conversion des goudrons secondaires. Durant cette étape, les matières volatiles produites lors de la phase de pyrolyse sont oxydées grâce à un apport d'air (ou d'oxygène) générant ainsi la majeure part de l'énergie nécessaire au procédé de gazéification.

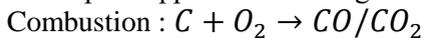
La présence de goudrons pose des problèmes d'encrassement et de corrosion lors de la valorisation du gaz de synthèse dans les moteurs et d'empoisonnement des catalyseurs dans les procédés de synthèse de biocarburant. Leur élimination est dès lors nécessaire. Cette élimination des goudrons peut être réalisée in situ ou en aval du procédé. Sous l'effet de la température, les goudrons constitués généralement de molécules lourdes se fractionnent en molécules plus légères. Ainsi, on parle de phénomène de craquage. Le craquage homogène des goudrons se déroule en phase gazeuse et à des températures élevées supérieures à 1 200°C. Le craquage hétérogène est réalisé au contact d'un catalyseur à des températures moindres comprises entre 700 et 1 000°C. Le reformage est un autre processus de conversion des goudrons en présence de gaz. Sous l'effet de la température supérieure à 1 000°C, les molécules de goudrons réagissent avec la vapeur d'eau, du dioxyde de carbone ou de l'air pour former du CO et de l'H₂.

L'étape de la gazéification hétérogène du char correspond à la réaction de la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone, issus des étapes précédentes avec le carbone du char selon les deux principales réactions hétérogènes suivantes :

- Gazéification à la vapeur d'eau : $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$
- Gazéification au dioxyde de carbone : $C + CO_2 \rightarrow 2CO$

Ces réactions sont endothermiques et permettent la production d'hydrogène et de monoxyde de carbone.

L'oxygène résiduel de l'étape d'oxydation des matières volatiles réagit avec le carbone pour apporter de l'énergie au procédé.



Par ailleurs, d'autres réactions ont lieu en phase homogène et contrôlent la composition finale du gaz de synthèse dont la réaction du gaz à l'eau, ou Water-Gas-Shift réaction : $CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$

Les étapes présentées précédemment peuvent se dérouler en parallèle ou en série selon le procédé de gazéification considéré. En effet, les procédés de gazéification se différencient de par les conditions de leur fonctionnement, l'échelle de fonctionnement, la manière de fournir la chaleur pour soutenir les réactions endothermiques primaires, la taille et le type de biomasse, et l'usage potentiel du gaz à produire. Néanmoins, la manière la plus fréquente de catégoriser les gazogènes repose sur leur fonctionnement de base. Ainsi, différents groupes de procédés de gazéification se distinguent à savoir les procédés à lit fixe et les procédés à lit fluidisés (Thomson et al., 2020 ; Lan et al., 2015). La différence réside sur les moyens supportant le combustible solide dans le réacteur, le sens de l'écoulement de la charge et de l'oxydant, et la source de la chaleur fournie au réacteur.

Dans les procédés à lit fixe, les réacteurs sont fermés ou semi-fermés. Ces réacteurs sont employés essentiellement pour des installations de faibles puissances, au-dessus de 2 MWth. Selon le sens de l'écoulement de la charge solide par rapport à celui de l'agent de gazéification qui est habituellement introduit à la base du réacteur vertical, on distingue les lits fixes à contre-courant ou ascendant (updraft) et ceux à co-courant ou descendant (downdraft).

Dans les procédés à lit fluidisé, les différents mécanismes (séchage, pyrolyse et oxydation) ont lieu dans la même zone du réacteur. Les conditions opératoires sont bien maîtrisées avec des vitesses de réaction plus importantes que dans les procédés à lit fixe. Les particules de la biomasse doivent être de petite taille (2 à 5 mm). Le gaz produit, fortement chargé en particules, subit des traitements avant sa valorisation. Ces procédés impliquent une puissance supérieure à 10 MWth pour une rentabilité acceptable.

Les réacteurs à flux entraîné, dans lesquels la gazéification est opérée en présence d'oxygène afin d'atteindre des températures de réaction très élevées d'environ 1 500°C. Le solide, finement broyé, est rapidement transporté à travers le réacteur par l'écoulement gazeux réactif. Les réacteurs à lit entraîné ne sont crédibles économiquement que pour des puissances générées très importantes, supérieures à 100 MWth. Ce sont les plus adaptés pour la production de biocarburants en raison de la qualité des gaz produits. Toutefois, les réactions d'oxydation des goudrons conduisent à la formation des particules solides composées essentiellement de carbone.

Chaque type de réacteur impose des contraintes vis à vis des propriétés de la matière première entrante en termes de granulométrie, densité, humidité, etc. Par exemple, les lits fixes requièrent des particules relativement grossières et tolèrent une certaine teneur en eau de la biomasse alors que les réacteurs à flux entraîné exigent une granulométrie inférieure au millimètre et un produit entrant sec.

L'application en aval impose naturellement des exigences vis-à-vis de la qualité du gaz de synthèse en termes de composition, et de teneurs en goudrons, poussières et autres produits indésirables. Une pression totale élevée peut également être un critère de choix, notamment pour réduire la taille des réacteurs et/ou si la valorisation en aval requiert un certain niveau, comme c'est le cas pour les turbines à gaz ou les réacteurs de synthèse.

1.1.3. Retour d'expérience de gazéification dans les pays en développement

Le concept de gazéification est apparu pour la première fois dans une communication scientifique réalisée à Londres par Sir Charles William Siemens en 1868. Vingt ans plus tard, Mendeleïev, un chimiste russe, reprend le principe de gazéification. En 1912, une première expérience dans une mine est organisée. À la suite de cette expérience, des résultats encourageants sont obtenus, mais les travaux sont interrompus par la première guerre mondiale. De 1933 à 1940, des essais commencent en Union soviétique dans cinq stations expérimentales. Mais quelques années plus tard, ces essais sont interrompus par la deuxième guerre mondiale.

L'histoire de la gazéification se subdivise alors en quatre périodes (Franchi, 2015). La gazéification est apparue en Europe, sous l'époque de la production de gaz de ville utilisé pour l'éclairage urbain à partir de charbon minéral, au XIX^e siècle. Plus tard dans les années 1920, le premier gazogène au bois a vu le jour. Cette technologie s'est développée pendant la seconde guerre mondiale pour pallier à la pénurie de pétrole. L'utilisation accrue de cette technologie s'est vite paralysée avec l'abondance et la baisse du prix du pétrole à la fin de la guerre de Kippour. Depuis la fin du XX^e et le début du XXI^e siècle, la gazéification, notamment de la biomasse, est réapparue pour faire face aux problèmes énergétiques et contribuer à l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre. La technologie de gazéification venait toujours en alternative pour palier à un déficit énergétique.

La technologie de gazéification de biomasse a été principalement appliquée dans trois domaines. Le premier est la gazéification des déchets combinée à un équipement de chauffage. Dans ce cas, le charbon ou le pétrole peut être remplacé par le gaz produit et ainsi bénéficier d'une économie d'énergie. La seconde est la gazéification des déchets agricoles notamment la paille pour la cuisson domestique. Ce système produit du gaz de cuisson domestique et d'alimentation des zones rurales en établissant de petites stations-services avec un réseau de canalisation. Cette technologie joue un rôle important dans l'amélioration des conditions de vie des populations des pays en développement. Le troisième est le système de production de gaz par gazéification de différents types de biomasse à n'importe quelle échelle. Le gaz issu de tel système peut fournir de la chaleur et de l'électricité pour les applications domestiques et industrielles de petite taille, en particulier dans les zones rurales, telles que les rizeries, les scieries et la transformation des aliments. Cette technologie de transformation de biomasse la plus prometteuse est appliquée dans les pays en développement en raison de sa flexibilité et de son économie.

Plusieurs études ont relevé l'état de lieux du développement de la technologie de gazéification sur le plan mondial (Kirkels & Verbong, 2011 ; Situmorang et al., 2020 ; Narnaware & Panwar, 2022). Dans les pays en développement comme l'Asie et l'Afrique, la gazéification est de plus en plus vulgarisée pour contribuer une couverture énergétique durable (Chang et al., 2016 ; Brew-Hammond & Kemausuor, 2008).

La Chine est l'un des pays asiatiques le plus utilisateur de la technologie de gazéification. Cette technologie servait au début à convertir le charbon en énergie et en produits chimiques. Mais le pays dispose d'importantes ressources en biomasse agricole et forestière qui étaient brûlées à l'extérieur ou laissées pourrir naturellement, entraînant de graves problèmes environnementaux. C'est dans le souci de réutiliser ces déchets, qu'en 1960 la Chine a mis au point une centrale électrique de gazéification de balles de riz de 60 kW. Par la suite, des technologies de grandes capacités de 160 à 200 kW ont été appliquées pour convertir en plus des balles de riz, d'autres types de biomasse comme les tiges de maïs, la paille de riz, les déchets de sciure de bois, les coques d'arachide.

En Inde, la technologie de gazéification de biomasse s'est très vite développée après la première installation de 1988 conçue par « Indian Institute of Science ». C'est une technologie d'une capacité de 3,75 kWe destinée à produire l'électricité pour l'éclairage domestique et publique, et l'alimentation en eau potable par la canalisation de 45 foyers. Neuf ans plus tard, on assiste à une augmentation des installations avec le renforcement de la capacité de l'installation pilote à 20 kWe et la construction de cinq autres systèmes de gazéification de biomasse d'une capacité de 100 kWe chacun pour l'électrification de cinq villages de plus de 10 000 habitants sur l'île de Gosaba dans les Sundarbans, au Bengale occidental, à environ 115 km de Calcutta. Il s'en est suivi la mise en œuvre de nombreux projets grâce au soutien du gouvernement, du Ministère des Énergies Nouvelles et Renouvelables (MNRE) entrant dans le cadre du Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD) (Narnaware & Panwar, 2022 ; Dasappa et al., 2011).

Au Japon, l'intérêt d'utilisation de l'énergie à partir de la biomasse a débuté après la crise pétrolière de 1970. Depuis 2002, plusieurs centrales de gazéification de biomasse d'une capacité allant de 35 à 200 kW ont été installées pour l'électrification des régions du Japon. En revanche, de récentes études ont relevé l'état actuel du développement de la technologie. Il ressort que le nombre de projets de gazéification est en baisse à cause des difficultés techniques (Baba et al., 2020). Furutani et al. (2017) ont examiné la situation opérationnelle des centrales de gazéification dans cinq villes dont Murayama City, Chichibu City, Ueno Village, Oshu City et Yamaguchi City. Seule l'usine de gazéification de biomasse de Chichibu était non fonctionnelle. Les autres usines de gazéification avec cogénération sont exploitées avec succès. Ainsi, favoriser l'utilisation efficace de la chaleur pour la fonte des neiges, le séchage du bois et l'alimentation en eau chaude des champignonnières et des serres ont été possibles. Cependant, des pertes de chaleur sont générées pendant le transport, et l'utilisation de la chaleur est donc limitée à la zone environnante.

En Thaïlande, 14 centrales de gazéification de biomasse d'une capacité totale de 5,4 MWe ont été installées en 2011. Au-delà de l'importance des ressources en biomasse, les projets de gazéification sont soutenus par le gouvernement à travers une bonne tarification du prix de l'énergie (Situmorang et al., 2020). Mais le développement des technologies y est toujours en cours. Les épis de maïs, les balles de riz, les copeaux de bois, le charbon et le bois sont les résidus couramment utilisés.

Le Bangladesh possède également un potentiel important en biomasse pour la production d'énergie (Das and Hoque, 2014). Cependant, la gazéification y est mal développée car le pays privilégie le développement du biogaz avec plus de 22 000 usines de biogaz installées. Seulement deux technologies de gazéification de balles de riz d'une capacité de 125 kWe ont été mises en place dans le village de Gaspur à Kapasia du district de Gazipur. Mais ce projet a connu des difficultés liées au manque de main d'œuvre locale qualifiée, des directives inappropriées, à la mauvaise gestion, au manque de contrôle gouvernemental et à des problèmes techniques et financiers (Situmorang et al., 2020).

La technologie de gazéification devrait normalement réussir en Afrique compte tenu de la disponibilité des ressources en biomasse. Malheureusement, de nombreux pays africains rencontrent encore d'énormes difficultés avec leur système de production d'énergie. L'utilisation de la gazéification de biomasse en Afrique a débuté avec la mise en circulation des véhicules à gazogène. En 1924, un car à gazogène ralliait Mananjary à Tananarive à Madagascar. En 1929, des camions de 5 tonnes fonctionnaient avec des gazogènes en Oubangui-Chari. Jusqu'en 1948, plusieurs villes d'Abidjan et de Conakry avaient l'électricité issue de la gazéification avec une mobilité urbaine facilitée par la mise en circulation des cars à gazogène (Guillard, 2002). Plus tard dans les années 70, la coopération Mali-Chine a également permis l'installation des gazogènes de marque chinoise à Dogofry et à N'Dedougou au Mali dont la fiabilité avait été démontrée. Une autre usine de gazéification à base de balle de riz a été installée à Molodo au Mali en 1986 dans le cadre d'une collaboration avec l'Allemagne et la Chine. Cependant, les performances de la technologie étaient mitigées impliquant une main d'œuvre qualifiée pour garantir son bon fonctionnement. Un technicien chinois devait constamment la superviser. Il était le seul habilité à résoudre les problèmes techniques spécifiques à l'épuration des gaz. Par conséquent, la reproductibilité et la durabilité à long terme n'ont pas été atteintes (Dimpl, 2011). En 2006, une centrale de gazéification d'une capacité d'environ 10 kWe a été introduite à Mukono en Ouganda pour produire de l'énergie à base d'eucalyptus (Situmorang et al., 2020). Par la suite, en 2010, de plus grandes centrales de capacités supérieures à 30 kW ont été installées en Afrique du Sud, en Tanzanie, en Ouganda et au Burundi. D'autres travaux ont discuté du potentiel de production d'électricité par gazéification de biomasse dans les pays africains sans implantation (Ocquaye, 2012).

Les différents facteurs du déploiement de la gazéification de biomasse sont organisés en divers groupes à savoir les obstacles d'ordre institutionnel, informationnel, financier, politique et commercial (Sansaniwal et al., 2017). Plusieurs auteurs ont démontré que dans certains pays comme la Chine, le problème de pollution, la compétitivité de l'électricité produite par le combustible classique, le problème de la transmission de l'électricité dans le réseau électrique local et l'échelle du système influencent la faisabilité économique et environnementale de la technologie (Leung et al., 2004 ; Abatzoglou et al., 2000). Zhang et al. (2013) ont constaté qu'en Chine le développement et la commercialisation de la gazéification sont limités en raison de son faible avantage économique dû aux charges liées à l'investissement initial, du coût d'exploitation annuel, de la gestion et de la politique. Le coût d'investissement initial de la technologie comprend le coût de construction du site, une unité de préparation de la biomasse, un réacteur de gazéification, un générateur modifié, un réseau électrique et des subventions pour la diffusion et la commercialisation de la technologie (Alauddin et al., 2010 ; Sansaniwal et al., 2017). Le coût élevé de la biomasse et le problème de goudron observé chez les petites unités ont empêché le développement de la technologie

(Zhou et al., 2012). La politique de subventions du gouvernement est cruciale pour le développement de la production d'énergie par gazéification de biomasse. Elle a suscité d'autres réponses inattendues en créant des incitations autour de la mobilisation de la biomasse. Le coût de la biomasse a connu une rapide augmentation allant jusqu'à 70 % du coût total en Chine, induisant un accroissement du coût de production d'électricité d'environ 50 % et l'arrêt des technologies de gazéification. Les obstacles financiers sont liés aux coûts élevés d'investissement, de maintenance et de recherche (Sansaniwal et al., 2017). Alors que les subventions étant trop faibles, ne parviennent pas à combler l'écart entre le niveau de l'aide financière et le coût de production, laissant les projets à court de fonds (Akbi, 2017). La multitude de recherches sur les facteurs de développement de la technologie de gazéification s'est limitée à une description générique, sans une investigation approfondie du poids de chaque facteur (Asadullah, 2014; Ruiz et al., 2013; Sansaniwal et al., 2017).

1.1.4. Les aspects législatifs et réglementaires des énergies renouvelables au Burkina Faso

Le secteur de l'énergie au Burkina Faso a connu de grandes réformes ces dernières années, en vue de mettre un accent particulier sur l'accroissement de la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique et de promouvoir l'efficacité énergétique. En effet, le pays a élaboré un plan d'actions national pour les énergies renouvelables (PANER), un plan d'actions national pour l'efficacité énergétique (PANEE) et un agenda d'actions SE4ALL.

En 2008, le programme national pour le développement et la promotion des digesteurs domestiques a été initié en partenariat avec l'ONG Néerlandaise (Netherlands Development Organization : SNV). Il a été conduit sous la tutelle du ministère de l'Élevage. Les premières mesures politiques favorisant le développement des énergies renouvelables seront mises en place cinq ans plus tard. En 2013, l'État supprime les taxes à l'importation sur l'ensemble du matériel photovoltaïque, conduisant à une baisse des prix de 30 à 40 %. L'idée de création de l'Agence Nationale des Énergies Renouvelables et de l'Efficacité Énergétique (ANEREE) a été également émise. Toutefois, il faudra attendre une nouvelle législature pour la mise en place effective d'une politique visant à promouvoir les énergies renouvelables. En 2015, le nouveau gouvernement effectue une réforme du ministère de l'Énergie, des mines et des carrières en créant un Ministère spécifique à l'énergie. Ce Ministère comprend trois directions générales dont celle des énergies conventionnelles, celle des énergies renouvelables et celle pour l'efficacité énergétique. Par la suite, un vaste Plan National de Développement Économique et Social (PNDES) voit le jour. Celui-ci s'inscrit dans le cadre des politiques énergétiques de la Communauté économique des États de l'Afrique de l'Ouest (CEDEAO). Ce plan comprend notamment l'installation de panneaux photovoltaïques dans l'ensemble des bâtiments des ministères ainsi que dans les centres de santé et de promotion sociale. Il prévoit également le remplacement de

l'éclairage public et de l'éclairage des bâtiments des ministères par des lampes économiques. De nos jours, l'utilisation des lampes dans les ministères est effective.

En octobre 2016, l'ANEREE voit enfin le jour. En tant que structure technique dans la mise en place du PNDES, elle est responsable de la sensibilisation, de la promotion, de l'implémentation du plan au niveau des communes, des formations, des certifications, des contrôles qualités, de la gestion des centrales et mini centrales solaires, etc.

En avril 2017, une loi sur la réglementation des énergies renouvelables a été adoptée pour autoriser les particuliers à réinjecter sur le réseau et à revendre à la SONABEL leur surplus de production électrique. Cette loi met fin au monopole de production d'électricité de cette société d'État. Elle comprend également la création d'une Agence Burkinabè pour l'Electrification Rurale (ABER). Elle devrait être chargée de l'installation de mini centrales de panneaux photovoltaïques afin d'offrir un accès à l'électricité dans les villages. Enfin, un décret se basant sur cette même loi oblige les entreprises à faire un audit énergétique chaque année.

L'Article 57 de cette loi « *La production, l'importation de matériel et équipement des énergies renouvelables bénéficient de mesures fiscales et douanières incitatives* » favorise le déploiement des énergies renouvelables notamment la biomasse à l'exception du bois et ses dérivés. Ainsi, le nombre de bio-digesteurs installés a fortement augmenté, soit 4 013 bio-digesteurs installés de 2009 à 2014 et plus de 18 000 installations en 2017 (MEEVCC/SP-CNDD, 2017).

Le bio-digesteur est un ouvrage de production d'énergie renouvelable par la fermentation de déchets organiques. Il contribue à l'offre énergétique en mettant à la disposition des populations rurales et péri-urbaines du biogaz pour la cuisson des aliments et l'éclairage, et du compost pour améliorer la productivité agricole et de la production animale. La technologie des bio-digesteurs est construite avec des matériaux locaux par des maçons burkinabés dont la main d'œuvre est prise en charge. Leur durée de vie est estimée à 20 ans. Le programme a impliqué plusieurs acteurs 383 maçons formés, 150 entrepreneurs ruraux actifs ; 8 coopératives de maçons créées ; 2 555 000 m³ de biogaz produit par an soit l'équivalent de 103 600 bouteilles de gaz butane de 12,5 kilogrammes correspondant à environ 55 hectares de forêt épargnés.

Malgré l'impact positif de la technologie, son développement s'est confronté à plusieurs barrières parmi lesquelles les barrières institutionnelles, économiques, financières et socioculturelles. Du point de vue économique et financier, la faible capacité financière des populations rurales apparaît comme la principale barrière à la diffusion des biodigesteurs. En effet, le coût de réalisation d'un bio-digesteur est estimé à 320 000 FCFA, soit environ 487 € pour une unité de 6 mètres cube. Comme stratégie, l'Etat prend en charge sous forme de subvention la main d'œuvre du maçon et le matériel spécifique (foyer, lampe, peinture, tuyauterie, etc.), évaluées à 160 000 FCFA, le bénéficiaire de la technologie doit mobiliser l'équivalent de 160.000 FCFA dont 86 000 F, soit 27 % en espèces (MEEVCC/SP-CNDD, 2017).

Les barrières institutionnelles quant à elles, sont liées au cadre institutionnel de mise en œuvre du Programme National de Bio-digesteurs du Burkina Faso, marqué par une insuffisante implication de tous les relais potentiels du Programme sur le terrain, le cloisonnement des projets et programmes des départements ministériels agissant dans le monde rural, l'insuffisante implication des collectivités territoriales et des contraintes liées au financement de la stratégie de communication du Programme. Les barrières socioculturelles sont illustrées par la résistance au changement des populations rurales et de pratiques non courantes au milieu. Cette résistance au changement est sous-tendue par certains facteurs qui influencent l'attitude des groupes ciblés comme la manutention des déchets, le problème d'alimentation en eau des digesteurs, l'utilisation du gaz pour cuisiner allant à l'encontre des habitudes culturelles.

1.1.5. Les aspects institutionnels du secteur de l'énergie au Burkina Faso

Le ministère de l'énergie a la responsabilité du pilotage des actions de l'État en matière de politique énergétique. Il est chargé en outre de l'élaboration et de l'application de la législation et de la réglementation en matière de recherche, de production, d'approvisionnement et de distribution des produits énergétiques, du contrôle de la production, de l'approvisionnement et de la distribution des énergies conventionnelles en relation avec les Ministres chargés de l'environnement et de l'eau, de la promotion des énergies nouvelles et renouvelables et des économies d'énergie. La loi 014–2017/AN du 20 avril 2007 portant la réglementation générale du secteur de l'énergie fixe le nouveau cadre organisationnel du secteur de l'énergie et le rôle des acteurs en introduisant notamment la structure en charge de la régulation du secteur de l'énergie, l'Autorité de régulation de secteur de l'énergie (ARSE).

Le ministère de l'énergie est composé de trois directions générales, la Direction générale des énergies conventionnelles (DGEC), la Direction générale de l'efficacité énergétique (DGEE) et la Direction générale des énergies renouvelables (DGER) qui tend à évoluer pour le développement du secteur électrique en vue de maîtriser l'utilisation des hydrocarbures et favoriser le développement d'alternatives renouvelables.

Le ministère comporte trois structures rattachées, l'Agence Burkinabè de l'électrification rurale (ABER), l'Agence des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique (ANEREE) et enfin la Société nationale d'électricité du Burkina Faso (SONABEL).

La SONABEL est une société gérée par l'État en vertu du décret (n°97599/PRES/PM/MEM/MCIA) approuvé le 31 décembre 1997 et relevant du ministère de l'énergie. La SONABEL est actuellement responsable de la production, de l'importation, du transport et de la distribution de l'électricité pour les localités situées dans les secteurs desservis. Elle possède en son sein un département de normalisation, environnement et sécurité responsable notamment du respect des normes et de la législation en matière environnementale et sociale ainsi que de la

protection de l'environnement tout comme de la santé et la sécurité des employés et des communautés riveraines dans la mise en œuvre de ces activités. Par ailleurs, par le biais de la loi 014–2017/AN, la SONABEL confirme son monopole dans le domaine du transport d'électricité pour s'installer comme le seul gestionnaire du réseau de transport.

1.2. Cadre théorique

1.2.1. La théorie de l'action raisonnée

La théorie de l'action raisonnée est un modèle psycho-sociologique. Elle est développée par Fishbein & Ajzen (1975) pour définir les liens entre les croyances, les attitudes, les normes, les intentions et les comportements des individus. Selon ce modèle, le comportement d'une personne est fonction de son intention comportementale à l'adopter. Cette intention serait quant à elle déterminée par l'attitude de la personne et par ses normes subjectives relatives au comportement en question. Les normes subjectives représentent la perception de l'individu sur le fait que la plupart des personnes qu'il juge importantes, soient d'avis qu'il devrait ou pas effectuer ce comportement. Quant à l'attitude d'une personne envers un comportement, elle est déterminée par ses croyances envers les conséquences de ce comportement multipliées par son évaluation de ces conséquences. Les croyances sont définies par la probabilité subjective de l'individu sur le fait qu'effectuer un comportement particulier va produire des résultats spécifiques. Ce modèle se base donc sur le postulat que les stimuli externes influencent les attitudes et cela en modifiant la structure des croyances de l'individu. Par ailleurs, l'intention d'effectuer un comportement est également déterminée par les normes subjectives qui sont elles-mêmes déterminées par les croyances normatives d'un individu et par sa motivation à se plier aux normes.

La théorie de l'action raisonnée postule également que tous les autres facteurs qui influencent le comportement le font uniquement de manière indirecte, et cela, en influençant l'attitude ou les normes subjectives. Fishbein & Ajzen (1975) se réfèrent à ces facteurs comme étant des variables externes. On y retrouve par exemple, les caractéristiques des tâches, de l'interface ou de l'utilisateur, la nature du développement ou de l'implémentation, les influences politiques, la structure organisationnelle, etc. (Davis et al., 1989). La théorie de l'action raisonnée était appliquée au préalable dans le domaine de la santé pour comprendre les comportements liés à la santé. Mais elle s'adapte à n'importe quel contexte pour comprendre le comportement humain. L'application de la théorie a démontré qu'elle permettait d'effectuer de bonnes prédictions sur la réaction d'un individu face à plusieurs alternatives (Sheppard, Hartwick, and Warshaw, 1988). Pourtant ces prédictions nécessitent certaines conditions permettant l'accomplissement d'un comportement. En effet, les attitudes et les comportements ne sont toujours pas liés aux intentions. Les comportements humains peuvent relever de l'inné, de la construction biologique et naturelle de l'individu (Nguyen et al., 2019).

1.2.2. Le modèle d'acceptation de la technologie

Le modèle d'acceptation de la technologie a été développé par Davis (1989) à partir de celui de l'action raisonnée, dans l'optique de prédire l'acceptabilité des nouvelles technologies par les utilisateurs. Ce modèle postule que l'acceptabilité d'un système d'information est déterminée par la perception de l'utilité et la perception de la facilité d'utilisation. Ainsi, l'auteur considère l'utilité perçue comme l'étape où une personne fait confiance à certaines technologies qui amélioreront ses performances au travail. Les variables externes considérées sont celles qui affectent l'utilité perçue, la facilité d'utilisation perçue et l'attitude à l'égard de l'utilisation des nouvelles technologies. L'intention comportementale est déterminée par l'attitude de l'utilisateur envers l'utilisation de la technologie. Ce modèle stipule que lorsqu'un utilisateur découvre une nouvelle technologie, plusieurs facteurs influencent sa décision de l'utiliser. Il fournit une base avec laquelle les utilisateurs retracent comment les variables externes influencent leur croyance, leur attitude et leur intention d'utiliser la nouvelle technologie qui leur est présentée. Le modèle suggère que l'utilité et la facilité d'utilisation sont des facteurs essentiels pour déterminer les attitudes des consommateurs envers l'adoption de nouvelles technologies (Malhotra and Galletta, 1999). Bien qu'il soit utilisé initialement pour décrire l'utilisation de la technologie dans l'organisation, les constructions du modèle ont été largement adoptées pour un usage général et universel (Marangunić & Granić, 2015 ; Jin et al., 2020 ; Malik & Ayop, 2020). Toutefois, ce modèle d'acceptation des technologies présente des insuffisances telles que l'exclusion de l'influence sociale dans l'adoption et l'utilisation des nouveaux systèmes d'information et sa faible possibilité de prédire le temps consacré à l'utilisation et le nombre d'utilisations durant une période par rapport à la simple prédiction d'utilisation (Atarodi, Berardi, and Toniolo, 2019).

1.2.3. La théorie de diffusion de l'innovation

La diffusion de l'innovation fut étudiée pour la première fois par le sociologue français Gabriel Tarde à la fin du XIX^e siècle (Kinnunen, 1996) et par les anthropologues allemands et autrichiens tels que Friedrich Ratzel et Lion Frobenius (Spier, 1929).

Rogers définit une innovation comme une idée ou une pratique, perçue comme nouvelle par un individu ou toute autre unité d'adoption. Plusieurs catégories d'innovation existent dans la littérature à savoir l'innovation sociale, l'innovation de procédés, l'innovation de services, l'innovation organisationnelle, l'innovation de produit etc. (OCDE, 2005). L'innovation sociale est envisagée pour désigner l'innovation technologique et l'innovation organisationnelle par opposition à l'innovation économique. Cette dernière est extérieure et complémentaire à l'innovation sociale (Djellal and Gallouj, 2012).

Pour faire face à certaines difficultés, plusieurs technologies sont mises en place par des développeurs ou par des chercheurs en vue d'offrir de nouvelles solutions,

donnant lieu à une innovation technologique. Une technologie est une conception pour l'action instrumentale qui réduit l'incertitude dans les rapports de cause à effet impliqués pour réaliser des résultats désirés (Rogers, 2003). L'auteur considère qu'elle se compose de deux entités, le matériel et le logiciel. Pour lui, le matériel est l'outil incarnant la technologie sous forme d'objet matériel ou physique tandis que le logiciel comme innovation technologique est la base de l'information pour l'outil.

Les innovations technologiques prennent du temps avant de prendre leur place sur le marché et ils entraînent souvent plusieurs changements dans les secteurs qu'ils affectent. Elles sont généralement difficiles à distinguer lors de leur introduction. L'internet et le téléphone lors de leur introduction en ont été des exemples. Les produits d'innovation incrémentale sont des légères améliorations apportées à un produit, lesquelles ont généralement comme effet d'améliorer leur performance. Par contre, ces innovations ne viennent pas changer la nature du produit. Suite à leur apparition, les innovations peuvent passer par une phase de diffusion si les entités émettrices (entreprises, gouvernement, individus) en décident ainsi. La diffusion est la manière dont circule l'information concernant une innovation. C'est la façon qu'utiliseront les entités génératrices de l'innovation pour informer les utilisateurs potentiels de l'existence d'une innovation capable de répondre à leurs besoins perçus, que ceux-ci soient exprimés ou non. Rogers considère la diffusion de l'innovation comme étant le processus par lequel une innovation est certaine d'être communiquée avec le temps parmi les membres d'un système social. L'adoption est la décision d'utilisation de cette innovation perçue comme meilleure (Rogers, 2003).

La théorie de diffusion des innovations a été proposée par Everett. M. Rogers en 1962 afin d'expliquer le processus d'évolution d'une innovation technologique depuis le stade d'invention jusqu'à son utilisation à grande échelle. En d'autres termes, cette théorie définit les éléments agissant sur la rapidité avec laquelle une innovation est adoptée dans un groupe social.

L'adoption de l'innovation se déroule suivant cinq phases dont la connaissance, pendant laquelle l'individu est exposé à l'innovation, et réagit selon son profil personnel et son environnement social ; la persuasion qui est l'étape cruciale où l'individu entame une prise de position par rapport à l'innovation ; la décision de s'engager à utiliser ou non l'innovation ; l'implantation ou l'utilisation de l'innovation durant laquelle l'individu peut changer de décision en cas d'hésitation ou de non-satisfaction ; et la phase de confirmation au cours de laquelle l'individu cherche les informations nécessaires pour renforcer son choix (Figure 3).

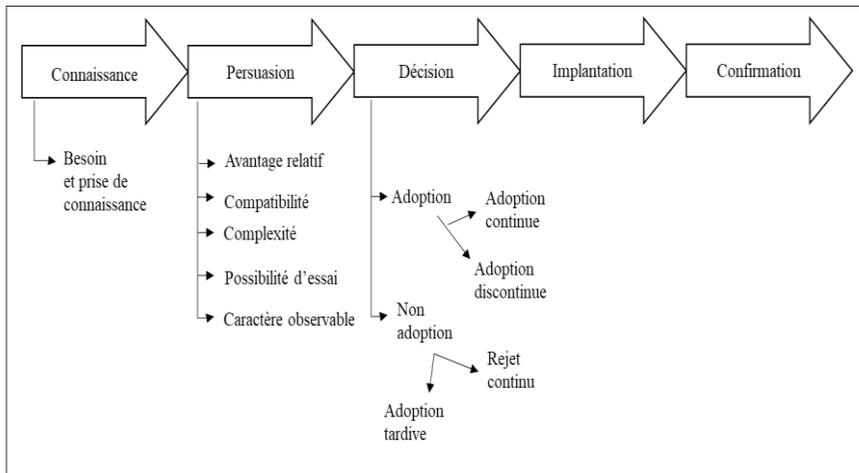


Figure 3 : Les phases pour une adoption de l'innovation

La décision de l'individu d'adopter ou de rejeter une innovation dépend des barrières endogènes correspondant aux caractéristiques intrinsèques de cette innovation à savoir son *avantage relatif*, sa *compatibilité*, sa *complexité*, sa *possibilité d'essai* et son *caractère observable*.

L'avantage relatif indique le degré pour lequel une innovation est perçue comme étant meilleure que l'idée qu'elle remplace. Il est apprécié en termes d'avantage économique, de prestige social, de la convenance, ou de la satisfaction. Plus l'avantage relatif perçu d'une innovation est grand, plus elle est susceptible d'être adoptée. Il n'y a aucune règle absolue constituant l'avantage relatif. Il dépend des perceptions et des besoins particuliers des groupes d'utilisateurs.

La compatibilité de l'innovation désigne le niveau auquel cette innovation est jugée conciliable aux valeurs (valeurs socioculturelles et croyances), aux pratiques existantes et aux besoins des adoptants potentiels. Une idée perçue comme étant incompatible avec leurs valeurs, normes ou pratiques ne sera pas adoptée aussi rapidement que celle qui est perçue comme étant compatible.

La complexité de l'innovation détermine la difficulté d'appréhension des principes, du fonctionnement et de l'utilisation de l'innovation. Une innovation simple à comprendre est facilement adoptée par rapport à celle qui exige de la part de l'adoptant de développer de nouveaux qualifications et arrangements.

La possibilité d'essai d'une innovation représente la facilité avec laquelle l'innovation peut être utilisée à faible échelle ou sur un petit périmètre avant de devoir être adoptée complètement. Une innovation qu'un individu ou une organisation peut essayer expérimentalement aura tendance à être adoptée plus facilement, car l'incertitude quant à ses conséquences sera levée plus rapidement.

Le caractère observable est le degré de visibilité des résultats d'une innovation. Selon Rogers, plus les effets d'une innovation sont facilement observables et

communicables d'un individu à l'autre, plus l'innovation est susceptible de se diffuser rapidement.

L'impact des caractéristiques de l'innovation sur sa diffusion a été préalablement étudié par Fliegel and Kivlin (1966). A cet effet, quinze attributs caractérisant les nouvelles pratiques en matière de gestion agricole ont été établis à savoir : le coût initial pour acheter ou initier la pratique ; le coût de continuité, ou le coût pour perpétuer cette pratique ; le délai de retour sur investissement correspondant au délai nécessaire pour couvrir le coût initial de l'innovation ; le résultat net engendré par l'innovation ; le prestige social conféré par l'innovation ; l'économie de temps conférée par l'innovation ; l'économie d'inconfort ou l'inconfort évité par l'utilisation de l'innovation ; la régularité des résultats obtenus grâce à l'innovation ; la possibilité d'essayer l'innovation ; la complexité de l'innovation ; la clarté des résultats engendrés par l'innovation ; la compatibilité de l'innovation ou la similitude avec les pratiques antérieures ; le degré d'association avec le métier de l'adoptant potentiel ; le caractère attractif de l'innovation, d'un point de vue de son fonctionnement ; et la pénétration de l'innovation ou les changements engendrés par l'innovation.

Les cinq caractéristiques universelles identifiées par Rogers se retrouvent parmi cette liste. Cependant, l'avantage relatif de l'innovation est représenté par plusieurs attributs tels que les coûts, le prestige et le caractère attractif. De plus, chaque attribut est critiqué dans la littérature. L'avantage relatif d'une innovation se réfère au degré auquel celle-ci est perçue comme étant meilleure que celles qui existent déjà. Ainsi, il n'est pas nécessaire que cette innovation possède beaucoup plus d'avantages que les autres, mais l'important, c'est que l'individu la perçoive comme étant avantageuse. La compatibilité est la mesure du degré auquel une innovation est perçue comme consistante avec les valeurs existantes, les expériences passées, les pratiques sociales et normes des utilisateurs. Ceci dit, une idée qui est incompatible avec les valeurs et normes actuelles mettrait plus de temps à n'être adoptée qu'une innovation compatible. La testabilité quant à elle, consiste en la possibilité de tester une innovation et de la modifier avant de s'engager à l'utiliser. L'opportunité de tester une innovation permettra aux éventuels utilisateurs d'avoir plus confiance au produit, car il aura eu la possibilité d'apprendre à l'utiliser. Enfin, l'observabilité mesure le degré auquel les résultats et bénéfices d'une innovation sont clairs. Ainsi, plus les résultats de l'adoption de l'innovation seront clairs et plus les individus l'adopteront facilement. Cependant, chacune de ces caractéristiques, prise individuellement, n'est pas suffisante pour prédire l'adoption d'une innovation. En effet, Rogers (2002) a montré qu'une combinaison de celles-ci aura pour effet l'augmentation des chances d'adoption de l'innovation. Par ailleurs, Tornatzky and Klein (1982) ont démontré que trois des cinq caractéristiques influençaient davantage l'adoption d'une innovation. Pour eux, la compatibilité et les avantages relatifs seraient positivement liés à l'adoption tandis que la complexité y serait négativement liée.

D'autres types de facteurs peuvent également influencer la diffusion d'une innovation. Ce sont des facteurs exogènes liés à l'environnement socio-économique et organisationnel, et non à l'innovation elle-même. D'où tout le débat autour de cette théorie de diffusion. Elle est à la fois utilisée et critiquée (Kinnunen, 1996 ; Boullier, 2016 ; Catherine and Latour, 1992 ; Doray & Niosi, 2018 ; Callon and Latour, 1985). Ces derniers auteurs ont démontré ses insuffisances par rapport au modèle de la traduction. Pour eux, ce modèle est sans doute le plus adapté pour comprendre le système communicatif se construisant autour de l'adoption des technologies et des innovations. Ils ont largement exposé les limites de chaque attribut de l'innovation décrit plus haut.

1.2.4. La sociologie de la traduction ou théorie de l'acteur-réseau

La sociologie de la traduction ou la théorie de l'acteur-réseau (Actor Network Theory : ANT abrégé en anglais) a été développée à partir des années 1980 par Bruno Latour, Michel Callon et Madeleine Akrich. L'approche ANT met en évidence la complexité en reliant les personnes, les objets, les institutions et les organisations (Mahil and Tremblay, 2018). Cet ensemble correspond à une organisation encore appelée réseau qui se constitue au fur et à mesure avec les intérêts des acteurs (Callon, 1986). Toutefois, les acteurs du réseau peuvent ne pas être les mêmes tout au long du processus de construction du réseau et son fonctionnement.

Elle se décrit en cinq moments : *la problématisation, l'intéressement, l' enrôlement, la mobilisation et la dissidence*. Ces moments sont présentés de manière chronologique pour faciliter leur distinction, mais ils se chevauchent en réalité. Ils constituent les différentes phases d'un processus général appelé la traduction, au cours de laquelle l'identité des acteurs, la possibilité d'interaction, et les marges de manœuvre sont négociées et délimitées.

La problématisation consiste à formuler les interrogations et à identifier l'ensemble des acteurs et leur interaction.

L'intéressement ou le scellage des alliances est l'ensemble des actions par lesquelles une entité s'efforce d'imposer et de stabiliser l'identité des autres acteurs qu'elle a définie par sa problématisation. S'il réussit, il confirme la validité de la problématisation. Dans le cas contraire, la problématisation est rejetée.

L' enrôlement est le fait d'affecter aux membres du réseau une tâche précise qui les rend des acteurs essentiels dans le devenir du réseau. Il définit la coordination des rôles. Autrement, il décrit l'ensemble des négociations multilatérales, des coups de force ou de ruses qui accompagnent l'intéressement et lui permettent d'aboutir.

La mobilisation quant à elle, évoque la représentativité des entités constituées autour du fait pour les négociations. La réalité sociale et naturelle est une conséquence à laquelle aboutit la négociation généralisée sur la représentativité des porte-parole. Si le consensus est atteint, les marges de manœuvre de chaque entité sont étroitement délimitées. Par contre, le consensus et la mobilisation que le réseau

rend possible peuvent être contestés à tout moment. En ce moment, la traduction devient trahison.

La dissidence ou la trahison de la traduction, est définie comme l'action de rupture avec l'autorité ou un échec des différents moments de la traduction. L'auteur évoque une trahison lorsqu'il existe un doute sur la représentativité de chaque entité autour du fait. La réussite de la « traduction », c'est la coopération dans l'innovation de tous les acteurs concernés. Elle repose sur l'idée que les logiques de chacun des acteurs appelés à coopérer s'enrichissent mutuellement plutôt qu'elles ne s'affrontent.

Les critiques de la théorie de l'acteur-réseau sont liées à l'association des humains aux objets (non-humains) prêtant à leur confusion. Elle offre une grille d'analyse intéressante sur les raisons du succès ou de l'échec des innovations, en mettant en lumière le processus contingent par lequel des acteurs cherchent à construire et à stabiliser des réseaux sociotechniques (Akrich, 1989). Cette théorie a été appliquée dans plusieurs domaines comme la santé (Karine, 2016), l'étude des projets de développement (Jacob, 2015), le management des entreprises (Walsh and Renaud, 2010), la pisciculture (Callon, 1986), le domaine énergétique (Blanchard, 2017 ; Dockès et al., 2012). Dans le domaine énergétique, elle permet par exemple une lecture de la dynamique de la traduction des stratégies territoriales dans les choix énergétiques opérés au sein des projets d'aménagement urbain (Blanchard, 2017).

1.2.5. La théorie de l'utilité espérée

Les approches économétriques combinent les outils sociologiques et économiques pour analyser les facteurs d'adoption et de diffusion des innovations. Ces approches sont fondées sur la notion d'utilité qui est la capacité que possède un bien à satisfaire un besoin (Mosnier, 2009). Ce terme peut souvent porter à confusion. Il traduit d'un côté la satisfaction qu'une personne retire de la consommation d'un bien ou d'un service, et d'un autre côté il constitue un instrument scientifique, utilisé par les économistes pour comprendre comment les consommateurs rationnels répartissent leurs ressources limitées entre les différents biens et services qui leur procurent une certaine satisfaction. Dans ce sens, une fonction d'utilité permet de classer les différents complexes en vue d'orienter le choix du consommateur qui maximise son utilité (McFadden, 1975). De plus, la théorie de l'utilité ne représente pas une théorie psychologique ou philosophique particulière, mais une théorie logique cadrant avec les motivations du consommateur. En univers certain, il est admis que le choix des individus résulte de la maximisation de leur satisfaction via leur fonction d'utilité. Toutefois, en cas d'incertitude, la théorie de l'utilité espérée est appropriée car elle se fonde sur les probabilités associées aux variables aléatoires pouvant être ou non connues du décideur. Elle a été développée par John von Neumann et Oskar Morgenstern en 1944 pour décrire le comportement face à l'incertitude dans les situations de conflits.

1.2.6. Méthodes économétriques d'analyse des facteurs d'adoption des innovations

Les recherches sur l'adoption portent sur le processus d'adoption ou l'identification des différentes étapes de ce processus, sur des difficultés rencontrées pour chaque étape et leurs solutions potentielles. En termes d'identification, la recherche s'intéresse aux facteurs influençant l'attitude d'un individu ou d'une organisation à adopter ou non une innovation. Plusieurs approches économétriques sont utilisées pour analyser les facteurs d'adoption des innovations technologiques.

Les approches économétriques les plus couramment utilisées pour l'analyse des facteurs d'adoption des innovations technologiques sont les modèles Logit ou Probit (Thuo et al., 2005 ; Mugwe et al., 2009 ; Chianu and Tsujii, 2004 ; Nguyen et al., 2016). Elles associent les décisions des utilisateurs à une variable dichotomique attribuée à la valeur 1 en cas d'adoption et 0 sinon. Le modèle binaire Logit se distingue de modèle Probit à travers la spécification de la fonction de répartition (Bourbonnais, 2015). Selon cet auteur, le modèle Probit obéit à la fonction de répartition de la loi normale centrée réduite de moyenne 0 et variance 1 alors que le modèle Logit, provient de la fonction de répartition de la loi logistique de moyenne 0 et variance $\pi^2/3$. Ainsi, les coefficients estimés avec le modèle Logit sont plus grands que ceux obtenus par le modèle Probit. Le choix d'utilisation d'un des modèles dépend de l'utilisateur. Toutefois, comparé au modèle Probit, le modèle Logit a une forme plus explicite. La fonction de distribution de la loi logistique est plus facile à utiliser, symétrique par rapport à 0 et plus aplatie que la distribution normale centrée réduite. D'où les fondement de la large utilisation du modèle Logit comparativement au modèle Probit (Greene, 2011).

Une autre approche économique basée sur la perspective des contraintes économiques suppose que le comportement des agents face à la décision d'adoption d'une technologie est fonction des facteurs déterminant leur capacité d'action. Ainsi, le manque de ressources financières constitue le facteur limitant l'adoption de la technologie. Dans le processus d'innovation et de diffusion, le modèle des contraintes économiques met en évidence l'effet des facteurs économiques sur la décision d'un individu d'adopter cette innovation. Cependant, ce modèle ne résulte que des comportements strictement rationnels et informés sans parvenir à saisir les effets des perceptions culturelles et individuelles d'une innovation.

Ces modèles reposent généralement sur des échantillons de grande taille alors que les méthodes psycho-sociologiques s'appliquent même avec un seul individu. Pour ce faire, cette recherche, ayant uniquement trois cas de gazéification, privilégiera les approches sociologiques pour identifier les barrières d'adoption de la gazéification. Ces approches sont utiles pour analyser les facteurs qui guident la décision des opérateurs à adopter ou non des technologies. Par contre, elles présentent des limites, car elles ne permettent pas de connaître la robustesse des différents déterminants identifiés. Elles peuvent être combinées à des approches d'évaluation des facteurs. Ainsi, en vue de trouver un outil d'évaluation des facteurs d'adoption des technologies, un état de l'art sur les méthodes multicritères sera présenté dans la section suivante.

1.2.7. État de l'art sur les méthodes de classement des facteurs d'adoption des technologies

Diverses méthodes multicritères sont décrites dans la littérature pour évaluer les facteurs pertinents d'adoption des technologies. L'intérêt de ces méthodes est de considérer un ensemble de critères de différentes natures, sans nécessairement les transformer en une fonction unique. Ces méthodes recherchent une solution de compromis et non un optimum comme dans le cas des méthodes d'optimisation. Cette solution de compromis peut être sous forme de choix, d'une affectation ou d'un classement (Roy, 1985). Parmi les méthodes multicritères couramment utilisées, on a la méthode multi-attributs (MAUT), le processus d'analyse hiérarchique (AHP), la méthode « preference ranking organisation method for enrichment valuations » (PROMETHEE) et les méthodes d'Elimination Et Choix Traduisant la REALité (ELECTRE).

La méthode MAUT a été développée en 1976 en vue de résoudre les problèmes de choix ou de rangement multicritère sur un ensemble d'actions (Keeney & Raiffa, 1976). Elle permet de déterminer une fonction d'utilité d'attributs comme le coût, la sécurité du travail, le degré de difficulté de travail en vue de trouver le meilleur compromis face à des problèmes complexes (Kim & Song, 2009 ; Sanayei et al., 2008). La procédure est généralement basée sur un principe de régression ordinaire et consiste à résoudre un programme linéaire. L'utilisateur peut modifier d'une façon interactive les fonctions d'utilité dans les limites fournies par une analyse de sensibilité du problème de régression ordinaire. Pour effectuer ces modifications, l'utilisateur est aidé par une interface graphique très conviviale. La fonction d'utilité acceptée par l'utilisateur sert alors à définir un pré-ordre sur l'ensemble des actions (Jiménez, Mateos and Rios-Insua, 2007). La méthode MAUT est intéressante pour incorporer des préférences, des risques, des incertitudes dans les problèmes de décisions multicritères (Loken, Botterud and Holen, 2009). Elle s'applique dans le cas où les évaluations des actions par rapport aux attributs sont incertaines. L'idée est assez simple, le décideur doit associer une utilité à chacune des actions considérées. Pour ce faire, il va considérer séparément ces critères, et observer quelle utilité se dégage pour chaque critère pour l'action considérée.

Le processus d'analyse hiérarchique (AHP) décompose le problème en une structure hiérarchique et calcule les poids des critères par leur ordre d'importance (Saaty & Kearns, 2014).

Les méthodes PROMETHEE, développées dans les années 1986 sont des méthodes d'analyse multicritère de surclassement (Brans, Vincke, and Mareschal 1986). Elles permettent de définir des relations de surclassement, d'indifférence et d'incomparabilité entre deux scénarios du meilleur au moins bon (Albadvi et al., 2007 ; Neofytou et al., 2020). Pour chaque scénario, une note et un poids sont attribués à chaque critère, afin d'évaluer l'indice de préférence d'un scénario sur l'autre. Cet indice est ensuite utilisé pour calculer l'attractivité d'un

scénario sur l'autre, définie comme différence entre la dominance des scénarios par rapport à tous les autres, et la soumission de ce scénario par rapport à tous les autres. Les méthodes PROMETHEE sont couramment utilisées dans diverses recherches opérationnelles, et également dans la prise de décision dans le domaine environnemental (Simon, Bruggmann and Pundez, 2004). L'objectif de ces méthodes est de classer des alternatives des meilleures aux moins bonnes à travers un système de préférences. Elles se basent sur une extension de la notion de critère par l'introduction d'une fonction exprimant la préférence du décideur pour une action par rapport à une autre action.

Les méthodes ELECTRE regroupent une famille de méthodes d'aide à la décision dont la particularité est l'agrégation partielle via la construction de relations de comparaisons des performances de chaque couple de solutions. Ces méthodes ont été initiées pour la réalisation de surclassement basé sur des comparaisons d'actions deux à deux (Roy and Bertier, 1971). L'implémentation de ces méthodes exige moins d'information (Xiaohan et al., 2018).

La méthode est choisie en fonction des caractéristiques du problème et des objectifs fixés. Les problèmes peuvent être traités avec un objectif descriptif, de rangement ou de classement. Les modèles descriptifs permettent de comprendre le problème sans avoir recours au calcul d'un indice global. Ils peuvent être explicatifs pour montrer les variables les plus représentatives du problème. Ils présentent en général les résultats sous forme graphique permettant une analyse par critère, mais ne permettent pas une analyse globale entre les différentes options évaluées. Les modèles de rangement ont pour objectif d'ordonner les alternatives. Pour cela, une technique d'agrégation (totale ou partielle) doit être employée afin de générer des indicateurs sur la base desquels se fera la comparaison. Le problème de l'agrégation est qu'elle peut présenter un phénomène de compensation dans lequel une performance élevée sur un critère important peut en cacher une déficience dans un autre critère (Mena, 2000 ; Guitouni & Martel, 1998). Les modèles de classement consistent à faire un rangement des alternatives dans des catégories prédéfinies. Plusieurs auteurs ont synthétisé les nuances possibles entre les différents modèles multicritères (Tableau 1).

Tableau 1 : Avantages et limites des méthodes multicritères

Méthodes	Avantages	Limites	Sources
MAUT	Permet les évaluations des actions par rapport aux attributs qui sont imprégnées d'incertitude.	C'est une procédure très exigeante de point de vue informationnel. Par ailleurs, la construction des fonctions de valeur n'est pas toujours une tâche évidente. La construction de la fonction analytique est une tâche ardue. L'exploitation de la forme additive n'est possible que sous des hypothèses très restrictives du point de vue théorique.	(Caillet, 2003)
AHP	Permet la modélisation du problème de décision par une structure hiérarchique. Utilise une échelle sémantique pour exprimer les préférences du décideur. Déterminer les poids (importances) des critères ou des barrières.	Un grand nombre d'éléments dans le problème de décision fait exploser le nombre de comparaisons par paires. Le problème de renversement de rang (deux actions peuvent voir leur ordre de priorité s'inverser suite à un ajout ou une suppression d'une ou de plusieurs actions) de l'ensemble des actions. L'association d'une échelle numérique à l'échelle sémantique est restrictive et introduit des biais.	(Caillet, 2003 ; Agrebi, 2018)
La famille PROMETHEE	Construit soit une relation de surclassement en créant une préférence différenciée, soit un pré-ordre total excluant l'incomparabilité	Dans la pratique, il est difficile d'atteindre l'indifférence vu les nombreux calculs nécessaires pour obtenir les flux.	(Caillet, 2003 ; Agrebi, 2018)

	et réduisant fortement l'indifférence.	
	PROMETHEE I	
	La construction de la relation de surclassement traduisant une intensité de préférence.	L'indifférence est en pratique très rare vu les nombreux calculs pour obtenir les flux. (Caillet, 2003 ; Agrebi, 2018)
	PROMETHEE II	
	La construction d'un pré ordre total excluant l'incomparabilité et réduisant fortement l'indifférence.	Les comparaisons deux à deux ne servent qu'à masquer le calcul du score final de chaque alternative. (Caillet, 2003 ; Agrebi, 2018)
	PROMETHEE III	
	L'introduction des seuils d'indifférence sur les flux pour réduire les nombreux calculs pour l'obtention de ces flux.	Les seuils d'indifférences n'ayant pas d'interprétation concrète pour le décideur. Ces seuils font l'objet des calculs statistiques qui rendent PROMETHEE III moins accessible. (Caillet, 2003 ; Agrebi, 2018)
	PROMETHEE IV	
	L'intérêt théorique apporté et le traitement des ensembles infinis d'alternatives.	La nécessité du calcul des intégrales au lieu des sommes. (Caillet, 2003 ; Agrebi, 2018)
La famille ELECTRE	ELECTRE I et Is	
	Adaptée pour des problématiques de sélection.	Exigence de traduction des performances des actions en notes, conduisant à une non maîtrise (Caillet, 2003 ; Agrebi, 2018)

Introduction de la notion de noyau permettant de restreindre le domaine de l'étude pour s'intéresser uniquement aux meilleures actions. des données par les utilisateurs.

ELECTRE II

Relève des problématiques de classement. Classement décroissant des actions selon leurs qualité

Difficulté de déterminer le pré-ordre partiel à cause de l'instabilité des actions entre le classement direct et le classement inverse. Exigence de diverses évaluations cardinales et une articulation à priori des préférences. (Caillet, 2003 ; Agrebi, 2018)

ELECTRE III

Relève des problématiques de classement. Classement des actions des meilleures aux moins bonnes. Acceptation de l'existence d'incertitude dans les choix du décideur, et l'introduction d'un seuil veto.

Exigence d'un grand nombre de paramètres techniques rendant difficile l'interprétation des résultats. (Caillet, 2003 ; Agrebi, 2018)

ELECTRE IV

Relève des problématiques de classement.

Association des seuils de préférences à chaque critère, mais suppression de la pondération de chaque critère. (Caillet, 2003 ; Agrebi, 2018)

ELECTRE TRI

Relève des problématiques d'affectation.
Classement des actions à proposer au décideur dans une des catégories prédéfinies.

Exigence d'un grand nombre de paramètres (Caillet, 2003 ; Agrebi, 2018)
techniques.

Plusieurs modèles ont été présentés dans la littérature pour la classification multicritère, mais chaque modèle a ses spécificités et ses insuffisances. Néanmoins, on se focalisera par la suite sur la méthode AHP développée en 1980 par Saaty. L'AHP est préconisée pour résoudre des problèmes complexes avec une décision multicritère. La force de cette approche est qu'elle organise les critères de manière structurée tout en donnant une solution relativement simple pour les problèmes de prise de décision (Al-Harbi, 2001 ; Skibniewski et al, 1992). Elle permet de décortiquer un problème d'une manière logique en passant d'un niveau supérieur à un niveau inférieur jusqu'à parvenir à une comparaison simple pour chaque paire de critères, par la suite on peut remonter au niveau supérieur pour la prise de décision.

1.2.8. État de l'art sur les méthodes d'analyse de chaîne de valeur

Ce sous point privilégie d'élucider les concepts de chaîne de valeur avant de développer le cas spécifique des filières de gazéification. Ainsi, les concepts liés à la chaîne de valeur sont explicités depuis leur apparition, leur introduction et leur application dans des domaines spécifiques.

1.2.8.1. Concepts de filière, chaîne de valeur et chaîne d'approvisionnement

Le concept de filière a été initié dans les années 1950 en économie rurale et en économie industrielle par les institutions de recherche françaises. Il a été employé par Goldberg et Davis, en 1957 à Harvard en appliquant une approche systémique pour analyser le complexe agro-alimentaire. La filière était utilisée pour décrire les différentes opérations allant d'une matière première à un produit fini. Le concept a été enrichi en prenant en compte plusieurs aspects comme le rôle de la technologie dans le développement des systèmes de production et la notion d'intégration. En effet, les technologies utilisées servent à cerner les raisons de la réussite ou de l'échec du développement d'une filière. Le phénomène d'intégration met en évidence les liens pouvant exister entre les différents enchaînements du processus de production (synergie, complémentarité dans le cas où l'on observe un bon enchaînement). Le concept s'est élargi en considérant l'analyse des tableaux entrées-sorties qui permettent de découper le système productif et de voir les liens et les relations entre les opérations ; et l'analyse des stratégies des firmes et surtout des groupes qui en plus de la description des phases de production, introduit la volonté d'atteindre une certaine efficacité économique.

La notion de filière regroupe ainsi un ensemble d'éléments pouvant être regroupés selon trois approches : l'approche technique qui considère la succession des opérations nécessaires pour la production tout en considérant les techniques et progrès scientifiques pouvant intervenir au niveau de l'organisation ; l'approche financière qui privilégie l'analyse de l'ensemble des relations économiques et comptables s'établissant lors du processus de production ; l'approche socio-économique au cours de laquelle toute filière nécessite l'intervention d'un nombre plus ou moins important d'opérateurs. Les relations existantes entre les acteurs de la filière doivent aussi être considérées au cours des opérations. Ainsi, il faudra mettre

en exerger leurs stratégies, leurs logiques de comportement qui dépendront des différents modes de coordination pouvant exister (règles précises, prix fixés ou non par le marché...) (Lebailly et al., 2000).

La filière peut donc être définie comme une succession d'opérations permettant de produire un bien, mais il faut aussi considérer l'ensemble des techniques et technologies nécessaires, les relations de complémentarité, le cheminement entre ces étapes, les résultats économiques, l'ensemble des acteurs ainsi que leurs stratégies et les relations (de complémentarité, de dépendance, de hiérarchie, etc.) existant entre eux (Lebailly, 1990).

Chaque cas d'analyse de filière est spécifique en termes de produit, de contexte institutionnel et de moyens disponibles. Différentes approches peuvent être utilisées, mais certains auteurs proposent un cadre comportant cinq étapes à savoir la définition du cadre d'analyse, le diagnostic fonctionnel ou caractéristiques générales de la filière, le diagnostic technique, organisationnel, financier et économique de la filière, le diagnostic de la consommation et du marché, et l'orientation pour le développement pour analyser une filière agroalimentaire (Dabat et al. 2010). L'approche filière a été développée pour mettre en évidence les circuits de distribution des biens agricoles (FAO, 2005). Elle consiste à analyser quantitativement les flux de marchandise, les prix et la valeur ajoutée, tout au long de la filière, en utilisant les comptes de chaque agent. Elle est généralement appliquée dans l'analyse des politiques agricoles et alimentaires. Cette approche utilise un ensemble d'outils facile d'utilisation comme des tableaux, des matrices et des graphes, pour analyser la filière (Dabat et al., 2010).

La chaîne de valeur a connu une explosion scientifique au cours de son évolution avec un nombre important de publications scientifiques portant notamment sur les concepts d'analyse de chaîne de valeur, la sélection des chaînes de valeur, l'élaboration des stratégies et les outils d'analyse. Une multitude de définitions du concept de chaîne de valeur existe dans la littérature.

Le concept de chaîne de valeur fut initialement introduit par l'Américain Michael Porter (Porter, 1985). Pour lui, la chaîne de valeur, est un outil d'analyse permettant d'identifier les activités clés pour l'obtention d'un avantage concurrentiel parmi l'ensemble des activités que l'entreprise doit mettre en œuvre pour satisfaire un secteur ou segment. Selon (Kaplinsky and Morris, 2000), ce concept décrit l'ensemble des activités nécessaires pour mener un produit ou un service de sa conception, à travers différentes phases de production ou conception (impliquant une succession de transformations physiques et d'utilisations de divers services), à sa distribution aux consommateurs finaux, puis à sa destruction après utilisation.

Les différentes activités de la chaîne de valeur sont rassemblées en deux groupes d'activités à savoir celles principales et de support (Figure 4).

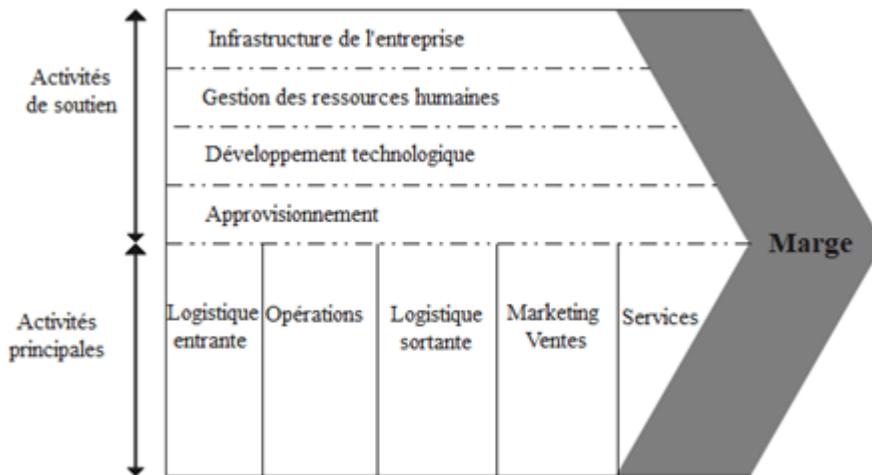


Figure 4 : Différentes activités de la chaîne de valeur
Source : Porter, (1985).

Les activités principales concernent la création physique du produit et sa vente et son transfert à l'acheteur ainsi que l'assistance de l'après - vente. Elles se composent des éléments suivants :

- la logistique entrante : activités associées à la réception, au stockage et à la diffusion des intrants du produit, tels que la manutention des matériaux, l'entreposage, le contrôle des stocks, la planification des véhicules et les retours aux fournisseurs ;
- les opérations : activités associées à la transformation des intrants en la forme du produit final, tels que l'usinage, l'emballage, l'assemblage, la maintenance de l'équipement, les tests et les opérations d'installation ;
- la logistique sortante : activités associées à la collecte, au stockage et à la distribution physique du produit aux acheteurs, tels que l'entreposage des produits finis, la manutention des matériaux, l'exploitation du véhicule de livraison, le traitement des commandes et la planification ;
- le marketing et les ventes : activités associées à la fourniture d'un moyen par lequel les acheteurs peuvent acheter le produit et les inciter à le faire, telles que la publicité, la promotion, la force de vente, les devis, les relations avec les canaux et la tarification ;
- le service : activités associées à la prestation de services pour améliorer ou maintenir la valeur du produit, telles que l'installation, la réparation, la formation, la fourniture de pièces et l'ajustement du produit.

Les activités de soutien supportent les activités principales en fournissant des intrants achetés, de la technologie, des ressources humaines et diverses fonctions à l'échelle de l'entreprise. Ce sont :

- l'approvisionnement : il fait référence à la fonction d'achat d'intrants tels que les matières premières, les fournitures, les machines et le matériel de bureau utilisés dans la chaîne de valeur de l'entreprise ;
- le développement technologique : le développement technologique consiste en une gamme d'activités qui peuvent être globalement regroupées en efforts visant à améliorer le produit et le processus ;
- la gestion des ressources humaines : les activités de gestion des ressources humaines comprennent les activités liées au recrutement, à l'embauche, à la formation, au perfectionnement et à la rémunération de tous les types de personnel ;
- l'infrastructure de l'entreprise : l'infrastructure de l'entreprise comprend un certain nombre d'activités, notamment la gestion générale, la planification, les finances, la comptabilité, les affaires juridiques, les affaires gouvernementales et la gestion de la qualité.

Le niveau de détail de la décomposition en activités élémentaires doit être guidé par l'importance des activités élémentaires pour l'avantage concurrentiel. La chaîne de valeur permet de mettre en évidence les activités ayant un impact réel en termes de coût ou de différenciation par rapport aux concurrents.

La chaîne de valeur se fonde sur un lien de partenariat étroit entre les acteurs. Les partenaires d'une chaîne de valeur n'ont d'autres choix que de se faire confiance et de partager l'information nécessaire à l'optimisation de l'ensemble de la chaîne. Cette alliance peut notamment se faire sous forme d'intégration dans une entreprise. Elle est également possible entre plusieurs entreprises indépendantes, sauf que celles-ci, dans le but de créer de la valeur, choisissent de devenir interdépendantes. Ces entreprises créent de la valeur en diminuant des coûts de production et les inefficacités dans le système, en améliorant la qualité du produit et en créant des produits différenciés commandant une prime sur les marchés.

Elle est le plus souvent accompagnée d'un autre concept « chaîne d'approvisionnement ». Plusieurs types de chaîne d'approvisionnement existent en bioénergie en fonction de la matière première (biomasse cellulosique ou cultures énergétiques par exemple) et des marchés. La chaîne d'approvisionnement de la biomasse pour la bioénergie sera développée par la suite.

La chaîne d'approvisionnement en biomasse pour la bioénergie peut être subdivisée en trois grands segments. Selon An et al. (2011b), le segment amont couvre les opérations allant de la production de biomasse à la livraison à l'entrée de l'installation de conversion. La conversion en bioénergie est couramment considérée comme une opération de type "boîte noire" avec une entrée de biomasse et une sortie de bioénergie et de sous-produits. Le deuxième segment correspond au processus de conversion proprement dit. La section en aval regroupe le stockage de la bioénergie et sa distribution aux clients. La plupart des opérations se situe en amont de la chaîne, à savoir la production de biomasse, la récolte, la collecte, le prétraitement, le stockage et la conversion en bioénergie (Mohamed Abdul Ghani, Vogiatzis, and Szmerekovsky, 2018). Le segment générique de la chaîne d'approvisionnement en

amont de la biomasse indiquant les flux de produits possibles entre les installations d'exploitation est schématisé dans le Figure 5.



Figure 5 : Chaîne d'approvisionnement de la biomasse agricole
Source : inspirée de Kaplinsky and Morris (2000)

La chaîne d'approvisionnement est généralement étudiée à partir de l'après-récolte jusqu'à la livraison (Sarkar, Omaid, and Choi, 2018). Les opérations de récolte sont souvent délaissées dans les études de chaîne d'approvisionnement bien que leurs caractéristiques peuvent avoir une influence sur les performances en aval (Porter, 1985). Toutefois, il existe trois principaux composants les plus courants de la chaîne d'approvisionnement en biomasse à savoir les opérations de récolte, le transport et le stockage (Zailan et al., 2021 ; Sarkar et al., 2018). Elle est souvent assimilée à l'ensemble des opérations que subit une matière première depuis sa production en passant par sa collecte, son prétraitement, son stockage et son transport jusqu'à sa transformation et son utilisation finale (Atashbar, Labadie and Prins, 2016 ; Fedorova and Pongrácz, 2019).

Nunes et al. (2020) décrivent de manière détaillée les opérations. Ils soulignent que la récolte peut être soit primaire, récolte consacrée à la biomasse ou secondaire, destinée à la récolte des déchets. Le lieu de récolte dépend du type de biomasse. Elle peut s'effectuer soit dans les forêts, les champs agricoles ou dans les centres de transformation industrielle tels que les scieries et les industries du meuble. L'approvisionnement de la ressource peut impliquer d'autres activités telles que le séchage, la densification et l'emballage associés le plus souvent au prétraitement.

Le prétraitement de la biomasse est un processus de séchage et de découpage de cette biomasse. Il faut une forte intensité d'énergie et de main-d'œuvre. Ainsi, le prétraitement nécessite une attention particulière pour maintenir la faisabilité économique globale à travers la réduction de la teneur en humidité de la biomasse (Sharma et al., 2013). Les besoins en énergie des sous-processus tels que le séchage, la densification et le broyage peuvent être satisfaits grâce à l'énergie générée ou à la chaleur résiduelle du système lui-même via des mécanismes sélectionnés pouvant être la gazéification ou la pyrolyse.

Le stockage de la biomasse agricole doit s'effectuer afin d'assurer le fonctionnement de l'usine toute l'année, car cette biomasse n'est disponible que pendant une période précise. Le lieu de stockage peut être situé en bordure de champ pour les résidus de cultures ou dans un site de stockage avec une meilleure conservation ou à l'usine (Rentizelas, Tolis, and Tatsiopoulou, 2009). La biomasse peut être stockée en vrac, conditionnée dans des sacs ou prétraitée en granulés.

Le transport de la biomasse peut constituer un élément important du coût total du produit et de la consommation d'énergie. Une planification et une coordination

minutieuses sont nécessaires pour optimiser le passage d'une matière première de faible densité, peu coûteuse et largement dispersée vers un ou plusieurs traitements. Selon les distances parcourues et l'infrastructure locale, il est possible de réaliser des économies grâce à l'utilisation de moyens de transport comme le camion, mais cela dépendra des spécificités des origines de la matière première, des destinations de traitement et autres conditions locales, telles que la disponibilité des infrastructures routières.

La production de bioénergies correspond à la transformation de la matière première en produit semi-fini. C'est le processus de création de valeur le plus important (Yu, Román, and Solvang, 2017). Les technologies couramment utilisées pour la biomasse sèche sont la gazéification, la pyrolyse et la combustion directe décrites dans le cadre conceptuel.

Dans la présente recherche, la matière première considérée étant les résidus agricoles, la chaîne d'approvisionnement commence à partir de la collecte des résidus et se termine dans la phase de leur conversion en énergie à l'entrée de la technologie de gazéification.

1.2.8.2. Différence entre filière, chaîne de valeur et chaîne d'approvisionnement

Le concept de filière a évolué pour donner celui de chaîne d'approvisionnement avec la transformation des types de concurrence en se focalisant sur les systèmes d'offre qui entrent en compétition. Un système d'offre est formé par un ensemble d'actifs matériels et immatériels, de ressources et de compétences, utile pour la réalisation d'une tâche donnée. La notion de système d'offre, en tant qu'agencement d'actifs, de ressources et de compétences emprunte beaucoup aux travaux de Porter en 1985 sur la chaîne de valeur, qui agit également sur les recherches portant sur la chaîne d'approvisionnement. Autrement, la chaîne de valeur instrumentalise le concept de filière dans l'objectif de générer des outils de pilotage stratégique des entreprises (Temple et al., 2013). Elle distingue deux formes d'activités dont l'une en lien avec la transformation de la matière, et l'autre pilotant les dispositifs logistiques en amont et en aval et assurant la gouvernance du système de management. Le concept de chaîne de valeur intègre la chaîne d'approvisionnement, ayant une signification à priori semblable (Cox, 1999 ; Porter, 1985). Cette chaîne d'approvisionnement correspond à un ensemble d'activités et d'opérations soutenant les fonctions d'approvisionnement de matières au sein d'un réseau de fournisseurs, de transformation et d'assemblage de ces matières en produits intermédiaires ou finis, puis de distribution aux consommateurs, via des distributeurs. Elle se présente comme le niveau pertinent d'analyse d'une compétition industrielle fondée sur une maximisation des revenus et une minimisation des coûts de mise à disposition des produits au consommateur, avec une réduction des délais de réaction. Ainsi, les concepts de chaîne de valeur et de chaîne d'approvisionnement se confondent à travers l'enchaînement d'activités et le processus de création de valeur, et les composants de la chaîne (Fulconis, Paché, and Roveillo, 2011). Par contre, la nuance entre ces concepts a récemment été souligné du point de leurs objectifs

(Blair et al., 2021). La chaîne de valeur a une vision basée sur la considération des aspects de création et de l'appropriation de valeur alors que la chaîne d'approvisionnement se base sur une vision opérationnelle en considérant les stratégies et les outils pour concevoir et exploiter des interactions efficaces, les réseaux d'entreprises. Ces visions n'interfèrent pas car la création de valeur vise à obtenir un maximum de profit et la chaîne d'approvisionnement a pour objectif l'atteinte de l'efficacité au niveau opérationnel. Toutefois, en pratique, ces notions sont toutes des composantes nécessaires à la stratégie de chaîne d'approvisionnement d'une entreprise. Du point de vue approche, la chaîne de valeur se distingue par une association des activités principales aux activités de soutien, tandis que la chaîne d'approvisionnement met l'accent sur les flux physiques, financiers et informationnels. De plus, la logistique correspond à une activité de soutien et non une activité principale. A l'échelle méthodologique, à la différence de la chaîne de valeur, la chaîne d'approvisionnement se concentre sur les interactions entre ses parties prenantes (industriels, distributeurs, prestataires de services logistiques, etc.). Elle explore ainsi des solutions opérationnelles face à des problèmes de management privé et/ou public, en améliorant le système de livraison des produits jusqu'aux points de vente finaux. Pour ce faire, l'approche chaîne d'approvisionnement a pour but d'augmenter le niveau de satisfaction du client en termes de coût, de service et de réactivité.

1.2.8.3. Méthodes d'analyse de chaîne de valeur

Les méthodes d'analyse de la chaîne de valeur ont été largement utilisées pour étudier le processus de création de valeur dans de nombreux domaines différents, à savoir l'industrie minière, l'industrie de la pêche, l'industrie aéronautique, l'industrie laitière, la restauration, la production et la fabrication, etc. Généralement, l'analyse de la chaîne de valeur ne met pas l'accent que sur la création et l'appréciation de la valeur d'un point de vue financier. Cependant, la préoccupation croissante pour les défis environnementaux marquée par la réduction des combustibles fossiles et l'accentuation des effets du changement climatique, et l'utilisation des technologies non-respectueuses de l'environnement, amène à se focaliser davantage sur le processus de valeur ajoutée verte, prenant en compte la création de valeur écologique et la contribution de la valeur environnementale à travers l'ensemble du flux de matières (Marimin et al., 2014). Dans ce sens, la chaîne de valeur de la production de bioénergie comprend toutes les articulations du flux des matériaux aux produits. Ainsi, elle peut être analysée de sorte que toutes les importantes articulations soient équilibrées par une combinaison d'aspects économiques et durables, le long de la chaîne. Cette analyse pour la production de bioénergie fournit aux décideurs une base fondamentale pour la promotion de la biomasse vers une valorisation énergétique. En outre, l'analyse de la chaîne de valeur inclut différentes phases dans la littérature (Furaha Mirindi, 2017 ; DGCID-EuropeAid, 2017). Elle comprend principalement les phases suivantes (Figure 6) :

- 1) la phase de sélection de la chaîne de valeur basée sur un nombre important de critères dont la non-satisfaction de la demande, la contribution des potentielles chaînes de valeur dans la formation du revenu des acteurs, la création d'emplois, la contribution à l'équité, la synergie avec d'autres initiatives, l'impact potentiel sur la taille de la chaîne de valeur, l'intérêt du Gouvernement et du donateur et l'accès à l'information ;
- 2) la phase de cartographie de la chaîne consistant à schématiser les différents acteurs identifiés, et les éléments (flux physiques, financiers et informationnels) de la chaîne ;
- 3) la phase de mesure de la chaîne reposant sur la détermination de la valeur ajoutée de la chaîne ;
- 4) la phase d'identification des opportunités et des faiblesses de la chaîne ;
- 5) la phase de gouvernance de la chaîne ;
- 6) la phase de mise à niveau de la gouvernance et renforcement des capacités visant à identifier la meilleure stratégie d'amélioration de la chaîne.

Evaluation des conditions de développement d'une filière de gazéification de biomasse agricole au Burkina Faso

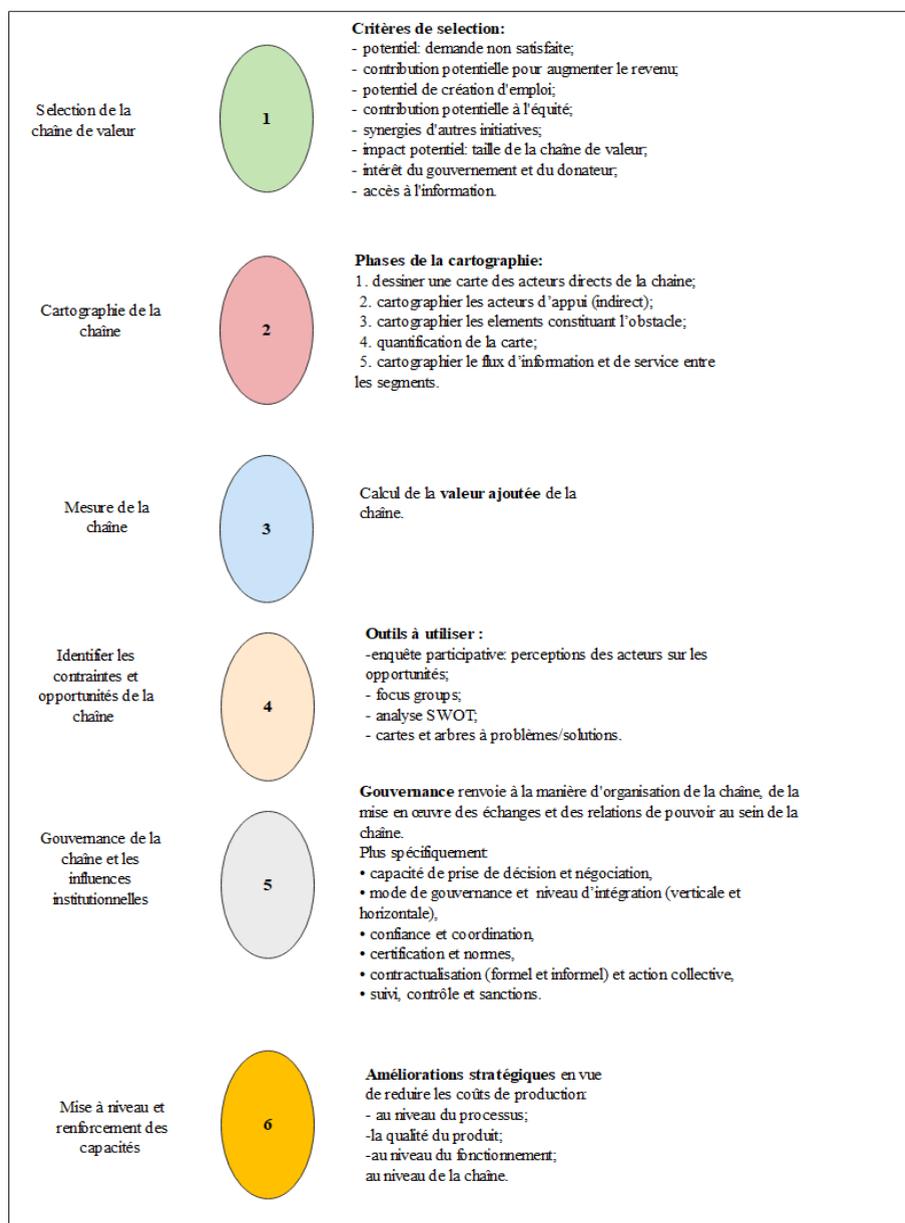


Figure 6 : Processus d'analyse de la chaîne de valeur
Sources : Adapté d'EuropeAid, 2011.

L'intérêt de l'analyse de la chaîne de valeur réside dans l'appréhension des impacts pertinents et l'identification des étapes de la chaîne et des acteurs. Elle oriente les décideurs, les acteurs et les investisseurs à apporter une assistance adéquate et élimine les contraintes et les goulets d'étranglement.

1.2.8.4. Modèle de chaîne de valeur pour la production de bioénergies

La chaîne de valeur a été largement utilisée dans la littérature dans divers domaines agricoles et industriels. En bioénergie, Zailan et al. (2021); Yu et al. (2017) ont récemment modélisé la chaîne de valeur dans la production de bioénergie à partir de la biomasse et des déchets biodégradables dans la Norvège du Nord. Auparavant, un modèle de chaîne de valeur de la biomasse a été associé à un modèle de programmation linéaire mixte en vue de maximiser le profit global obtenu dans la production bioénergétique (Balaman & Selim, 2014). An et al. (2011a) ont formulé un modèle de calcul pour optimiser le bénéfice global d'une chaîne de valeur ajoutée de biocarburant lignocellulosique. Aksoy et al. (2011) ont développé un modèle d'optimisation pour minimiser le coût de transport de la production de bioénergie à partir de biomasse ligneuse et de déchets d'usine. Kim et al. (2011) ont développé un cadre de chaîne de valeur à quatre échelons dans le cas d'une production de biocarburant par conversion par pyrolyse rapide. Parker et al. (2010) a développé un modèle de chaîne de valeur simplifié afin d'améliorer la valeur économique de la production de biocarburants à partir de la biomasse. Certains auteurs ont mis l'accent sur la maximisation de la création de valeur à travers une minimisation du coût du système. Chen & Fan (2012) ont travaillé à minimiser le coût global du système par la formulation d'un modèle de chaîne de valeur de production de bioéthanol utilisant la programmation mixte en nombres entiers. Dans la même orientation, Lam et al. (2010) ont modélisé et appliqué une chaîne de valeur ajoutée de la production de bioénergie à partir de la biomasse pour réduire la quantité de gaz à effet de serre émise par cette production bioénergétique.

De cette littérature, l'application de la notion d'analyse chaîne de valeur a concerné abondamment la production de bioéthanol et du biocarburant à partir de la biomasse. Peu de travaux ont utilisé le modèle d'analyse de chaîne dans la production du syngas. Dans le cadre de cette thèse, la deuxième étape de la démarche sera utilisée c'est-à-dire la cartographie de la valeur, dans la production du syngas par gazéification en se basant sur l'analyse fonctionnelle et économique de l'approche Value Chain Analysis for Development (VCA4D), détaillée par la suite dans le chapitre sur la méthodologie de recherche.

1.2.9. Etat de l'art sur les méthodes d'analyse de la disponibilité de la biomasse

Diverses méthodes permettent d'évaluer la disponibilité de la biomasse (FAO, 2014a), (ENER-SUPPLY 2012). À travers une revue de littérature, Batidzirai et al. (2012) identifient diverses méthodes d'estimation de la biomasse parmi lesquelles l'analyse statistique et l'analyse basée sur la télédétection. Ce sont

les méthodes les plus couramment appliquées dans la quantification de la biomasse agricole.

L'analyse statistique se fonde sur l'utilisation des données statistiques découlant de l'utilisation des terres et de la production agricole. La méthodologie de l'analyse statistique, largement appliquée depuis l'émergence des premières évaluations du potentiel de la biomasse, utilise des bases de données comme FAOSTAT, EUROSTAT et les statistiques nationales dans l'analyse du potentiel bioénergétique.

Les avantages des analyses statistiques sont leur simplicité, leur transparence, leur reproductibilité et leur faible coût. L'inconvénient majeur est la possibilité limitée de prendre en compte la dimension macro-économique, les contraintes environnementales ou sociales spécifiques au site, car seules des valeurs moyennes telles que la productivité du sol peuvent être incluses (Batidzirai et al., 2012).

Les analyses spatiales diffèrent des analyses statistiques, car elles utilisent des données spatialement explicites. Cependant, les variables clés du scénario restent les mêmes que dans les analyses statistiques. Par exemple, Lovrak et al. (2020) ont combiné les analyses statistiques et spatiales pour déterminer le potentiel technique et la saisonnalité de biomasse lignocellulosique et non lignocellulosique pour la production de biogaz en Croatie.

Les analyses spatiales sont plus appropriées, par rapport aux analyses statistiques, pour refléter l'impact des circonstances locales ou régionales en combinant des données spatiales sur l'utilisation des terres. Ces analyses fournissent un aperçu de la répartition des potentiels de biomasse entre les pays ou les régions. Un autre avantage est que les rendements des cultures énergétiques peuvent être estimés sur la base de modèles de croissance des cultures utilisant des données spatialement explicites sur le climat, le type de sol et la gestion des cultures. En outre, la méthodologie est transparente et différents niveaux de détails et d'agrégation des données peuvent être utilisés. La reproduction des résultats est cependant difficile, car l'utilisation de logiciels d'information géographique et de données spatialement explicites peut demander beaucoup de travail. De plus, la complexité accrue des données agrégées peut être une source d'incertitude et de contradictions, et les analyses spatialement explicites ne fournissent donc pas nécessairement des résultats plus précis que les analyses statistiques (Natarajan et al., 2016). En outre, les analyses spatiales comme les analyses statistiques, n'offrent qu'une possibilité limitée d'inclure des impacts macro-économiques de l'augmentation de la production de bioénergie.

Les données utilisées dans les évaluations spatiales sont des géodonnées et des données statistiques. Les géodonnées regroupent les informations géoréférencées telles que les cartes d'utilisation et de couverture des sols. Ces données sont obtenues à partir des systèmes d'information géographique (SIG). Il s'agit par exemple des données sur l'altitude, l'aptitude à l'agriculture, les coordonnées GPS des champs, les zones protégées, des données satellitaires telles que des images MODIS, Landsat 8, Sentinel-2A et SPOT 7 (Mansaray, Zhang, and Sheka, 2020).

Chao et al. (2019) ont synthétisé des méthodes d'estimation de la biomasse des cultures énergétiques à partir des informations de télédétection. Ils ont indiqué que l'analyse statistique avec l'indice de végétation est la méthode la plus courante. Toutefois, l'application de cette approche est limitée par le manque d'échantillon de données et la vulnérabilité à l'influence de nombreux facteurs tels que les jours nuageux, la longueur d'onde plus longue conduisant à une incertitude de mesure et une mauvaise classification. De plus, les informations sur la hauteur des cultures sont d'une importance vitale pour l'estimation de la biomasse. Pourtant, l'application correspondante est souvent soumise à de nombreux facteurs comme la variété des cultures, la période de croissance et les limites des pratiques de gestion des terres agricoles.

Dans les régions de climat tropical, les données de télédétection sont affectées par la présence de nuages, la taille des superficies emblavées et les systèmes de rotation culturale (Hiloidhari and Baruah, 2011). En effet, la saison des pluies y est marquée par une forte couverture nuageuse pouvant empêcher l'enregistrement des images nettes avec une périodicité recommandée de 10 jours par exemple. Elle nécessite également une connaissance préalable de la localisation des champs.

Bellón De La Cruz (2018) a reproduit la méthode de télédétection au Burkina Faso, pour déterminer la production agricole en utilisant des images satellitaires, la carte d'occupation des terres et des données de validation comme les statistiques agricoles et les données de terrain. Cette recherche a relevé plusieurs limites à l'application de cette approche dans le pays résultant principalement des spécificités de la région (parcellaire fragmenté et de petite taille, grande variabilité intra-parcellaire et forte couverture nuageuse pendant une courte saison culturale), ainsi que de la disponibilité limitée en imagerie satellitaire due au manque de produits qui combinent une haute résolution spatiale et temporelle, et le coût élevé des images à très haute résolution spatiale.

De cette littérature, les estimations à partir des données satellitaires concernent la biomasse aérienne, de laquelle dérive le rendement. Si les estimations ont lieu à plusieurs périodes durant le cycle, il est possible que des indices comme le Fcover ou d'autres indices liés au NDVI peuvent permettre de trouver de bonnes relations avec les mesures. À cet effet, avec les produits SENTINEL, il est possible d'arriver à de telles estimations. Les produits Copernicus peuvent compléter ceux de SENTINEL. Mais cela dépend de la période et de la zone d'étude. Les estimations des résidus se font pour une zone bien délimitée et avec seulement un ou deux cultures pendant la même campagne agricole. Pour effectuer la collecte des données pour la saison en cours, des observations de terrains sont requises pour la validation des relations statistiques à estimer entre les indices issus des données satellitaires, les rendements ou les productions, et les résidus considérés ici comme la différence entre la biomasse aérienne totale en fin de saison et la production récoltée. Les indices dérivés des images satellitaires ne sont que des proxys pour soit la biomasse, soit le rendement. Les analyses menées en utilisant les données satellitaires visent à développer de nouvelles méthodes et/ou de nouveaux indices pour améliorer les relations statistiques tout en réduisant les erreurs dues aux conditions

environnementales, aux pratiques culturelles, etc. L'analyse statistique reste adaptée pour déterminer les flux physiques de la chaîne de production de syngas par gazéification dans le cadre de cette thèse.

1.3. Conclusion partielle

Ce chapitre de revue de littérature a présenté les concepts et le cadre théorique en vue de permettre la compréhension des facteurs déterminant le développement des technologies. Le cadre conceptuel a commencé par une description de la typologie, des différentes caractéristiques physiques et des potentialités de la biomasse. Les voies de sa valorisation thermo-chimique, notamment la pyrolyse et la gazéification ont également été revues. Par la suite, un état de l'art a été consacré, d'une part à la disponibilité de la biomasse, et d'autres parts au déploiement de la gazéification dans les pays en développement. De l'analyse des travaux existants, il ressort que plusieurs paramètres comme les conditions climatiques et les usages compétitifs peuvent limiter la disponibilité de la biomasse agricole à des fins énergétiques. En plus de cette question liée à la disponibilité de la biomasse, d'autres contraintes de diverses dimensions freinent l'adoption de la gazéification particulièrement dans les pays les moins avancés. Toutefois, la littérature révèle des insuffisances quant à la priorisation des potentielles barrières. La présente recherche se positionne pour contribuer à combler le gap relevé dans la littérature en documentant les barrières clé de la gazéification dans le contexte du Burkina Faso tout en permettant les prises de décision pour la relance de la technologie. Les méthodes d'analyse potentielles de cette problématique ont été détaillées dans la section relative au cadre théorique.

Les méthodes d'analyse identifiées sont fonction des questions de recherche formulées. La littérature relative à l'adoption d'innovations technologiques demeure vaste. Elle regroupe des facteurs endogènes à l'innovation comme la complexité technique, le coût d'investissement et d'exploitation, et exogènes tels que les facteurs psychosociaux, organisationnels, informationnels et institutionnels qui concourent au rejet ou à l'adoption d'une innovation. La théorie de la sociologie de la traduction servira de cadre d'analyse des jeux d'acteurs lors du processus d'installation de la gazéification au Burkina Faso. Elle convient le plus pour cerner l'échec de la technologie en combinant des personnes intéressées, dont certaines sont prêtes à désertir, et un dispositif de choses, des gazogènes susceptibles de tomber en panne, et la biomasse pouvant être insuffisante. Cette démarche sera associée à la méthode d'analyse du processus hiérarchique pour identifier les facteurs de développement de la gazéification. Concernant la quantification de la biomasse, la littérature sur l'approche basée sur la télédétection a souligné plusieurs difficultés qui limitent son application dans le contexte du Burkina Faso. La collecte des données doit consister à avoir le plus d'informations possibles en fin de la saison agricole pour différentes zones de préférence sur la base du climat et des sols. Aussi, cette collecte serait-elle impossible pour toutes les régions de production du pays. Il serait donc plus intéressant de délimiter la zone d'étude et d'être en possession des

données sur l'occupation des sols de sorte à faciliter le traitement des images satellitaires. La robustesse des relations statistiques pourrait être améliorée s'il existait des données d'études antérieures, mais il y a peu d'études qui détaillent la disponibilité des résidus par région, ni par village au Burkina Faso. Les agriculteurs pratiquent leurs cultures sur de petites surfaces et/ou en inter-cultures, rendant complexes les analyses à partir des données satellitaires. L'analyse de la disponibilité de la biomasse de cinq cultures par les données satellitaires, ne serait pas optimale, d'où la nécessité de recourir à la méthode d'analyse statistique. Enfin, une analyse de chaîne de valeur sera appliquée pour identifier les acteurs et les fonctions dans la production de l'énergie par gazéification. Outre cette analyse fonctionnelle et organisationnelle, des simulations basées sur des hypothèses de calcul du coût de revient seront réalisées pour l'analyse technico-économique de la chaîne de valeur de production d'énergie par gazéification. Les détails de ces méthodes retenues sont décrits au chapitre 2 portant sur la méthodologie de recherche.

Méthodologie de recherche

Chapitre 2: Méthodologie de recherche

Ce chapitre décrit la démarche méthodologique adoptée pour répondre aux questions de recherche. Cette démarche a été menée en plusieurs étapes à savoir la justification de la zone de recherche qui diffère selon l'objectif de recherche. En effet, si la détermination de la biomasse s'est faite sur le plan national, les facteurs d'adoption ont été analysés spécifiquement dans les régions abritant soit la technologie de gazéification et/ou celle de la pyrolyse. Ainsi, la base de collecte des informations sur les barrières d'adoption a été d'abord centrée sur les communes de Po, de Dano et de Bama, où se trouvent les trois sites d'installation de la gazéification puis sur l'ensemble de la région des Hauts-Bassins où les installations de pyrolyse sont les plus nombreuses. Une première phase exploratoire a permis de faire un état de lieux et de relever les difficultés rencontrées lors du fonctionnement de la gazéification et de recueillir les perceptions des utilisateurs de la technologie. D'autres informations sur les barrières d'adoption de la gazéification ont été également collectées dans le contexte du Burkina Faso tout en ayant comme référence la technologie de la pyrolyse. Par la suite, des entretiens ont été effectués auprès des producteurs agricoles pour collecter des données relatives aux utilisations endogènes des résidus agricoles. La Figure 7 présente une vue synoptique des méthodes d'analyse retenues pour les différentes étapes de la recherche.

Evaluation des conditions de développement d'une filière de gazéification de biomasse agricole au Burkina Faso

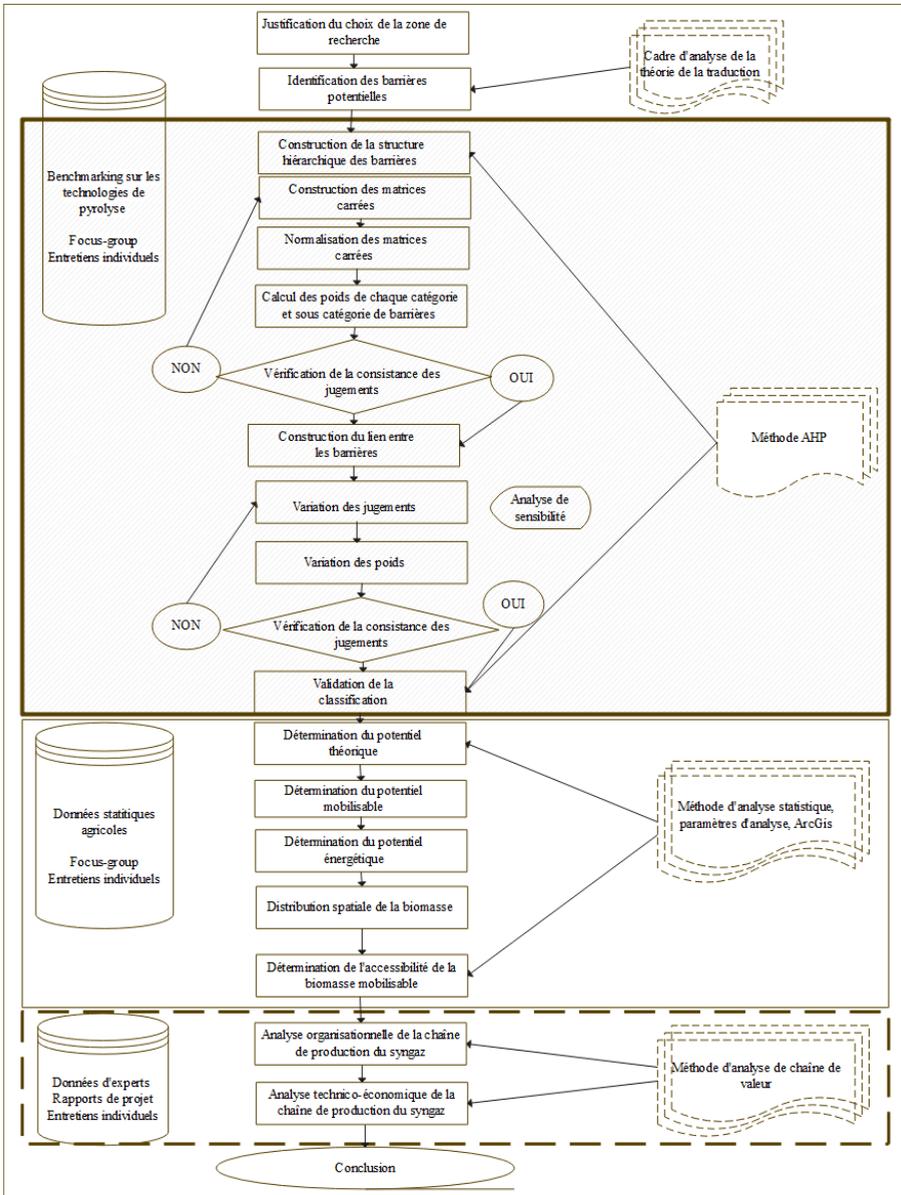


Figure 7 : Organigramme de l'approche méthodologique

2.1. Justification du choix de la zone de recherche

La recherche sur les barrières d'adoption a été conduite dans trois localités du Burkina Faso où la technologie de gazéification a été installée. Ainsi, les

communes rurales de Bama, de Dano et de Po, situées respectivement dans les provinces du Houet (région des Hauts Bassins), de Ioba (région du Sud-Ouest) et du Nahouri (région du Centre-Sud) ont été retenues (Figure 8).

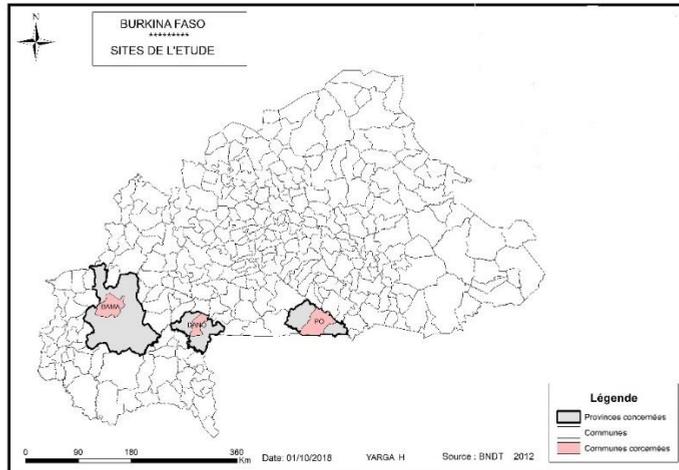


Figure 8 : Carte représentative des zones d'étude

La population de Bama se compose au total de 69 738 habitants dont 34 699 hommes et 35 039 femmes (INSD, 2008). Disposant de plusieurs cours d'eau pérennes comme la vallée du Kou, une plaine aménagée pour la production de riz, la commune est le troisième plus grand centre de production de riz du Burkina Faso après la vallée du Sourou et la plaine de Bagré. La production rizicole y occupe la population tant en saison sèche qu'humide. Cette potentialité favorise le développement de la transformation du riz paddy par des groupements de femmes formant une coopérative d'étuveuses. Avec l'appui de plusieurs partenaires, l'Union de groupements des étuveuses de riz de Bama a amélioré la qualité des balles de riz au moyen d'adoption des innovations techniques, systèmes d'étuvage et de décorticage du riz paddy. La distribution de l'électricité de la localité de Bama est assurée par la Société Nationale d'Electricité du Burkina (SONABEL) depuis la station de Bobo-Dioulasso, chef-lieu de la Région. Au nombre de 1 200 en 2011, les consommateurs sont constitués essentiellement de petits consommateurs tels que les ménages, et de gros consommateurs dont les meuniers, les opérateurs de téléphonie mobile et les organismes de microcrédit (Chidikofan, 2017). La Figure 9 présente la commune de Bama avec ses différents cours d'eau.

Evaluation des conditions de développement d'une filière de gazéification de biomasse agricole au Burkina Faso

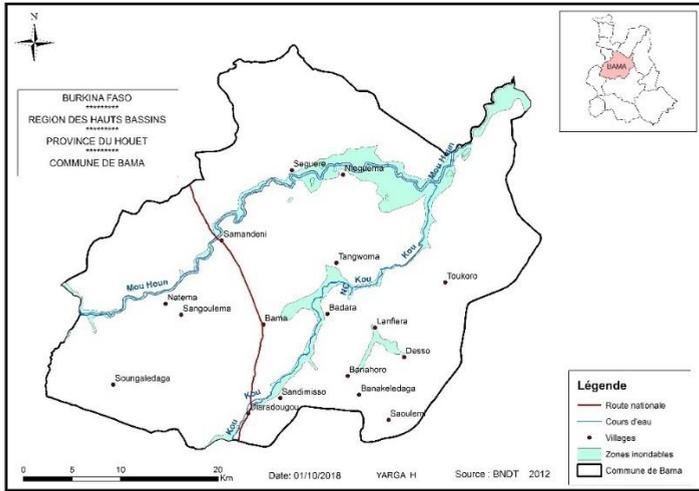


Figure 9 : Représentation graphique de la commune de Bama

La commune de Dano est comprise entre 11° et 12° de latitude Nord et entre 3° et 4° de longitude ouest. Elle fait partie d'une province limitée à l'est par la province de la Sissili et la république du Ghana. Couvrant une superficie de 669 km², elle compte 23 villages administratifs dont la ville de Dano, chef-lieu de la commune (Figure 10).

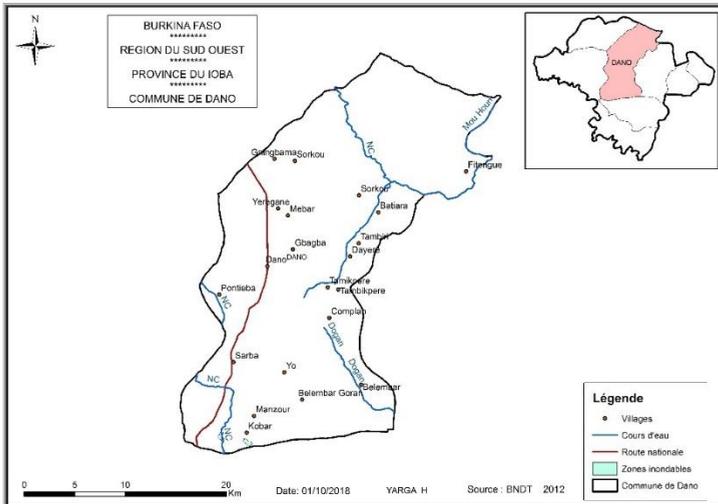


Figure 10 : Représentation graphique de la commune de Dano

Dans la commune de Dano, l'agriculture est basée principalement sur la culture céréalière. Le sorgho blanc, le sorgho rouge, le mil, le maïs, le riz, l'arachide, le niébé, le soja, la patate constituent les produits céréaliers les plus couramment rencontrés.

La commune de Po est une zone frontalière du Burkina avec le Ghana. Lors du recensement général de la population et de l'habitation de 2006, la commune comptait 51 552 habitants. La population est reconnue culturellement être parmi les plus grands consommateurs d'arachide engendrant d'importantes quantités de coques d'arachide. La Figure 11 représente la commune de Po avec ses différents cours d'eau.

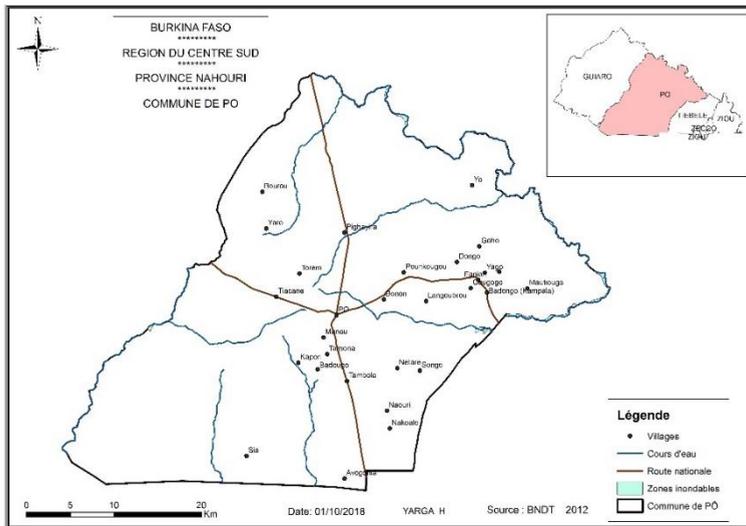


Figure 11 : Représentation graphique de la commune de Po

2.2. Identification des barrières d'adoption de la gazéification

Cette partie est une section de la publication intitulée « Key Barriers to the Adoption of Biomass Gasification in Burkina Faso. Sustainability 2021, 13, 7324. <https://doi.org/10.3390/> de Barry, F.; Sawadogo, M. ; Bologo (Traoré), M. ; Ouédraogo, I.W.K. ; Dogot, T..

2.2.1. Études de cas de la pyrolyse au Burkina Faso : point de référence du Benchmarking

La phase de Benchmarking a été effectuée au Bénin et au Burkina Faso. C'est une démarche développée au début des années 1980 par la société Xerox à la suite d'un problème de gestion des stocks nécessitant un lourd investissement. Encore appelé parangonnage ou étalonnage, il consiste à se comparer aux meilleurs pour s'améliorer (Lepoivre, 2005). La définition du terme « benchmarking » varie selon le domaine d'application. Cependant, le fondateur de ce concept, l'a défini comme

un processus continu et systématique de mesure des performances, des produits, des méthodes et des services par rapport à ceux des concurrents les plus sérieux et des entreprises reconnues comme leaders mondiaux pour assurer la supériorité (Ettorchi-Tardy, Levif, and Michel, 2011). Le benchmarking peut aider à comprendre l'échec de la gazéification en le comparant au succès de la pyrolyse. Depuis 2015, des technologies de pyrolyse ont été installées dans plus de six usines de transformation de noix de cajou et de séchage de mangues au Burkina Faso. Elles ont été conçues pour produire de l'énergie thermique à partir de déchets (coques de cajou) et réduire d'au moins un tiers, les déchets produits par ces usines selon une approche respectueuse de l'environnement. Le système peut fonctionner indépendamment du réseau électrique. La pyrolyse ayant connu un succès au Burkina Faso, est retenue comme le point de référence permettant d'identifier les opportunités internes d'amélioration de la gazéification. Par la suite, un processus de hiérarchie analytique (AHP) basé sur ce référentiel est développé pour représenter des décisions subjectives à travers les connaissances et l'expérience des décideurs.

2.2.2. Collecte des données

Les données ont été collectées à l'aide d'une revue de la littérature et des entretiens semi-structurés avec les opérateurs et les porteurs de projets de développement des technologies de gazéification au Burkina Faso (responsables d'ONG, transformateurs de riz paddy, meuniers, techniciens et entreprises privées) (Figure 12). De plus, des informations ont été recueillies à travers un benchmarking sur la pyrolyse, auprès de responsables d'huileries et de transformateurs de noix de cajou. Ces informations ont concerné le contexte d'installation de la pyrolyse, les avantages, les obstacles et les moteurs d'adoption de la gazéification.



Figure 12 : Image illustrative des entretiens de groupe
Source : cliché réalisé par Barry, en 2020

2.2.3. Méthode d'analyse du processus hiérarchique

La méthode d'analyse du processus hiérarchique (AHP) a été utilisée pour classer les obstacles à l'adoption de la gazéification de la biomasse en raison de sa simplicité mathématique et de sa flexibilité (Rimal and Tugrul, 2013). Utilisée seule ou combinée à d'autres méthodes, elle est l'un des outils de recherche préférés dans plusieurs domaines de prise de décision (Gunduz and Almuajebh, 2020), (Hamurcu and Eren, 2020). Par exemple, la méthode AHP a été largement utilisée dans le domaine des énergies renouvelables. Récemment, AHP a été utilisé pour hiérarchiser les principaux obstacles à l'utilisation de mini-réseaux basés sur les énergies renouvelables au Ghana (Bukari et al., 2021) et au Myanmar (Numata, Sugiyama, and Mogi 2020), pour le développement des énergies renouvelables qui peuvent combler le manque d'électricité au Kazakhstan (Karatayev et al., 2016), l'acceptabilité des technologies d'énergie renouvelable au Népal (Ghimire and Kim, 2018) et en Inde (Luthra et al., 2015). AHP compare les critères par paires selon une structure hiérarchique à plusieurs niveaux et construit un ensemble de matrices de comparaison par paires pour déterminer les poids des barrières (Saaty, 2008 ; Saaty, 2001).

Dans la présente recherche, les matrices de comparaison par paires des catégories et sous-catégories de barrières ont été construites soit par simulation ou en recueillant les opinions des parties prenantes selon une approche participative. Les

informations recueillies sont simulées pour chaque catégorie de barrières et chaque sous-catégorie de barrières selon une échelle de neuf points, appelée échelle de Saaty (Tableau 2).

Tableau 2 : Échelle de Saaty

Poids ou intensité de la comparaison	Jugement verbal de préférence
1	Importance égale
2	Faible ou légère
3	Importance modérée
4	Importance plus modérée
5	Importance forte
6	Forte plus
7	Importance très forte
8	Très, très forte
9	Importance extrême

L'importance relative d'un composant ou d'un critère i par rapport au composant j est évaluée à l'aide de cette échelle de Saaty, et attribuée à la $(i, j)^{\text{ème}}$ position de la matrice de comparaison par paires. L'inverse du jugement attribué est automatiquement associé à la $(j, i)^{\text{ème}}$ position. Les éléments diagonaux de la matrice sont égaux à 1. Ainsi, la matrice de comparaison est formée selon la règle suivante (Chang et al., 2007) :

$$a_{ij} > 0 ; a_{ji} = 1/a_{ij} \text{ et } a_{ii} = 1 \quad \forall i.$$

Les jugements ont été combinés en appliquant la moyenne géométrique pour former la matrice des jugements de comparaison. Après avoir construit la matrice de comparaison par paires, nous avons utilisé ses valeurs propres pour sélectionner la plus élevée ou le vecteur propre associé. Les termes de cette matrice en colonnes constituent les poids ou coefficients d'importance des différents critères. Les poids de chaque catégorie ont été calculés à l'aide de l'équation (1) :

$$Aw = \lambda_{\max} * w \tag{1}$$

- où A = la matrice carrée résultant de la comparaison par paires de taille $n \times n$, pour n critères ;
- w = le vecteur propre ou vecteur de priorité de taille $n \times 1$, ou poids ;
- λ_{\max} = la valeur propre maximale.

La valeur propre et le vecteur de priorité peuvent être obtenus en résolvant le principe du vecteur propre. Cependant, le vecteur de priorité peut être résolu de

différentes manières. Dans ce document, les priorités ont été obtenues en normalisant les moyennes géométriques des lignes.

Dans cette approche hiérarchique, il est également possible de vérifier la cohérence de la comparaison des barrières en calculant la cohérence ou le ratio de cohérence (RC). Le RC est un test d'acceptation des poids des différentes barrières. Cette étape vise à détecter les incohérences possibles dans la comparaison de l'importance de chaque paire de barrières. Le ratio de cohérence RC est calculé en divisant l'indice de cohérence (IC) par l'indice normalisé (RI) comme dans l'équation (2). Ensuite, l'indice de cohérence est calculé à l'aide de l'équation (3). L'indice randomisé dépend de la taille de la matrice ou du nombre de barrières considérées (tableau 3).

$$RC = IC/RI, \quad (2)$$

$$IC = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (3)$$

Tableau 3 : Valeur de l'indice aléatoire en fonction de la taille de la matrice

Taille de la matrice	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Source : (Saaty, 2000)

La valeur du ratio varie en fonction de la taille de la matrice. Avec des matrices supérieures à 5, les jugements des critères deviennent difficiles à apprécier. Pour que la cohérence des jugements comparatifs soit acceptable, le rapport RC doit normalement être inférieur ou proche de 0,2 (Saaty & Kearns, 1985). Certains auteurs ont considéré un ratio d'au plus 0,1 (Luthra et al., 2015) et d'autres 0,2 (Numata et al., 2020) (Numata et al., 2020), (Keeley and Matsumoto, 2018). Dans cette recherche, un ratio d'au plus 0,2 est considéré.

2.2.4. Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité peut être utile pour la validation du modèle d'aide de prise de décision. Les résultats des pondérations des critères sont basés sur des jugements subjectifs et par conséquent, ils sont généralement imprécis et modifiables. L'approche de l'analyse de sensibilité détermine le plus petit changement dans les poids actuels des critères ; ce qui peut modifier le classement existant des alternatives. Selon Luthra et al. (2015), le décideur peut prendre de meilleures décisions s'il est en mesure de déterminer le degré de criticité de chaque critère ou le degré de sensibilité du classement actuel des solutions de remplacement aux modifications apportées aux poids actuels des critères de décision.

2.3. Méthode et paramètres d'évaluation de la disponibilité de la biomasse

L'évaluation des quantités de biomasse comprend quatre niveaux de potentiel : i) le potentiel théorique correspondant à son niveau de productivité dans un espace donné ; ii) le potentiel mobilisable ou la fraction de potentiel théorique qu'il est possible de prélever en tenant compte des droits d'accès et d'appropriation, sans modifier les usages actuels des différents acteurs produisant cette biomasse ; iii) le potentiel énergétique équivalant à l'énergie calorifique contenue dans les biomasses, en considérant leur pouvoir calorifique inférieur, et iv) l'accessibilité économique de la biomasse (FAO, 2014b ; Audouin & Gazull, 2015 ; ENER-SUPPLY, 2012 ; Algeri et al., 2019) (Figure 13).

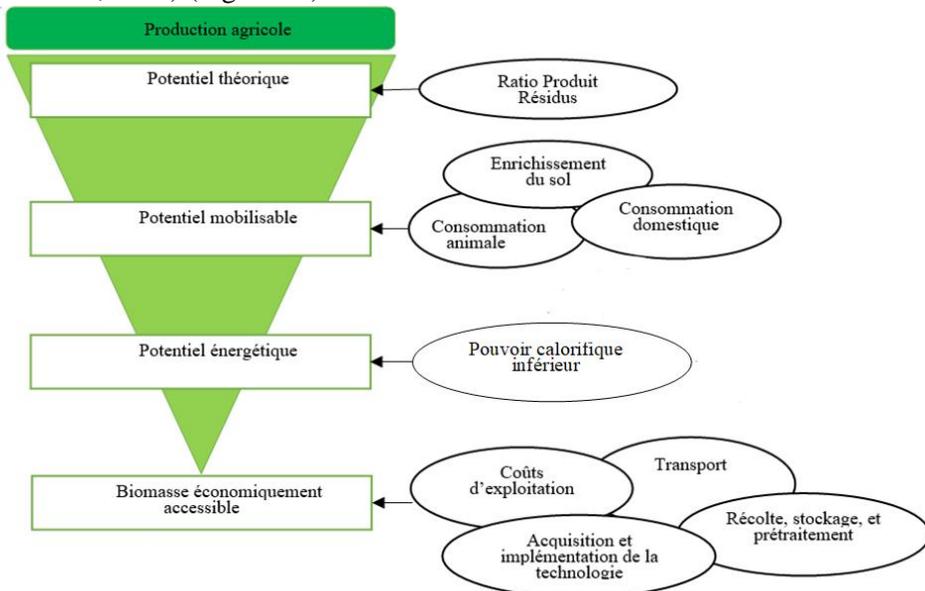


Figure 13 : Niveaux d'évaluation de la disponibilité de la biomasse agricole

Les différents niveaux de potentiel des résidus agricoles sont estimés en tenant compte de nombreux paramètres qui seront mis en évidence ici. On considère le potentiel brut de résidus dérivé des données statistiques générales sur la production annuelle des cultures. Les résidus qui doivent être laissés à la surface du sol pour améliorer et protéger la qualité du sol sont également pris en compte. Un autre paramètre influençant la disponibilité des cultures pour la production d'énergie est la concurrence des usages alternatifs c'est-à-dire usages alimentaires, énergétiques ménagers et alimentaires pour animaux. De plus, l'influence du coût de production sur la disponibilité de la biomasse est étudiée.

2.3.1. Quantité potentielle théorique de biomasse

La quantité théorique de biomasse QT_i est estimée à partir de la production en grains de la culture donnée et du rapport entre la quantité de résidus et la quantité de produit brut avant transformation (Eq1).

$$QT_i = P_i * RPR_i \quad (1)$$

Où QT_i (tonnes) est la quantité potentielle théorique de résidus de la culture i ,
 P_i (tonnes) désigne la production annuelle de la culture i ,
 RPR_i (tonnes) est le rapport résidu/produit de la culture i .

Les données sur la production annuelle et les surfaces cultivées utilisées pour déterminer la quantité de résidus agricoles et agro-industriels proviennent des statistiques de l'Institut National de la Statistique et de la Démographie du Burkina Faso. Comme la plupart des produits agricoles sont destinés à la fois aux marchés locaux et aux industries de transformation telles que les rizeries et les huileries, les quantités moyennes traitées dans les agro-industries ont été quantifiées à partir de la même source de données.

Le terme « ratio RPR » est ambigu car la notion de résidu est divergente dans la littérature. Il est difficile de savoir si le résidu est une fraction du résidu aérien total ou la portion récoltable seulement (Bentsen, Felby, and Thorsen, 2014). Certains auteurs le considèrent comme le résidu de toute la partie aérienne de la culture (Karan & Hamelin, 2021 ; García-Condado et al., 2019). Par contre, Ronzon & Piotrowski (2017) l'assimilent juste à la partie aérienne exploitable en ce sens qu'il y'a toujours des parties non récoltables en raison de la gestion de la ferme, de la période de récolte ou de la moissonneuse utilisée.

Dans cette recherche, ce ratio est considéré comme le rapport entre la quantité de résidus et la quantité de graines récoltées. Ainsi, la valeur du ratio dépend de plusieurs facteurs dont les conditions pédologiques et climatiques locales, les différences dans les pratiques agricoles telles que les taux et les types d'engrais appliqués et la hauteur de coupe des tiges lors de la récolte, les différentes catégories utilisées et les valeurs de production des cultures. Une valeur de ratio appropriée pour la zone d'étude fournit une estimation plus robuste du potentiel de la biomasse (Morato et al., 2019). Ainsi, les sources de données spécifiques à l'Afrique de l'Ouest, notamment les zones à climat sahélien ont été privilégiées. Toutefois, peu de documents traitent du rapport résidus/grains spécifiquement pour cette zone. De plus, les quelques recherches disponibles ne couvrent pas toutes les cultures. Ce qui rend difficile la synthèse des données par spéculation et par pays. Pour réduire le biais dans les estimations, les ratios issus de la littérature ont été comparés à ceux issus des données de carré de rendement sur la productivité agricole et les résidus de culture (Tableau 4).

Tableau 4 : Rapport résidu/produit moyen appliqué à chaque résidu étudié

Résidus agricoles	Ratio Résidu/Produit	Source	Ratio moyen utilisé
Balles de riz	0,21	(FAO, 2014d ; Kemausuor et al., 2014 ; Ayamga et al., 2015)	0,21
Tiges de maïs	0,90 – 1,50	(Kartha & Larson, 2000 ; Kartha & Larson, 2000)	1,20
Rafle de maïs	0,50– 0,80	(Saba, 2011 ; FAO, 1998)	0,65
Tiges de cotonnier	1,50 – 2,50	(FAO, 2014d ; Nygaard et al., 2012)	2,00
Coques d'arachide	0,40	(Gueye et al. 2014)	0,40
Tiges de sorgho	2,00 – 2,50	(FAO, 2014d ; Nygaard et al., 2012)	2,25

Le Tableau 4 montre que les RPR des tiges de maïs, des rafles de maïs, des tiges de cotonnier et des tiges de sorgho sont très divergents dans la littérature. Une estimation réalisée au Burkina Faso à partir des données de rendement du maïs et du sorgho avec des doses d'engrais variables a donné des ratios de 0,9 et 0,5. Pour le coton, ce ratio est d'environ 1,8 pour la saison 2018-2019 dans la région de Koumbia au Burkina Faso. Pour le riz, le ratio est de 0,21, comme dans de nombreuses études. Ainsi, les valeurs du RPR varieraient selon les exploitations et les régions, comme mentionné ci-dessus. Une moyenne des différentes valeurs de RPR a donc été considérée pour les valeurs de ratios très disparates. Les valeurs les moins divergentes ont été utilisées pour le calcul des quantités de résidus.

2.3.2. Utilisation compétitive des résidus de culture et potentiel mobilisable

La biomasse a des utilisations diverses. Elle est soit brûlée dans les champs, soit enfouie pour améliorer ou maintenir la fertilité des sols, la protection contre l'érosion et utilisée pour l'alimentation animale et la litière, ou le chauffage domestique et la cuisson (Gauvrit and Mora, 2010). Les résidus utilisés à d'autres fins sont calculés sur la base du pourcentage défini des résidus totaux produits.

Dans cette recherche, les données sur l'utilisation endogène de la biomasse ont été recueillies auprès des membres des unions de transformateurs de riz, des groupes de producteurs agricoles, des agents techniques d'agriculture et d'un correspondant-coton. Les informations ont été collectées dans des zones de faible production (Plateau central et Centre sud) et de forte production agricole (Hauts-Bassins et Boucle du Mouhoun) (Tableau 5).

Tableau 5 : Echantillon de collecte d'informations

Commune	Région administrative	Transformatrices de riz	Agents techniques d'agriculture et/ou Correspondant-coton	Producteurs de coton
Bama	Hauts-Bassins	11	1	5
Dédougou	Boucle du Mouhoun	0	1	10
Kombissiri	Centre sud	0	1	15
Mogtédo	Plateau central	15	1	7
Total		26	4	37

Les proportions d'utilisation endogène des résidus agricoles ont été comparées aux normes de la Food and Agriculture Organisation (FAO) et à la littérature. Selon la FAO, la quantité de résidus laissés sur le terrain est calculée comme le produit de la somme totale des résidus produits par an et du pourcentage de résidus laissés sur le terrain défini par l'utilisateur ou de la valeur par défaut fournie par l'outil d'évaluation des résidus. Cette valeur par défaut pour l'utilisation des résidus est de 25 % si les résidus sont produits ou collectés au champ et de 0 % si l'emplacement se trouve à l'usine de traitement. Une fraction récupérable de 10 % à 25 % du total des résidus disponibles a été supposée dans des études précédentes (OECD/IEA 2010) à des fins énergétiques. Kemausuor et al. (2014) considèrent une disponibilité de 10 %, 25 % et 40 % des résidus comme faible, moyenne et élevée.

La quantité mobilisable de biomasse (QM_i) quant à elle, est calculée en appliquant l'équation 2 suivante.

$$QM_i = QT_i * \alpha_i \quad (2)$$

Où QM_i (tonnes) est la quantité potentielle mobilisable de résidus de la culture i , QT_i (tonnes), la quantité potentielle théorique de résidus de la culture i et, α_i , la fraction récupérable basée sur plusieurs hypothèses d'utilisation des résidus.

2.3.3. Potentiel énergétique

La quantité du potentiel énergétique contenue dans les résidus mobilisables par an dépend du pouvoir calorifique de celui-ci. Le PCI de la plupart des résidus agricoles est compris entre 16 et 20 MJ/kg (Tripathi & Shukla, 2015 ; FAO, 2014a). Selon des tests réalisés au LabEREE et en milieu réel (Dano), il est de 17,3 MJ/kg pour les balles de riz et 17,2 MJ/kg pour les tiges de cotonnier.

Elle est calculée suivant l'équation 3.

$$E_i = QM_i * PCI_i \quad (3)$$

Où E_i (Tep) est le potentiel énergétique brut annuel du type de matière première bioénergétique et

PCI_i (MJ/kg), le pouvoir calorifique inférieur du résidu de la culture i .

La quantité de biomasse mobilisable étant en tonne, elle a été convertie en kilogramme dans la détermination du potentiel énergétique. Le potentiel énergétique ainsi obtenu en MJ, est divisé par 41 868 pour avoir le potentiel exprimé en Tep car 1 Tep correspond à 41868 MJ. Autrement, le développement de l'équation (3) donne la formule :

$$E_i = [QM_i \text{ (en tonne)} * PCI_i \text{ (MJ/kg)} * 1000 \text{ kg}] / 41868$$

2.3.4. Distribution spatiale de la biomasse

La quantification de la biomasse a été établie au niveau des régions administratives. La localisation géographique exacte des zones agricoles pourrait mieux préciser la zone de service pour la fourniture de résidus gazéifiables. Ainsi, le logiciel ArcGIS 10.6 a été utilisé pour créer des cartes de distribution spatiale basées sur la densité de la biomasse dérivée de la quantité totale de biomasse mobilisable et de la surface couverte par chaque type de biomasse au Burkina Faso. Cette cartographie a permis de montrer la répartition spatiale des résidus et d'identifier les localités générant d'importantes quantités de résidus agricoles.

2.3.5. Accessibilité économique des résidus mobilisables

2.3.5.1. Méthode de calcul du coût de revient

Le calcul de l'accessibilité économique des résidus mobilisables pour la gazéification nécessite une analyse du coût de revient du syngas. Yelles Chaouche (2021) définit le coût de revient d'un produit ou d'un service comme étant l'élément clé et incontournable pour la gestion d'une entreprise. Pour l'auteur, il regroupe la somme totale des charges d'exploitation directes et indirectes, fixes et variables engagés dans la production et la distribution de ce produit ou service donné.

Sous l'angle de la comptabilité analytique, le coût de revient se calcule en identifiant l'ensemble des coûts générés par l'activité puis en divisant la somme obtenue par les quantités produites en vue de l'exprimer en unité pondérale, suivant l'équation 4 (Meyssonier, 2001; Lebailly et al., 2000).

$$CR = \frac{\sum Ci + Cd}{Qp} \quad (4)$$

Où *CR* désigne le coût de revient du produit considéré ;

Ci, Charges indirectes ;

Cd, Charges directes ;

Qp, quantité de produits.

Dans une entreprise industrielle, le coût de revient englobe le coût de production constitué des coûts d'achat et d'approvisionnement, et ceux de production, le coût hors production comprenant les coûts de support à la production, de développement, de distribution et les différents coûts administratifs et financiers, et les coûts divers.

2.3.5.2. Réseau d'approvisionnement en biomasse et limite de l'analyse

La connaissance du rayon d'approvisionnement est très importante pour déterminer les coûts et les moyens de transport qu'il faut pour la collecte de la biomasse. Plus la distance du lieu de collecte est grande par rapport au site de valorisation de la biomasse, moins la performance économique de l'agro-industrie se réalisera et plus les émissions de gaz à effet de serre seront importantes à cause du carburant utilisé pour le transport. Un seuil d'au plus 150 km est accepté dans la littérature pour une collecte économiquement viable des résidus (Zheng and Qiu, 2020).

La main d'œuvre peut être aussi un facteur à prendre en compte dans les études de faisabilité économique. Au Burkina Faso, les activités d'orpaillage entraînent une perte de la main d'œuvre agricole. Si auparavant ces activités n'étaient que saisonnières et mobilisaient les actifs agricoles seulement en saison sèche, actuellement elles sont permanentes malgré l'arrêté gouvernemental ordonnant la fermeture des sites à cause des risques d'éboulement. Par conséquent, on assiste à une absence de main d'œuvre, empêchant la diversification des activités génératrices de revenus (Sangare, 2016 ; Sawadogo, 2021). De ce fait, la disponibilité de la main-d'œuvre détermine également le choix des sites potentiels des technologies bioénergétiques. Une main-d'œuvre optimale s'obtient dans des localités abritant entre 10 000 et 50 000 habitants (Marvin, Schmidt, and Daoutidis, 2012).

Dans la présente recherche, la délimitation de zone d'approvisionnement tient ainsi compte de plusieurs paramètres tels que la demande énergétique, le rayon d'approvisionnement nécessaire à la satisfaction de la demande en énergie, la main d'œuvre et l'accessibilité au réseau routier. Deux champs d'analyse sont définis :

- la mobilisation de la biomasse depuis les points de collecte jusqu'à l'entrée du gazéificateur. L'objectif est de voir si l'approvisionnement à partir des matières premières ciblées peut se faire à un coût raisonnable en prenant comme référence pour la comparaison, le prix du bois sur le marché.
- l'accessibilité économique de la biomasse concerne son prix de revient à la

sortie du système de gazéification, en vue d'analyser le coût de revient d'un kWh de syngas produit avec une technologie importée et une autre technologie fabriquée localement.

2.3.5.3. Postes des coûts totaux liés à la mobilisation de la biomasse

Pour chaque étape de la chaîne d'approvisionnement de la biomasse, les différentes options possibles ont été analysées à travers l'évaluation de l'ensemble des coûts associés à l'acquisition et au transport de la biomasse.

Les coûts associés à l'acquisition des résidus agricoles sont constitués des coûts de récolte, de stockage et de séchage (Zahraee, Shiwakoti, and Stasinopoulos 2020). Ces composantes sont supposées être constantes par zone et invariables entre les cultures. Quant aux coûts de récolte, ils sont considérés équivalents en moyenne à 15 €/ha/2tonnes sur la base des informations recueillies sur le terrain. Les coûts de stockage, de conditionnement et de séchage ont été estimés à 15 €/tonne. Ces paramètres sont détaillés dans la section 4.4. du chapitre 4.

Le coût du transport a été estimé par unité et par distance. L'hypothèse est basée sur l'utilisation d'un camion de 20 tonnes (capacité volumique de 75 m³). Ce type de camion transporte des produits agricoles à 1,5 €/km/20tonnes. Pour la distance de transport, l'usine de gazéification qui a été considérée est située dans la région de Bama dans les Hauts - Bassins (Barry et al. 2021). La distance moyenne maximale de 152 km couvre les régions à forte production de résidus par les axes Bama - Orodara (106,5 km) et Bama - Dédougou (197,4 km). Cette distance correspond au seuil admis dans la littérature pour une collecte de résidus économiquement viable, avec des distances allant de 80 à 161 km (Zheng & Qiu, 2020 ; Maung et al., 2013).

2.4. Méthode d'analyse de la chaîne de valeur production de l'énergie par gazéification

La méthode adoptée pour l'analyse de la chaîne de valeur de la production d'énergie par gazéification est l'approche « Value Chain Analysis for Development (VCA4D) » étant donné qu'elle effectue des analyses de chaîne de valeur en tenant compte de la durabilité et de l'inclusivité de ces chaînes de valeur. C'est un cadre méthodologique élaboré par la Direction Générale pour la Coopération Internationale et le Développement et la Direction Croissance et développement durables de l'EuropeAid depuis 2015 en vue d'évaluer la durabilité d'une chaîne de valeur d'un point de vue économique social et environnemental. Il fournit une description générale de la chaîne, un diagnostic technique de ses différentes étapes et une analyse de sa structure de gouvernance et de pouvoir. Il définit l'approche comme étant un système « chaîne de valeur » identifiant la série d'étapes allant de la production initiale à la consommation finale (ou à l'exportation) ainsi que les acteurs impliqués à chaque étape. Elle situe les activités/opérations de ces acteurs (Coopération Internationale et Développement - EuropeAid, 2018). Elle identifie également les produits, et les flux financiers et d'information entre les acteurs et les

zones. L'approche VCA4D est un outil couramment utilisée dans les domaines de l'agriculture, l'élevage, la pêche, l'aquaculture et la foresterie (Basset-mens et al., 2014 ; Michel et al., 2016). Elle peut s'appliquer dans le domaine des bioénergies.

Il a été démontré que la robustesse de l'analyse dépendra de la disponibilité des données fiables (Coopération Internationale et Développement - EuropeAid, 2018). Ainsi, l'analyse repose essentiellement sur l'analyse fonctionnelle. Cette analyse permet de comprendre le détail de toutes les étapes de la chaîne d'approvisionnement de la biomasse agricole. Pour ce faire, il s'est agi de préciser pour chaque maillon (collecte ou récolte de la biomasse, transport, stockage, transformation ou conversion et utilisation d'énergie), les acteurs et les moyens nécessaires (équipements, compétences, financement, etc.) pour les opérations. L'approche a consisté ainsi à cartographier la chaîne de valeur et à révéler les différents flux de matériels et financiers.

Les données ont été collectées à l'aide des entretiens individuels auprès des utilisateurs de la technologie de gazéification, des commerçants et transporteurs des produits agricoles associés à l'exploitation des rapports d'évaluation des projets de gazéification. Les informations recueillies ont été simulées à partir d'hypothèses de calcul du prix de revient complet du syngas, déterminé à partir des coûts directs et indirects en appliquant l'équation 4 mentionnée plus haut. Le calcul de ce prix de revient intègre le prix de revient de la biomasse à l'entrée de l'unité de gazéification et les coût d'investissement et d'exploitation en tenant compte du rendement de la transformation.

Les coûts d'exploitation d'une usine de gazéification sont calculés sur une base annuelle et se composent généralement des coûts d'entretien et de la main-d'œuvre pour le fonctionnement de la technologie.

Les coûts d'entretien comprennent toutes les dépenses liées à l'entretien et à la réparation de l'équipement. Ces coûts sont souvent supposés équivalent à un taux forfaitaire de 6 % du coût d'investissement initial, selon les experts ayant travaillé sur des projets de gazéification au Burkina Faso (Chidikofan, 2017).

Le personnel d'exploitation d'une unité de gazéification comprend un ingénieur chargé de coordonner le fonctionnement de l'équipement. Il est assisté d'un technicien mécanicien qualifié et de deux ouvriers semi-qualifiés ou non qualifiés chargés de la préparation, de la manutention et de l'alimentation de la biomasse à l'entrée du gazogène. Le salaire mensuel est de 460 € pour l'ingénieur, 250 € pour le technicien mécanique, et 150 € chacun pour les deux ouvriers. Cela représente un salaire annuel de 12 120 €. En ajoutant 25 % pour les cotisations de sécurité sociale, le coût total annuel du personnel est de 15 150 €.

La taille des technologies de gazéification pourrait également avoir une influence sur les coûts d'approvisionnement de la matière première. En effet, une usine de plus grande taille implique des distances de transport et des coûts plus importants pour la collecte de la biomasse. Pour garantir la faisabilité économique, on considère dans le cadre de cette recherche, une installation d'un gazogène à concevoir dans le cadre du projet de recherche et développement (PRD) pour une production de chaleur à l'échelle semi-industrielle, d'une puissance de 44 kW.

Selon plusieurs recherches, la consommation en biomasse des gazogènes à co-courant, généralement adaptés pour la conversion de la biomasse agricole, varie selon leur puissance. Il faut par exemple 200 kilogrammes par heure pour des gazogènes de 1MW (Ricoul, 2016 ; Van De Steene, 2014). Ce sont des technologies très avancées qui convertissent efficacement la biomasse. Dans le contexte burkinabè, la consommation de biomasse par heure de fonctionnement est de 20 kilogrammes pour la production d'énergie thermique avec des capacités de moins de 50 kWth (ASE, 2017 ; Zoungrana, 2022). Sur cette base, la quantité en biomasse est de 200 kilogrammes par jour, soit environ 48 000 kilogrammes ou 48 tonnes dans l'année en supposant que la technologie considérée fonctionne au moins 10 heures par jour, soit 2 400 heures pour 240 jours dans l'année.

Le marché des technologies de gazogène n'existe pas encore dans les pays africains rendant difficile l'accès à l'information précise sur les coûts d'investissement. Certains fournisseurs Indien ANKUR proposent des prix compris entre 20 960 et 746 177 € pour des systèmes de puissance électrique variant entre 10 et 1000 kW (Tableau 6).

Tableau 6 : Paramètres généraux des gazogènes à co-courant à vendre

Modèle	HBF-30W/3000W
Type	Courant descendant Lit Fixe
Débit de gaz	(30 - 3000) m ³ /H
Matériel de consommation	600 kg/h
Valeur calorifique	4600 - 5200 kJ/m ³
Efficacité	> 72 %
Puissance du ventilateur	220 V/380 V
Application	10 kW - 1 MW Biomasse Groupe Électrogène

En prenant pour hypothèse que la centrale produit uniquement du syngas pour la production de l'énergie thermique, essentiellement la vapeur d'eau pour l'étuvage du riz, le coût d'investissement regroupe le coût d'acquisition de l'équipement prêt à utiliser (le dispositif d'épuration et de valorisation du gaz) et les coûts d'implantation. Pour l'implantation de l'équipement, on peut appliquer un pourcentage du coût d'investissement total du système en fonction de la puissance installée : 15 % si la puissance est inférieure à 20 kW, 10 % si elle est comprise entre 20 et 100 kW et 8 % si elle est supérieure à 100 kW (Chidikofan, 2017). Dans ce cadre, 10 % du coût d'investissement est considéré.

L'investissement initial comprend le coût de l'équipement, le coût du transport, de l'assurance et de l'installation. Le marché des technologies de gazéification n'existe pas encore dans les pays africains. Il est donc difficile d'obtenir des informations précises sur les coûts d'investissement. En se référant aux prix des gazogènes proposés par les fournisseurs indiens, celui de 44 kW coûteraient 20 960 €.

Dans la détermination du coût de revient du kWh de syngas produit, l'amortissement de l'équipement en fonction de la durée de vie de l'équipement,

qui peut être de 10 ans, est considéré comme constant dans ce document. Les coûts liés à l'implantation regroupent les paramètres tels que le transport, les taxes et assurance, l'installation et le génie civil, le stock de pièces de rechange, la formation sur le fonctionnement et divers imprévus. L'ensemble de ces frais a été estimé pour le cas installé à Bama à 90,15 % du coût initial d'un gazogène de 34 kW couplé à un groupe électrogène d'une valeur de 48 435 €. Les coûts d'implantation sont alors d'environ 43 592 € correspondant à un amortissement de 4 359 € par an (Chidikofan, 2017). Ainsi, le coût d'implantation amorti d'un gazogène de 44 kW revient à 5 641 €. Sur cette base, une valeur annuelle moyenne d'environ 5 000 € est retenue dans cette thèse, équivalent à l'ensemble des coûts liés à l'implantation et au transport de l'équipement depuis l'Inde jusqu'au site de la centrale au Burkina Faso.

2.5. Conclusion partielle

Le chapitre 2 a permis de développer la démarche méthodologique retenue dans le cadre de cette recherche. Cette démarche a d'abord porté sur la sélection des sites de la recherche, la collecte des données auprès des transformateurs (trices) de riz paddy, des mangues, de l'anacarde, utilisateurs des technologies de gazéification et de pyrolyse, des agents et des experts en charge de l'énergie, des producteurs agricoles, des agents techniques d'agriculture, et des correspondants coton. Puis, l'approche AHP appliquée pour l'identification des barrières clé d'adoption de la gazéification a été revue et adaptée. Enfin, l'approche générale utilisée pour évaluer l'accessibilité des résidus agricoles pour la conversion d'énergie a suivi trois étapes. La première étape a estimé le potentiel de production théorique de résidus sur la base de la production agricole et des ratios de production de résidus (RPR). De plus, les caractéristiques physiques et chimiques des résidus sont déterminées (par exemple teneur en humidité, valeurs calorifiques). Deuxièmement, divers critères de durabilité et autres contraintes qui limitent la disponibilité des résidus sont identifiés en tenant compte des conditions existantes dans le pays et des meilleures pratiques internationales. Des contraintes environnementales sont imposées pour protéger le sol contre l'érosion. D'autres aspects pris en compte comprennent l'alimentation des animaux et les besoins pour l'énergie à usage domestique. La troisième étape détermine le potentiel en énergie contenu dans les résidus. La quatrième étape évalue les exigences logistiques pour l'approvisionnement en résidus des champs à l'usine de conversion finale. À ce stade, les technologies de récolte, de collecte et de prétraitement et les coûts associés sont également évalués. De plus, les besoins de transport et de stockage sont évalués pour estimer le coût de livraison par tonne de biomasse. L'application des méthodes d'analyse adoptées a permis de répondre aux questions de recherche dans les prochains chapitres.

**Mise en évidence des barrières au
déploiement de la gazéification**

Chapitre 3: Mise en évidence des barrières au déploiement de la gazéification au Burkina Faso

Le présent chapitre vise à identifier les diverses barrières potentielles à l'adoption de la technologie et à les classer en appliquant la méthode AHP jugée appropriée dans la partie théorique. Dans un premier temps, les trois études de cas qui ont servi de support à cette analyse ont été décrites en abordant leur historique, leur mode de financement et de mise en œuvre ainsi que leurs caractéristiques techniques et organisationnelles. Afin de structurer l'analyse, le cadre théorique de la sociologie de la traduction a été adopté. Ce cadre a permis d'avoir une vision claire sur les jeux d'acteurs dans la mise en œuvre des projets d'implantation de la gazéification. Callon (1986) oriente les chercheurs vers cinq phases à suivre pour tenir compte non seulement de tous les acteurs mais aussi de leur représentativité et de leurs caractéristiques dans le cadre de la mise au point d'une innovation. Le contexte d'installation a été d'abord décrit. Cette description a permis de montrer comment les zones d'installation semblaient être des lieux favorables au développement de la production d'énergie électrique. Par la suite, la problématisation de la technologie par les responsables des projets et le dispositif d'intéressement mis en place seront présentés. Enfin, le chapitre se termine en évaluant les différentes barrières au déploiement de la gazéification de biomasse en appliquant la méthode AHP en vue de relever les conditions de développement de la filière, suivie d'une conclusion partielle synthétisant les points essentiels à retenir.

3.1. Description de l'environnement de la gazéification au Burkina Faso

Des installations pilotes de gazéification ont été initiées au Burkina Faso par des ONG et des structures de recherche (Saidou, 2013; Chidikofan, 2017). Les gazogènes permettaient de produire de l'énergie thermique et électrique à partir de la biomasse. Les types de biomasse utilisés sont les résidus de culture (tiges de mil, de sorgho, de maïs, de coton), agroalimentaires (balles de riz) et ménagés (coques d'arachide).

En 2009, une ONG allemande dénommée Atmosfair a installé un gazogène de marque indienne d'une capacité de 22 kWe pour produire l'électricité dans la commune rurale de Po. Cette technologie était destinée à alimenter le District sanitaire de ladite commune à base de la conversion des tiges de cotonniers, de maïs, de sorgho et de coques d'arachide. L'énergie produite devrait être vendue à la commune de Po. En 2012, une unité gazéification de noix d'anacarde a été installée chez le groupement de producteurs d'anacardes WOUOL de Dakoro par la société burkinabè ISOMET, avec l'appui de l'ONG SNV. L'unité de 40 kW permet la production de la vapeur nécessaire au traitement de l'anacarde, valorisant ainsi le résidu de production à la place du bois précédemment utilisé. En 2013, deux types de gazéification de balles de riz, l'un pour la production de chaleur, fabriqué localement à partir d'un prototype et l'autre pour celle de l'électricité importé d'Inde, ont été installés à Dano au bénéfice de l'ONG DREYER. Ces mêmes types de gazogènes ont été fournis à l'Union des groupements des étuveuses de riz de Bama par l'ONG SNV en 2015 avec le financement de la coopération taïwanaise.

Un gazogène de petite taille destiné uniquement à la production de chaleur par combustion du syngas a été installé en 2012 sur la plateforme de recherche du Laboratoire de l'Énergie Renouvelable et Efficacité Énergétique (LabEREE) de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (Institut 2iE). L'Institut de Recherche en Sciences Appliquées et Technologies (IRSAT) a également développé des projets de gazéification pour l'étuvage du riz dans la région de Bagré, en collaboration avec l'ONG OXFAM.

Toutes les études de cas de gazéification testées en milieu réel ont échoué. En vue de connaître l'environnement sociotechnique de la gazéification, la recherche s'est focalisée sur trois cas d'étude (Po, Dano et Bama) suivant le cadre d'analyse de la sociologie de la traduction développé dans le premier chapitre.

3.1.1. Cas d'intervention à Po

a) La problématisation ou identification du problème : à Po, le projet est initié pour fournir de l'électricité à la commune n'ayant aucun accès à l'électricité, une commune a priori idéale selon les porteurs du projet. Elle semblait bien propice pour accueillir une technologie de production d'électricité à base des résidus agricoles. De plus, les facteurs biophysiques de la zone font d'elle une zone de forte production agricole et donc des résidus agricoles notamment les tiges de sorgho, de cotonnier, des balles de riz et des coques d'arachides. Toutefois, juste après le démarrage du projet, la commune a été électrifiée. Les porteurs de projets décident néanmoins de continuer le projet en modifiant son objectif. Dorénavant, la production sera vendue à 73 FCFA le kWh au réseau national pour sa redistribution. Cependant, la SONABEL était prête à racheter à un prix plus bas (55 FCFA) tout comme celui convenu avec le Ghana, un pays voisin. Les négociations n'ont pas permis de trouver un compromis. Le manque d'accord sur le prix d'achat de l'électricité y a été la principale source d'échec de la gazéification.

b) L'intéressement ou identification des acteurs et leurs rôles : pour le cas de l'implantation de la gazéification à Po, les acteurs impliqués depuis la planification préliminaire du projet sont : les initiateurs du projet à savoir Atmosfair gGmbH, Berlin et Atmosfair Burkina Faso, Ouagadougou ; Novis chargé de la réalisation technique ; et les communes de Pô et de Garango. La partie technique a regroupé essentiellement des techniciens, formés et bien encadrés pour le fonctionnement et la maintenance du gazogène, une association de femmes vulnérables chargée de la pesée et du stockage de la biomasse, des producteurs agricoles individuels (sorgho, mil, coton et d'arachide) et des ménages pour la fourniture des coques d'arachide.

Les non actants sont un gazogène d'une capacité 22 kW couplé à un moteur pour la transformation du gaz en électricité et les résidus des différentes cultures. Ces résidus sont adaptés pour le gazogène installé sous condition d'un prétraitement. Les coques d'arachides constituent le combustible le plus efficace avec de meilleures propriétés de stockage et ne nécessitant pas d'un prétraitement préalable par rapport aux autres résidus. La figure 14 donne un aperçu du gazogène installé à Po et de trois filtres d'épuration du syngas.

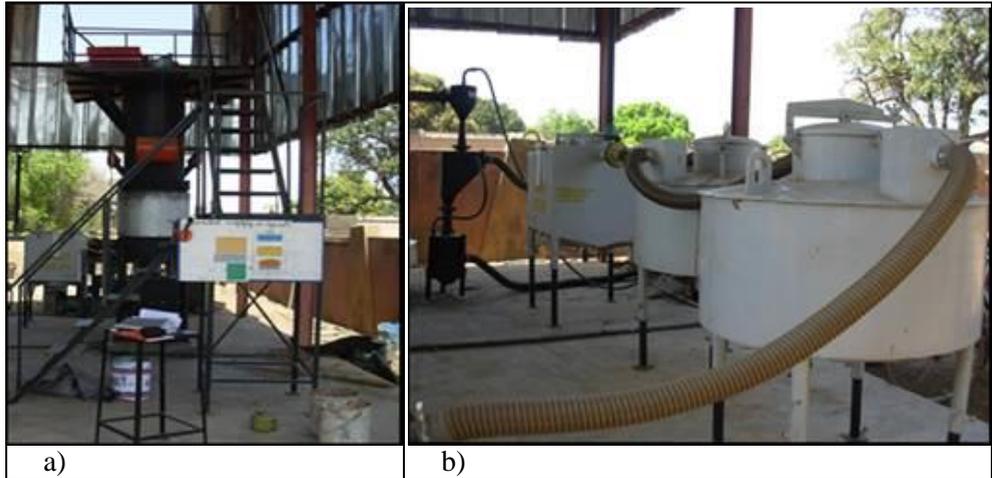


Figure 14 : Dispositif du gazogène installé à Po : a) réacteur et b) filtres pour le nettoyage du syngas produit

Source : Clichés de Sama réalisés à Po en 2008

3.1.2. Cas d'intervention à Dano

a) La problématisation ou identification du problème : à Dano, la gazéification a été installée à la Fondation Dreyer. C'est une ONG qui développe différents programmes tels que l'agriculture et l'énergie, des programmes de formations générales au profit des agriculteurs et de la population et des innovations en recherche et formations intégrées. Dans ce sens, la Fondation a entrepris entre autres une initiative visant à accroître sa production en riz à travers le soutien des agriculteurs dans l'acquisition des engrais à bon prix, des semences et des machines agricoles ; la mise en exploitation de terres en jachère ; l'installation des systèmes hydrauliques.

La transformation de ce riz nécessite de la chaleur qui est produite par un gigantesque champ solaire. Cependant, la puissance de ce champ est réduite à cause des difficultés liées à la défaillance des facettes des miroirs (Figure 15). Les gazogènes sont alors installés et fonctionnent en alternance avec le système solaire. Ils utilisent les balles de riz issues de la production du centre pour produire de l'énergie et la cendre est utilisée sous forme d'engrais dans les champs.

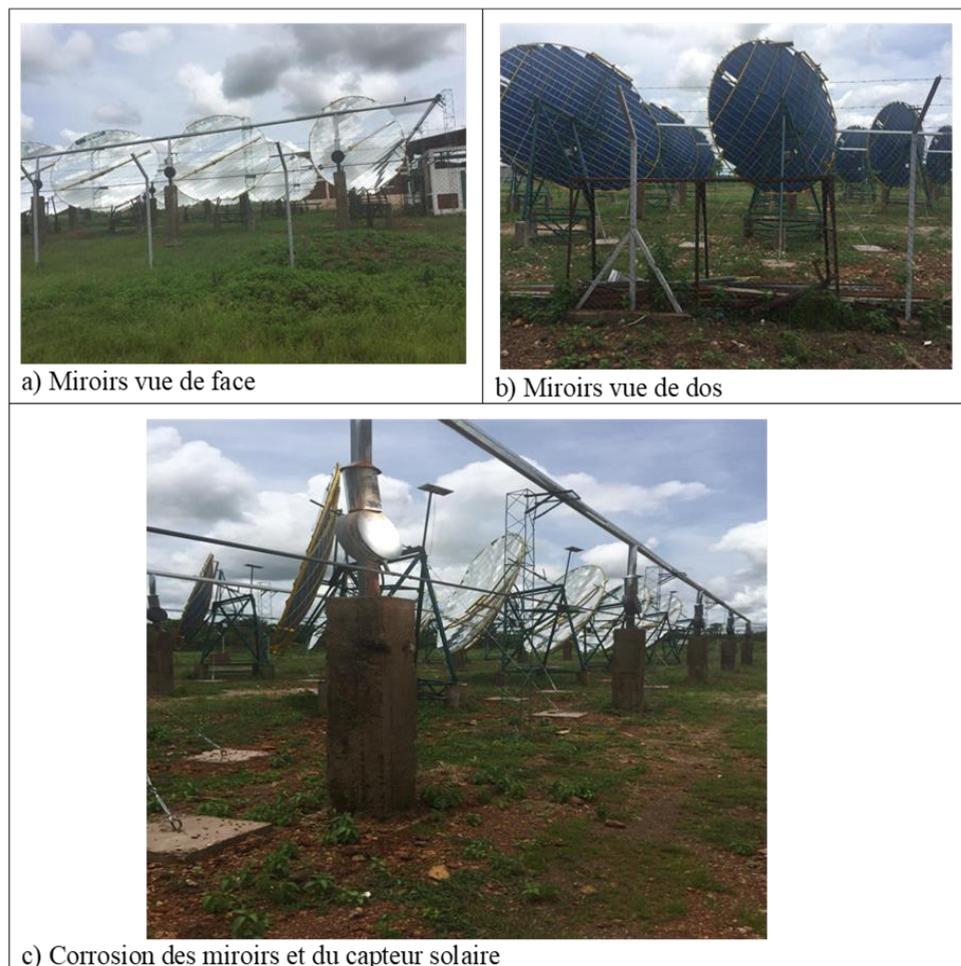


Figure 15 : Champ solaire installé à Dano : a) Miroirs, vue de face ; b) Miroirs, vue de dos ; c) Corrosion des miroirs et du capteur solaire
Source : Clichés de Barry, 2018 réalisés à Dano

b) L'intéressement ou identification des acteurs et leurs rôles : l'organisation de Dano est assez autonome. Elle dispose déjà de son propre personnel par secteur d'activités dont le service d'agronomie, le service d'énergie et le service de vulgarisation. Le personnel attribué au secteur de l'énergie est formé d'un ingénieur et des techniciens chargés de la production de l'énergie et le suivi du dispositif ; et des femmes chargées du trempage du riz à étuver, du séchage et du décorticage du riz étuvé et du conditionnement des balles de riz. Les autres actants intervenant dans le processus de développement de la gazéification sont l'Ambassade de Taiwan, les partenaires financiers ; les sociétés ISOMET et SIMPLY SOLAR, les partenaires techniques, la mairie et les producteurs de riz paddy.

Les non-actants sont deux gazogènes d'une capacité totale de 34 kW combinés à des chaudières servant à transformer 10 % de la quantité totale de riz étuvé, soit 300

kilogrammes par jour ; des marmites à double fond appropriées pour la forte chaleur, le magasin de stockage des balles. L'installation du gazéificateur comporte des risques liés à la sécurité au travail et à la santé du personnel. Néanmoins, le fait que l'installation peut être exploitée avec les ressources existantes peut être considéré comme un succès. Un autre type de gazogène a également été importé pour produire l'électricité. Cependant, ce dispositif n'a pas pu démarrer par un manque d'interaction entre les acteurs, de la non-maîtrise de l'utilisation de l'équipement.

3.1.3. Cas d'intervention à Bama

a) **La problématisation ou identification du problème** : les porteurs de projet ont consulté la littérature et réalisé de diagnostic avant de développer leur argumentaire afin de faciliter la mise en œuvre de leurs activités. À Bama, l'étude de base sur les besoins en énergie, d'une part pour l'étuvage et le décorticage du riz paddy et d'autre part, pour le décorticage du riz et l'éclairage, a révélé qu'il y existait une technique d'étuvage de riz sur des foyers à balles de riz (Figure 16).



Figure 16 : Technique d'étuvage du riz paddy : a) par combustion indirecte sur un foyer à balles de riz et b) environnement d'étuvage du riz pollué de fumées

Source : Clichés de Barry, 2018 réalisés à Bama

Cependant cette technique présente comme inconvénients, une consommation de quantités importantes de balles de riz, une demande de temps de travaux long d'environ 12 heures et une forte exposition des étuveuses à la chaleur et à la fumée pouvant impacter leur santé. De plus, pour l'éclairage et le fonctionnement des appareils électriques tels la machine à coudre, l'épierreuse, l'ordinateur, etc., l'électricité provenait de la coopérative d'électricité de Bama (COOPEL Bama). Un moteur diesel incorporé à une décortiqueuse, permettait de mener les activités de décorticage. Ces systèmes énergétiques, avaient d'énormes difficultés telles que les

coups intempestifs de l'électricité de la COOPEL entraînant des arrêts fréquents de travail et les pénuries d'hydrocarbure nécessitant de longs déplacements pour l'approvisionnement du centre et, par conséquent un coût du décorticage assez élevé. Le système de gazéification de balles de riz pour la production d'électricité introduit par le projet GazoRiz inscrit l'UGER-B dans une dynamique d'indépendance énergétique basée sur l'utilisation des déchets pour la production d'électricité par opposition aux énergies fossiles. Néanmoins, le système nécessite pour son démarrage un groupe électrogène de 15 kVA pour un fonctionnement d'une trentaine de minutes, sous une consommation électrique nette de 10 kWe et de 60 kilogrammes de balles.

b) L'intéressement ou identification des acteurs et leurs rôles : l'organisation regroupe plusieurs femmes donc plusieurs catégories de groupes sociaux, d'opinion et de savoir-faire. Avant le projet, les femmes faisaient l'étuvage du riz sur les foyers à balles de riz en substitution de l'utilisation du bois comme source d'énergie. Avec le projet, le diagnostic montrait que les foyers utilisés engendrent une pollution liée à la perte de chaleur, de la fumée qui pouvait affecter la santé des femmes. Les femmes étaient chargées de tremper le riz destiné à l'étuvage. Un seul meunier était désigné pour suivre les manipulations du technicien recruté et formé par la SNV pour faire fonctionner le gazogène. Ce meunier devrait à la fin du projet prendre le relais pour la durabilité de la technologie.

Les non-actants sont les deux gazogènes couplés à deux chaudières pour la production de la vapeur pour l'étuvage ; un gazogène muni d'un dispositif de filtration du gaz et un moteur à gaz alimentant un alternateur de puissance 40 kVA (25 kWe) pour produire l'électricité, nécessaire pour le fonctionnement de la décortiqueuse, de la trieuse et de la machine à coudre des sacs ; les balles de riz, source d'énergie dont la diminution permettrait la réduction des coûts de production ; les huit marmites d'une capacité de 75 kilogrammes de riz trempé. Dans la prévision, ces marmites devaient recevoir simultanément la chaleur. En pratique, seules quatre d'entre elles, étaient servies en un cycle de production. Ce dispositif ne correspondant pas aux prévisions, a conduit au désengagement des bénéficiaires. La Figure 17 présente les types de dispositif installés dans la commune de Bama.

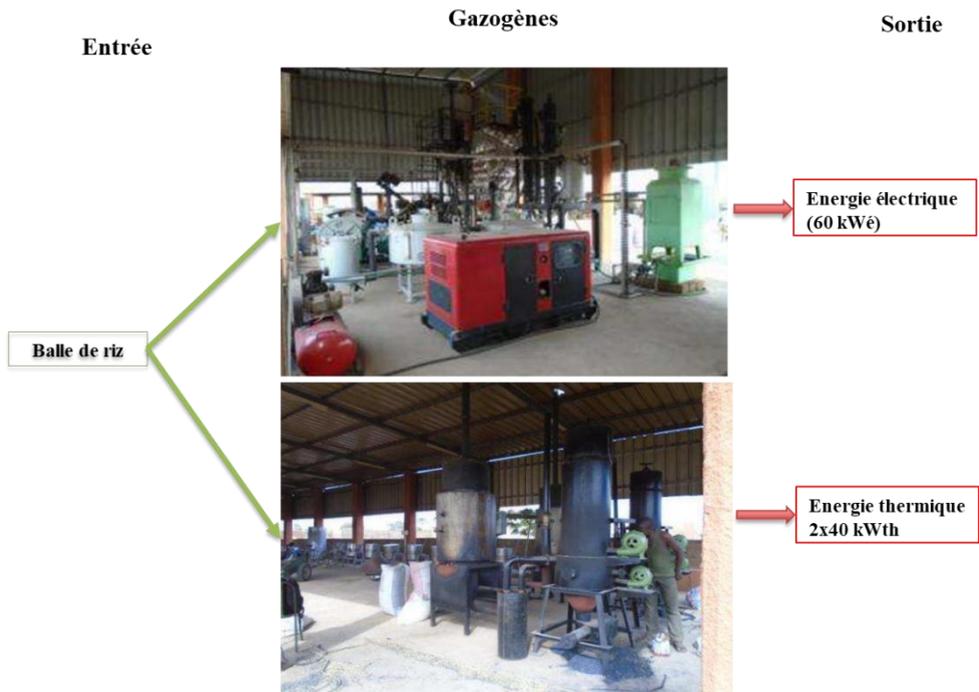


Figure 17 : Dispositif des gazogènes installés à Bama
Source : Clichés de SNV, 2017

En somme pour les trois cas d'intervention du projet d'implantation de la gazéification, il y a eu des insuffisances depuis les deux premières étapes (la problématisation et l'intéressement) telles la non-implication de certains acteurs en charge de l'énergie, les bénéficiaires locaux des projets. De plus, il s'est agi d'une approche top down où il n'y avait pas de contraintes réelles et la nécessité de recourir aux technologies de gazéification. Par conséquent, des inquiétudes et des hésitations se sont installées, d'où la dissidence ou le blocage du processus d'adoption de la technologie. Comme le souligne Callon, lorsqu'il y a un problème au cours de la réalisation des moments, il faut redéfinir la problématisation qui est le point de passage obligé. La Figure 18 synthétise la grille d'analyse du processus ayant conduit à l'échec de la gazéification au Burkina Faso.

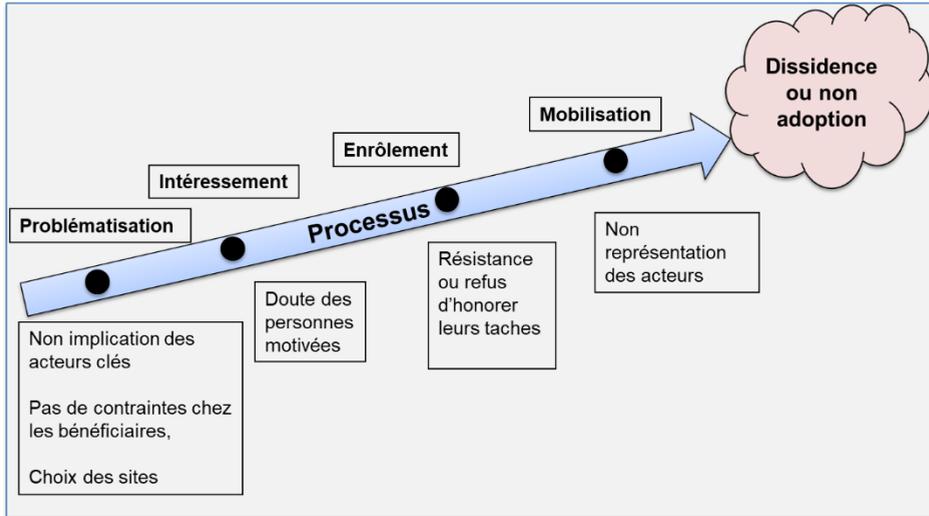


Figure 18 : Processus décisionnel de non développement de la gazéification au Burkina Faso

3.2. *Processus d'installation de la pyrolyse au Burkina Faso*

Au Burkina Faso, la pyrolyse est fabriquée localement par des équipementiers bien formés et assistés par l'ONG Fountéini en collaboration avec RONGEAD qui ont fusionné pour devenir Nitidae. Cette ONG assure la formation des bénéficiaires sur l'utilisation de la technologie, la promotion des filières énergies et le développement durable. Elle fonctionne grâce aux projets de fabrication et de promotion des équipements de transformation du Karité.

La première pyrolyse a été initiée au profit de l'ONG GUEBANA sur la base de la confiance et d'une relation d'amitié. La coopérative GUEBANA soutient les acteurs de la filière mangue biologique dans les zones ouest et sud-ouest du Burkina Faso. Cette coopérative emploie près de 460 personnes et travaille avec environ 2 500 producteurs, 20 collecteurs, 7 coopératives et 20 unités de transformation de mangue. Elle crée des réseaux de commercialisation entre les producteurs d'Afrique et leurs clients en Europe. Les coques d'anacarde y sont utilisées en substitution du bois pour produire la chaleur pour le séchage et la cuisson des noix de cajou, le séchage des mangues d'une quantité de 2 000 tonnes. Les pyrolyses installées à GUEBANA fonctionnent depuis 3 ans sans problème. Toutefois, ils n'ont pas permis de gérer complètement les déchets. Seulement 25 % des déchets ont été dégagés, car le charbon produit constitue aussi une autre forme de déchet. Pour ce faire, ce charbon est octroyé gratuitement aux femmes employées de l'entreprise pour leur usage domestique. Sa valorisation comme fertilisant des terres est également en cours de recherche.

La réussite de cette première expérience a permis à d'autres acteurs comme l'huilerie Tonde et une association des femmes transformatrices de noix de cajou (YANTA) de se doter de la pyrolyse. La technologie de pyrolyse installée à l'association YANTA, est non fonctionnel par manque d'entretien pourtant elle nécessite un entretien régulier avant chaque utilisation. Quant à celle de l'huilerie Tonde, elle est fonctionnelle depuis son installation en 2015. Cette pyrolyse produit de la chaleur à partir des coques d'anacarde pour le raffinage de l'huile. La matière première est obtenue gratuitement auprès de ANATRANS, une entreprise de transformation des noix d'anacarde à l'aide des chaudières, située à moins de 2 kilomètres de l'huilerie. Un camion de l'entreprise est utilisé pour le ramassage des coques. Le charbon issu de la pyrolyse est transformé en briquettes ou utilisé directement par les femmes employées dans l'entreprise. L'huilerie connaît souvent des périodes mortes durant la rupture des graines de coton. Actuellement, elle est confrontée à une mévente de ces produits (90 %) à cause de la situation sécuritaire au Mali, son client clé. La Figure 19 présente des images illustratives de quelques technologies de pyrolyse installées au Burkina Faso.



a) Chaudière d'ANATRANS, combustion directe des coques d'anacarde pour la production de chaleur



b) Pyrolyse de l'association YANTA non fonctionnelle



c) Pyrolyse de l'huilerie Tonde



d) Haut du pyrolyse de l'huilerie Tonde dégageant de la fumée

Figure 19 : Illustration de quelques technologies de pyrolyse du Burkina Faso

3.3. Analyse comparative des facteurs d'adoption des technologies

L'analyse comparative basée sur l'analyse du contenu des interviews a permis de révéler plusieurs facteurs pouvant freiner ou motiver l'adoption des technologies. Il s'agit d'une approche qualitative utilisant des discours diversifiés et fondée sur la déduction et l'inférence (Bardin, 1977). L'analyse de contenu s'effectue suivant trois phases à savoir la préanalyse, le traitement des résultats et l'interprétation. L'unité d'analyse représente l'entité principale étudiée tels les individus, les groupes d'individus, les firmes, les unités géographiques (ville, pays, etc.), les produits. Ainsi, dans le cadre de cette recherche, l'approche a permis d'organiser les informations recueillies avec comme unité d'analyse la gazéification. De plus, un benchmarking a été conduit sur la pyrolyse, une technologie avec des caractéristiques proches de la gazéification (tailles, usages...) qui a connu un succès dans la zone de l'étude. Les facteurs d'échec de la gazéification représentent évidemment, pour la plupart des cas, l'inverse des facteurs de succès de la pyrolyse (Tableau 7).

Tableau 7 : Facteurs déterminants l'adoption des technologies

N°	Facteurs	Technologie de production d'énergie thermique		Technologie de production d'énergie électrique
		Pyrolyse	Gazéification	Gazéification
F ₁	Coût initial de la technologie	+		
F ₂	Coût élevé des pièces de rechange	+	-	-
F ₃	Temps de retour sur investissement	+	-	-
F ₄	Avantage relatif de la technologie	+	+/-	+/-
F ₅	Compatibilité de la technologie	+	-	
F ₆	Complexité de la technologie	+	-	-
F ₇	Observabilité de la technologie	+		
F ₈	Temps mis pour le démarrage de la technologie		-	-
F ₉	Informations sur la technologie (fonctionnement, entretien,...)	+	-	-
F ₁₀	Formation des utilisateurs	+	-	-
F ₁₁	Disponibilité des pièces de rechange	+		-
F ₁₂	Implication des acteurs	+	-	+/-
F ₁₃	Confiance entre les acteurs à l'implantation de la technologie	+	+	+
F ₁₄	Confiance entre les acteurs à l'implantation de la technologie Rupture de confiance		-	-
F ₁₅	Fiabilité prouvée de la technologie	+	-	-
F ₁₆	Matériel de conception des technologies non adopté à des hautes températures		-	
F ₁₇	Problème de dimensionnement de l'équipement par rapport aux besoins des utilisateurs	+/-	-	
F ₁₈	Disponibilité de la biomasse	+		
F ₁₉	Manque de promotion et d'intérêt par le Gouvernement	-	-	-
F ₂₀	Manque de subvention pour la biomasse-énergie	-	-	-
F ₂₁	Appartenance politique des acteurs des projets			-

Légende : (+) = facteur de succès ; (-) = facteur d'échec ; (+/-) = facteur de succès et d'échec à la fois

L'analyse du Tableau 7 montre que quatre caractéristiques de la technologie de Rogers à savoir l'avantage relatif, la compatibilité, la complexité et l'observabilité sont ressorties comme des facteurs déterminant le succès de la pyrolyse. En effet, le coût initial de la pyrolyse étant relativement faible, il ne constitue pas un frein à son adoption (F₁).

De plus, l'adoption de la pyrolyse a été favorisée par la confiance entre les porteurs de projets et les bénéficiaires (F₁₅). Un retour sur l'investissement de courte durée trois (3) mois (F₃) a permis de rassurer les investisseurs. La disponibilité des informations sur le fonctionnement et la gestion de la pyrolyse (F₉), la formation et l'encadrement des utilisateurs (F₁₀), la disponibilité et l'accessibilité des pièces de rechange (F₁₁), l'implication des acteurs depuis la conception du projet (F₁₂), la confiance entre les acteurs (F₁₃), la fiabilité prouvée de la technologie (F₁₅) et l'accessibilité gratuite de la biomasse (F₁₈) sont autant de facteurs de réussite de la pyrolyse.

À l'inverse, l'incompatibilité de la nouvelle technologie avec les attentes des utilisateurs semble avoir eu un effet négatif sur l'adoption de la gazéification, notamment les gazogènes servant à la production d'énergie thermique. En effet, l'utilisation de matériaux de conception non adoptés à de hautes températures et le problème de dimensionnement de l'équipement par rapport aux besoins des utilisateurs ont causé des défaillances opérationnelles des gazogènes. Quant aux gazogènes destinés à la production d'électricité, ils ont engendré des avantages tels que la réduction du coût de la facture d'électricité, l'augmentation de la quantité de riz décortiquée, l'éclairage et l'emballage de la production. Cependant, des difficultés liées à leur complexité d'utilisation ont entraîné une mauvaise appréciation de la gazéification comme l'illustrent quelques témoignages des interviewés.

« Je préfère la SONABEL à la gazéification parce que premièrement, la gazéification demande plus de temps pour le démarrage du décortiquage que la SONABEL (8 h à 18 h). Deuxièmement, le gazogène doit fonctionner en même temps qu'on produit l'électricité et enfin, les pièces de rechange telles les batteries sont non adaptées et très coûteuses », O.D., meunier à Bama, 27/02/2019.

L'interviewé montre clairement qu'il préfère connecter directement la décortiqueuse de riz au réseau national d'électricité de la SONABEL au lieu d'utiliser la gazéification. Il ajoute en soulignant qu'il faut au moins trois (03) personnes pour le fonctionnement de la technologie. Les acteurs de Bama dénoncent également une absence de transparence dans la gestion budgétaire en témoignent les propos d'une interviewée :

« Nous avons demandé le cahier de charges sans succès », S.J., membre du bureau de l'Union des étuveuses de riz de Bama, 26/02/2019.

Cette rupture de confiance s'est plus accentuée par l'échange de l'équipement prévu. Pour les membres de l'Union, l'appareil présenté au lancement n'est pas celui implanté dans le centre. Les bénéficiaires du projet estiment être dupés.

Dans l'ensemble, le manque de promotion des technologies de valorisation de la biomasse par le Gouvernement a réduit leurs chances de succès commercial. La pyrolyse couvre plusieurs localités du pays et les pays de la sous-région comme la Côte d'Ivoire et le Mali. Selon les interviewers, la pyrolyse présente plusieurs avantages. L'avantage environnemental est perçu à travers la réduction de plus d'un tiers des déchets coques de cajou occupant de vastes espaces. Du point de vue économique, la pyrolyse coûte relativement moins cher par rapport à la gazéification, soit environ 3 millions de FCFA pour un temps de retour sur l'investissement d'au plus 5 mois. De plus, la pyrolyse de ces coques produit moins de fumées qu'avec le bois.

La section suivante met en évidence les barrières au développement de la gazéification dans le contexte du Burkina Faso. Elle constitue la version française de la publication : « Key Barriers to the Adoption of Biomass Gasification in Burkina Faso. Sustainability 2021, 13, 7324. <https://doi.org/10.3390/> de Barry, F.; Sawadogo, M.; Bologo (Traoré), M.; Ouédraogo, I.W.K.; Dogot, T. ».

3.4. Arbre hiérarchique des barrières d'adoption de la gazéification

La structure hiérarchique des barrières a été constituée à travers leur classification en dimensions, catégories et sous catégories. Vingt-sept barrières susceptibles de bloquer l'adoption de la gazéification ont été identifiées dans le contexte burkinabè. Ces barrières ont été classées en cinq catégories à savoir les barrières techniques, économiques et financières, socioculturelles et organisationnelles, politiques gouvernementales et institutionnelles, et écologiques et géographiques (Figure 20).

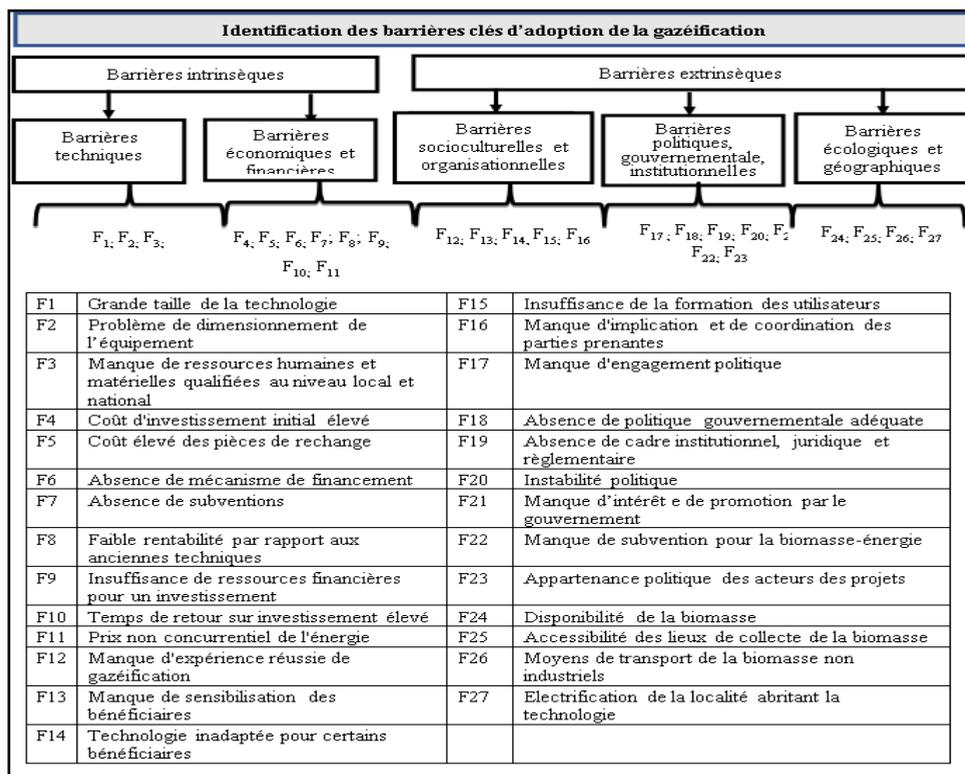


Figure 20 : Structure hiérarchique des barrières à l'adoption de la gazéification au Burkina Faso

3.4.1. Barrières techniques

Au Burkina Faso, des barrières d'ordre technique ont contribué à la non-adoption de la gazéification. Selon les parties prenantes, la plupart des technologies sont devenues défectueuses un an après leur installation, ou après trois mois d'utilisation. Cette situation est en partie liée à la grande taille des équipements de gazéification (F1), au problème de dimensionnement des équipements par rapport aux besoins réels des utilisateurs (F2) et au manque de ressources humaines et matérielles au niveau local et national (F3). En effet, le manque de compétence de dimensionnement et des erreurs techniques sur le matériel importé ont eu un impact négatif sur le développement de la gazéification dans le pays. La grande taille du gazéificateur en fait une technologie complexe et difficile à mettre en place. Le problème du dimensionnement de l'équipement en fonction des besoins des utilisateurs influence la quantité d'énergie produite et la capacité de production attendue. L'incompatibilité de la nouvelle technologie avec les attentes des utilisateurs et la difficulté d'obtenir des pièces de rechange (batteries et bougies) ont entraîné son non adoption.

3.4.2. Barrières économiques et financières

Un investissement initial important est généralement nécessaire pour le développement des technologies. Il est couramment un défi à cause des facteurs tels que le manque de financement et les politiques gouvernementales (Sansaniwal et al. 2017). Les barrières économiques et financières ont également contribué à l'échec de la gazéification. Cette technologie, qui est importée des pays industrialisés, est plus chère que les technologies locales. Ainsi, le coût initial (F4) des technologies installées au Burkina Faso est très élevé. Cependant, il ne semble pas être une barrière déterminante dans son adoption, étant donné les subventions fournies par les bailleurs de fonds. En outre, le coût élevé des pièces de rechange (F5), l'absence de mécanisme de financement (F6), l'absence de subventions (F7), sa moindre rentabilité par rapport aux anciennes techniques (F8), l'insuffisance des ressources financières pour l'investissement (F9), le temps nécessaire (minimum 4 heures) pour faire fonctionner les générateurs à gaz (F10) et le prix compétitif des autres sources d'énergie (F11) ont contribué à décourager les acteurs.

3.4.3. Barrières socioculturelles et organisationnelles

Les barrières socioculturelles et organisationnelles comprennent le manque d'expérience réussie en matière de gazéification (F12), le manque de sensibilisation des bénéficiaires (F13), le fait que la technologie ne soit pas adaptée à certains bénéficiaires (F14), la formation insuffisante des utilisateurs (F15), et le manque d'implication et de coordination entre les différentes parties prenantes (F16). Le manque d'informations sur le fonctionnement et la gestion de la technologie a rendu difficile l'installation, le démarrage, la maintenance et l'entretien des générateurs à gaz. Par conséquent, certaines pièces (moteurs, batteries, etc.) sont tombées en panne. En outre, leur indisponibilité et leur inaccessibilité sur le marché local ont constitué une véritable barrière à l'adoption de la gazéification. Le manque d'implication et de coordination entre les différentes parties prenantes (F16) a empêché la transparence dans la communication entre les acteurs et a conduit à une rupture de confiance. La non-implication des acteurs clés après le lancement du projet d'installation de la technologie a affaibli les liens entre les acteurs. La suspicion et le manque de confiance se sont installés entre les acteurs. Cela a conduit à une réticence ou une résistance à l'idée d'adopter la technologie. Cet état d'esprit a conduit à un boycott de l'organisation et de la programmation des travaux et finalement à l'échec de la technologie. Le manque de fiabilité avérée de la gazéification (F12), le manque de sensibilisation des utilisateurs (F13), les avantages et le manque de sensibilité au genre (F14), ont également été de véritables barrières à l'adoption de la technologie.

3.4.4. Barrières politiques, gouvernementales et institutionnelles

Le programme d'énergie renouvelable du Burkina Faso est caractérisé par un manque notable d'engagement politique, de promotion et d'intérêt pour ces technologies prometteuses. Ceci empêche l'adoption de la gazéification. De plus, aucun mécanisme de subvention n'est disponible pour l'énergie issue de la biomasse et encore moins pour les technologies de gazéification. Pourtant, un meilleur accès

aux incitations financières sous différentes formes (subvention, prêts à faible taux d'intérêt, crédit à long terme, etc.) pourrait améliorer la viabilité financière des technologies et l'accessibilité financière des services (Caupin & Gravellini, 2014). Récemment, l'intérêt pour les énergies renouvelables a été marqué par la facilitation d'accès des fonctionnaires au crédit pour l'achat des panneaux photovoltaïques. L'absence de certification des fabricants des équipements ne garantit pas la conformité de l'opération à la législation locale. L'instabilité politique liée à l'insurrection, la transition et les différents coups d'Etat ont eu tendance à bloquer la continuité et l'application des textes réglementaires et légaux. Au-delà des questions gouvernementales, l'appartenance politique des acteurs des projets peut empêcher les négociations visant à assurer la durabilité d'une technologie donnée. Tout projet de développement est un centre d'intérêt pour des catégories d'acteurs spécifiques. Le projet apparaît comme un système de ressources et d'opportunités que chacun tente de s'approprier à sa manière.

3.4.5. Barrières écologiques et géographiques

Les barrières écologiques et géographiques sont des aspects cruciaux pour le fonctionnement des technologies d'énergie renouvelable. La disponibilité de la biomasse (F24) est déterminée par les quantités allouées à des utilisations concurrentielles telles que le maintien de la fertilité des sols, l'utilisation domestique et l'alimentation du bétail. La disponibilité de la biomasse est cruciale pour l'adoption de la gazéification. Lorsqu'elle est insuffisante, elle perturbe l'exploitation de la technologie pendant un moment prolongé et par conséquent réduit les bénéfices. Par exemple, le manque de matière première a contribué à l'abandon d'un projet de gazéification de biomasse en Inde (Luthra et al. 2015). L'accessibilité des sites de collecte de la biomasse (F25) et des moyens non industriels de transport de la biomasse (F26) sont des barrières géographiques dont le manque de routes goudronnées, la distance des points de collecte et les moyens de transport non industriels (mobylettes, charrettes et tricycles). L'accès à l'électricité (F27) de la localité abritant la technologie peut également constituer un obstacle à l'adoption de la gazéification.

3.5. Hiérarchisation des sous-catégories de barrières

La hiérarchisation des sous catégories de barrières au sein de chaque catégorie a été possible en appliquant la méthode AHP décrite plus haut. Les différents éléments constitutifs de chaque catégorie de barrières ont été classés en fonction de leur poids relatif. La pondération des différents éléments constitutifs de la catégorie des barrières techniques pouvant entraver l'adoption de la technologie de gazéification a permis de les classer (Tableau 8).

Tableau 8 : Pondération des sous catégories des barrières techniques

Sous catégories de barrières	F1	F2	F3	Poids (%)	Rang
F1	1,000	3,000	0,333	28,65	2 ^e
F2	0,200	1,000	0,333	13,99	3 ^e
F3	3,000	3,000	1,000	57,36	1 ^{er}
λ_{max}				3,14	
IC				0,06	
RI				0,58	
RC				0,12	

L'analyse des résultats laisse percevoir qu'au sein de la catégorie des barrières techniques, le manque de ressources humaines qualifiées et matérielles appropriées au niveau local et national (57,36 %) est le plus déterminant pour l'adoption de la gazéification suivi du problème de dimensionnement de l'équipement par rapport aux besoins réels des utilisateurs avec une pondération de 28,65 % au ratio de consistance (RC) d'au moins 10 %.

Le Tableau 9 présente les résultats de la pondération de la sous-catégorie des barrières économiques et financières obtenus avec les 8 éléments constitutifs.

Tableau 9 : Pondération des sous catégories des barrières économiques et financières

Sous catégories de barrières	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	Poids (%)	Rang
F4	1,000	1,000	0,333	1,000	0,333	1,000	3,000	3,000	10,78	5 ^e
F5	1,000	1,000	1,000	1,000	0,333	1,000	3,000	0,333	11,88	4 ^e
F6	3,000	1,000	1,000	3,000	1,000	1,000	0,333	1,000	14,52	3 ^e
F7	1,000	1,000	0,333	1,000	0,333	3,000	0,333	3,000	8,74	7 ^e
F8	3,000	3,000	1,000	3,000	1,000	3,000	1,000	1,000	20,10	1 ^{er}
F9	1,000	1,000	1,000	0,333	0,333	1,000	0,333	1,000	7,04	8 ^e
F10	0,333	0,333	3,000	3,000	1,000	3,000	1,000	3,000	16,46	2 ^e
F11	0,333	3,000	1,000	0,333	1,000	1,000	0,333	1,000	10,46	6 ^e
λ_{max}									8,94	
IC									0,14	
RI									1,41	
RC									0,09	

L'analyse des résultats montre que dans la catégorie des barrières économiques et financières, la rentabilité de la technologie par rapport aux anciennes pratiques (20,10 %), le temps de retour sur l'investissement élevé (16,46 %) et l'absence de mécanisme de financement (14,52 %) sont les éléments des barrières techniques les plus déterminants pour l'adoption de la gazéification au RC de 0,09.

La hiérarchisation de la sous-catégorie des barrières socioculturelles et organisationnelles a été réalisée avec les 6 éléments constitutifs de la catégorie suivant leur ordre d'importance (Tableau 10).

Tableau 10 : Pondération des sous catégories de barrières socioculturelles et organisationnelles

Sous catégories de barrières	F12	F13	F14	F15	F16	Poids (%)	Rang
F12	1,000	2,000	2,000	0,333	1,000	20,43	3 ^e
F13	0,500	1,000	1,000	1,000	1,000	17,07	4 ^e
F14	0,500	1,000	1,000	0,333	0,333	10,35	5 ^e
F15	3,000	1,000	3,000	1,000	1,000	29,40	1 ^{er}
F16	1,000	1,000	3,000	1,000	1,000	22,74	2 ^e
λ_{max}						5,34	
IC						0,09	
RI						0,90	
CR						0,09	

L'analyse du Tableau 10 laisse percevoir qu'au CR de 0,09, l'insuffisance de formation des utilisateurs de la technologie occupe la première place (29,4%) suivie de la non implication des acteurs clés (22,74%), et de manque de coordination entre les parties prenantes (20,43%) et le manque d'expérience réussie (17,07%). En effet, l'insuffisance de transparence dans la gestion des projets a entraîné une rupture de confiance et un découragement des acteurs.

Parmi les sous catégories de barrières politiques gouvernementaux et institutionnels, le manque de subvention, de promotion et d'intérêt, l'instabilité politique, des éléments qui contribuent à la promotion des technologies sont considérés comme les principaux obstacles à l'adoption de la technologie au CR de 0,07 (Tableau 11).

Tableau 11 : Pondération des sous catégories de barrières politiques, gouvernementales et institutionnelles

Sous catégories de barrières	F17	F18	F19	F20	F21	F22	F23	Poids (%)	Rang
F17	1,000	3,000	3,000	0,333	1,000	0,333	1,000	12,89	4 ^e
F18	0,333	1,000	1,000	0,333	0,333	0,333	1,000	6,60	7 ^e
F19	0,333	3,000	1,000	0,333	1,000	0,333	1,000	9,71	5 ^e
F20	3,000	3,000	3,000	1,000	2,000	1,000	1,000	22,30	2 ^e
F21	1,000	3,000	1,000	0,500	1,000	1,000	3,000	16,02	3 ^e
F22	3,000	3,000	3,000	1,000	1,000	1,000	3,000	22,76	1 ^{er}
F23	1,000	1,000	1,000	1,000	0,333	0,333	1,000	9,70	6 ^e
λ_{max}								7,52	
IC								0,09	
RI								1,32	
CR								0,07	

La pondération des sous-catégories écologiques et géographiques révèle qu'au CR équivalent à 0,09, la disponibilité de la biomasse (38,75 %) et l'accès à l'électricité (30,41 %) sont les deux principaux obstacles à l'adoption de la gazéification (Tableau 12).

Tableau 12 : Pondération des sous catégories de barrières écologiques et géographiques

Sous catégories de barrières	F24	F25	F26	F27	Poids (%)	Rang
F24	1,000	3,000	3,000	1,000	38,75	1 ^{er}
F25	0,333	1,000	1,000	0,333	12,91	4 ^e
F26	0,333	1,000	1,000	1,000	17,91	3 ^e
F27	1,000	3,000	1,000	1,000	30,41	2 ^e
λmax					4,26	
IC					0,08	
RI					0,90	
CR					0,09	

L'appréciation par les parties prenantes des cinq catégories à savoir les barrières techniques (T), les barrières économiques et financières (EF), les barrières socioculturelles et organisationnelles (SCO), de celle des barrières politiques gouvernementales et institutionnelles (PGI), et écologiques et géographiques (EG) a fourni une classification au RC de 0,03 (Tableau 13).

Tableau 13 : Classification des différentes catégories d'obstacles à l'adoption de la gazéification

Sous catégories de barrières	T	EF	SCO	PGI	EG	Poids (%)	Rang
T	1,000	5,000	1,000	3,000	0,200	22,76	3 ^e
EF	0,200	1,000	0,333	1,000	0,333	7,30	4 ^e
SCO	1,000	3,000	1,000	5,000	3,000	34,27	1 ^{er}
PGI	0,333	1,000	0,200	1,000	0,333	6,73	5 ^e
EG	5,000	3,000	0,333	3,000	1,000	28,94	2 ^e
λmax						5,13	
IC						0,03	
RI						1,12	
RC						0,03	

L'analyse du Tableau 13 montre que la catégorie de barrières socioculturelles et organisationnelles avec une pondération de 34,27 % occupe le premier rang suivi de celle des barrières écologiques et géographiques (28,94 %) puis des barrières techniques (22,76 %). Ce qui démontre que les barrières externes à la technologie constituent les principaux obstacles à l'adoption de la gazéification au Burkina Faso. Les barrières internes notamment celles techniques sont aussi importantes mais elles pourraient être réadaptées ou modifiées en fonction des besoins et des aspirations des utilisateurs. Bien sûr la réadaptation de la technologie peut engendrer des coûts supplémentaires et même faire face à d'autres difficultés comme la question d'épuration des goudrons et les pertes thermiques. Cependant, la modification du comportement individuel ou collectif des acteurs nécessite des années voire des

générations. Aussi, les différents paramètres permettant de rendre accessible la biomasse peuvent être pris en compte à travers des analyses plus approfondies.

Une classification générale des principales barrières à l'adoption de la gazéification a été entreprise sur la base de leur pondération totale. Les poids ont été déterminés en multipliant le poids global de chaque catégorie de barrières par les poids locaux de chacune des sous-catégories de barrières spécifiques (Tableau 14).

Tableau 14 : Hiérarchisation globale des barrières déterminant l'adoption de la gazéification

Catégorie de barrières	Poids global de la catégorie	Rang de la catégorie	Sous-catégories des barrières d'adoption de la gazéification	Poids local des barrières	Poids total des barrières	Classement général des barrières
T	0,2276	3 ^e	Grande taille de la technologie	0,2864	0,0652	7 ^e
			Problème de dimensionnement de l'équipement par rapport aux besoins réels des utilisateurs	0,1399	0,0318	12 ^e
			Manque de ressources humaines qualifiées et matérielles appropriées au niveau local et national	0,5736	0,1306	1 ^{er}
EF	0,073	4 ^e	Coûts d'investissement initiaux élevés	0,1078	0,0079	21 ^e
			Coût élevé des pièces de rechange	0,1188	0,0087	19 ^e
			Absence de mécanisme de financement	0,1452	0,0106	18 ^e
			Absence de subventions	0,0874	0,0064	25 ^e
			Rentabilité par rapport aux anciennes techniques	0,201	0,0147	15 ^e
			Insuffisance de ressources financières pour un investissement	0,0705	0,0051	26 ^e
			Temps de retour sur investissement long	0,1647	0,012	16 ^e
SCO	0,3427	1 ^{er}	Prix non concurrentiel de l'énergie	0,1046	0,0076	22 ^e
			Manque d'expérience réussie en matière de gazéification	0,2043	0,0700	6 ^e
			Manque de sensibilisation des utilisateurs	0,1707	0,0585	8 ^e
			Manque de prise en compte du genre	0,1036	0,0355	11 ^e

Mise en évidence des barrières au déploiement de la gazéification au Burkina Faso

			Insuffisance de formation des utilisateurs	0,294	0,1008	3 ^e
			Manque d'implication des acteurs clés et de coordination entre les différentes parties prenantes	0,2274	0,0779	5 ^e
			Manque d'engagement politique	0,1289	0,0087	20 ^e
			Absence de politique gouvernementale adéquate	0,066	0,0044	27 ^e
			Absence de cadre institutionnel, juridique et réglementaire	0,0971	0,0065	23 ^e
PGI	0,0673	5 ^e	Instabilité politique	0,2231	0,015	14 ^e
			Manque de promotion et d'intérêt par le gouvernement	0,1602	0,0108	17 ^e
			Manque de subvention pour la biomasse-énergie	0,2276	0,0153	13 ^e
			Appartenance politique des acteurs des projets	0,097	0,0065	24 ^e
			Disponibilité de la biomasse	0,3875	0,1121	2 ^e
			Accessibilité des lieux de collecte de la biomasse	0,1292	0,0374	10 ^e
EG	0,2894	2 ^e	Moyens de transport de la biomasse non industriels	0,1792	0,0519	9 ^e
			Accès à l'électricité de la localité abritant la technologie	0,3042	0,0880	4 ^e

Le Tableau 14 révèle suivant un ordre décroissant que les barrières les plus importantes à l'adoption de la gazéification sont : le manque de ressources humaines qualifiées et matérielles appropriées au niveau local et national (0,13), le manque de biomasse disponible (0,11), la formation insuffisante des utilisateurs (0,10), l'accès à l'électricité dans la zone (0,09), le manque d'implication et de coordination entre les différentes parties prenantes (0,08), le manque d'expérience réussie en matière de gazéification (0,07), la taille de l'équipement (0,065), le manque de sensibilisation des utilisateurs (0,068), les moyens non industriels de transport de la biomasse (0,05) et l'inaccessibilité des sites de collecte de la biomasse (0,04).

3.6. Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité a été effectuée en vue de valider la classification générale en appliquant la méthode AHP. La catégorie des barrières socioculturelles et organisationnelles a enregistré le poids le plus élevé. Cela s'explique par les jugements faits en comparant cette catégorie par rapport à celle politique gouvernementale et institutionnelle avec un score de 5 de l'échelle de Saaty présentée dans la partie méthodologie et par rapport à celle écologique et géographique avec un score de 3 (moins important). Ainsi, la catégorie SCO influence les autres catégories des barrières à l'adoption de la gazéification. Cette validation a consisté à faire varier les poids de cette catégorie entre d'une part 10 % et 60 % et d'autre part, de 10 % et 90 % avec une incrémentation de 10 % (Figure 21).

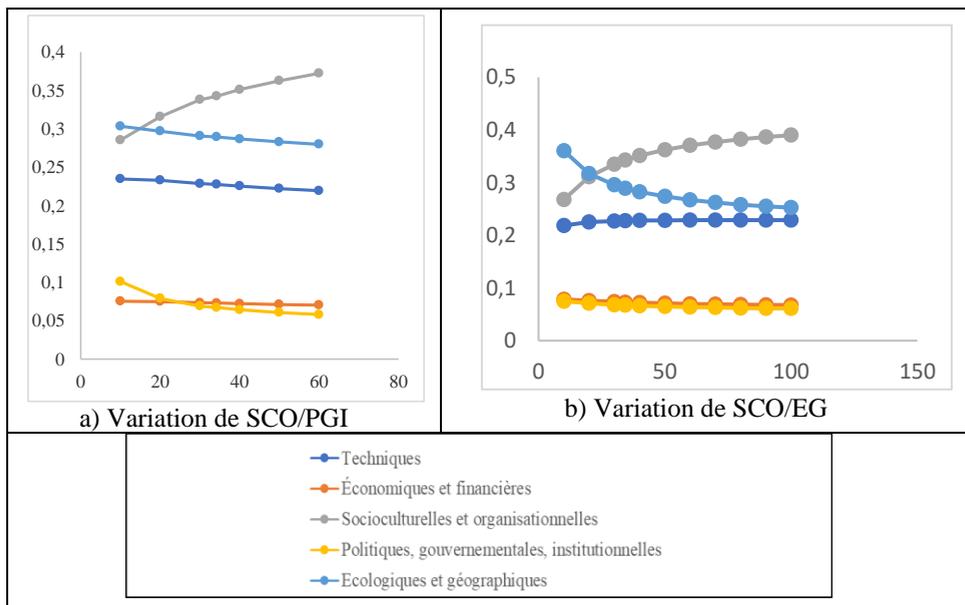


Figure 21 : Résultats d'analyse de sensibilité : a) variation des barrières SCO par rapport à celles PGI et b) variation des barrières SCO par rapport à celles EG

L'analyse de la figure 21 révèle que la variation des poids de barrières SCO entraîne le changement de rang des autres barrières. Lorsque le poids de la catégorie des barrières SCO est inférieur à la valeur normale (0,3), la barrière EG détient la valeur la plus élevée et le premier rang. En modifiant les poids sur une large plage de 0,4 à 0,9 de la catégorie SCO, elle conserve la valeur la plus élevée et les valeurs des autres barrières varient légèrement. On peut en déduire que la catégorie de barrières SCO a plus d'impact sur l'adoption de la gazéification et nécessite une plus grande attention pour supprimer les barrières de cette dimension externe à la technologie. La classification à l'aide de la méthode AHP est ainsi validée.

3.7. Conclusion partielle

Le présent chapitre a analysé et mis en exergue les facteurs susceptibles d'influencer le déploiement de la gazéification. L'analyse du contexte d'introduction de la gazéification suivant les moments de la sociologie de la traduction a relevé des insuffisances dans le choix des parties prenantes comme la non-implication de la SONABEL et du Ministère en charge de l'énergie, qui sont des acteurs clés dans le processus d'implantation de la technologie. Les bénéficiaires n'ont en réalité pas perçu les contraintes et la nécessité d'adopter une innovation au détriment de leurs techniques traditionnelles entraînant des doutes et une résistance à l'idée de changement, et par conséquent à la dissidence ou le non-développement de la gazéification par rapport à la pyrolyse bien que les sites d'installation de la technologie semblaient être des lieux favorables au développement de la production d'énergie. Par la suite, la mise en évidence des facteurs a permis d'identifier diverses barrières et de les structurer par ordre de priorité dans 5 catégories en utilisant la méthode AHP. Les barrières socioculturelles et organisationnelles, et les barrières écologiques et géographiques sont ressorties comme étant les principaux déterminants de l'adoption de la gazéification de la biomasse par rapport à celles des catégories « techniques », « économiques et financières » et « politiques gouvernementales et institutionnelles ». Ces barrières les plus importantes requièrent plus d'attention si l'on veut que la technologie soit relancée et acceptée.

**Analyse de la chaîne de valeur production
du syngas par gazéification de biomasse au
Burkina Faso**

Chapitre 4: Analyse de la chaîne de valeur de production du syngas par gazéification de biomasse au Burkina Faso

Le présent chapitre porte sur l'analyse de la chaîne de valeur en vue de relever les goulots d'étranglement et les conditions de développement de la filière de gazéification. L'enjeu est de déterminer le gisement de biomasse disponible, le coût de revient d'une tonne de résidus mobilisée à l'entrée d'une usine de gazéification et le coût de revient d'un kWh de syngas obtenu à la sortie de la technologie suivant des hypothèses simulées afin de guider les décisions entrepreneuriales futures.

4.1. Description de la chaîne de valeur de production d'énergie par gazéification de biomasse au Burkina Faso

Au Burkina Faso, la finalité de la production d'énergie issue de la gazéification de biomasse agricole diffère selon le type de besoin. Pour l'étuvage du riz paddy, un gazogène couplé à des chaudières est installé pour la fourniture d'eau chaude. Un autre type de gazogène permet de produire l'énergie électrique pour l'éclairage et le décortiquage (Figure 22).

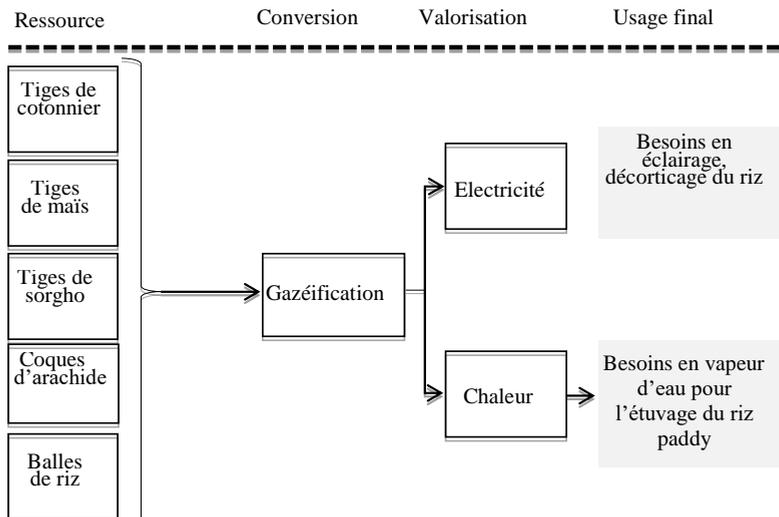


Figure 22 : Filière biomasse agricole – énergie au Burkina Faso

La cartographie de la chaîne de valeur identifie trois principales fonctions à savoir l'approvisionnement formé de la collecte et le stockage des résidus agricoles, la valorisation ou la transformation des résidus et l'utilisation énergétique. Chaque type d'acteurs assure plusieurs fonctions à la fois. On a par exemple des collecteurs/transporteurs de biomasse, des transporteurs/transformateurs de biomasse, et des transformateurs/utilisateurs (Figure 23).

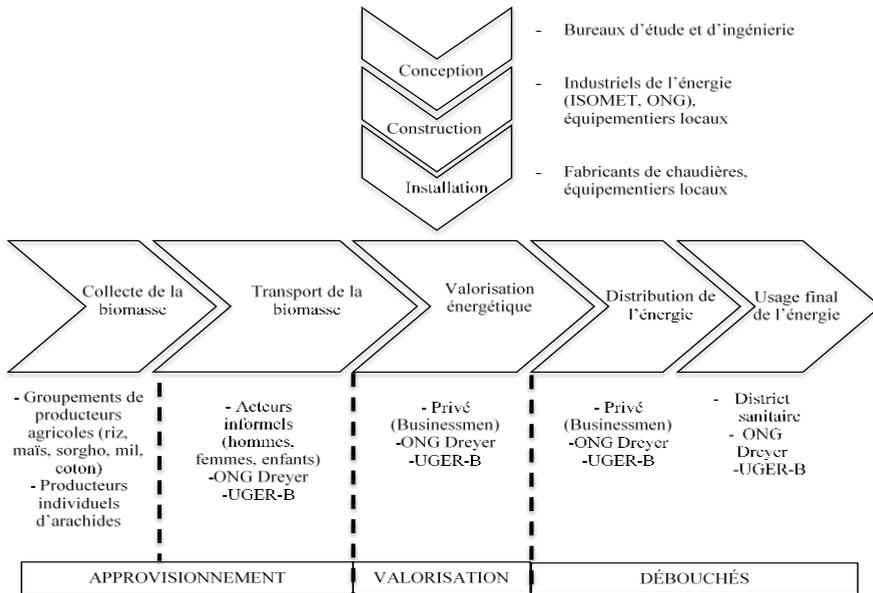


Figure 23 : Représentation graphique de la valorisation énergétique dans l'agro-alimentaire traditionnel par gazéification au Burkina Faso

La figure 23 mentionne une multitude d'acteurs qui interagissent et assurent des fonctions spécifiques qui sont détaillées dans le point suivant.

4.2. Analyse organisationnelle et fonctionnelle de la chaîne de valeur

Les catégories les plus importantes d'acteurs impliquées dans la chaîne de valeur biomasse agricole-énergie par gazéification sont les collecteurs, les transporteurs, les transformateurs et les autorités locales et administratives. Les groupes d'acteurs identifiés peuvent parfois jouer plusieurs rôles le long de la chaîne de valeur. Ainsi, on distingue deux types de filières au Burkina Faso dont une filière à circuit court et une autre à circuit long (Figure 24).

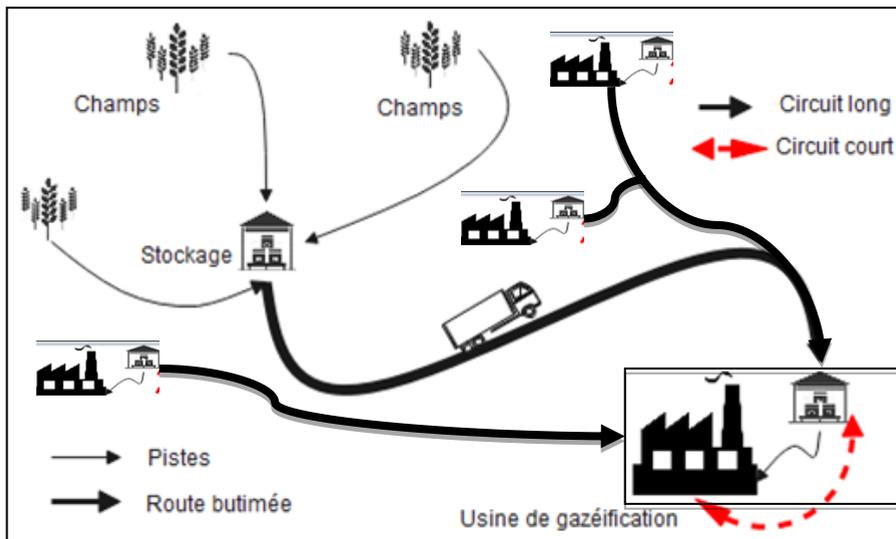


Figure 24 : Représentation schématique des types de filières de gazéification de biomasse au Burkina Faso

La figure 24 montre que la filière courte est constituée autour d'un nombre réduit d'acteurs intermédiaires, car la biomasse est disponible au sein de l'usine. Le circuit long se caractérise par l'interaction de plusieurs acteurs. Dans ce dernier cas, la biomasse est soit mobilisée depuis les champs ou à partir de centres de transformations agroalimentaires. L'analyse désagrégée de ces filières peut s'effectuer sur la base des résultats qui seront présentés à la section 4.3. On peut illustrer les filières courtes et longues en les appliquant, respectivement, à la mobilisation des tiges de cotonnier et des balles de riz.

4.2.1. Filière courte : cas d'une filière balles de riz - énergie

Dans le cadre d'une filière courte, toutes les activités de la production à la valorisation des balles de riz, se mènent au sein de l'usine de gazéification. Les transformateurs de riz paddy utilisent leurs propres résidus, disponibles localement. Ce type de filière permet d'assurer la disponibilité du combustible de qualité. Ainsi, les moyens nécessaires pour la mobilisation de la matière première sont quasi inexistantes dans ce cadre. Cependant, la question du stockage et des infrastructures nécessaires à cette fin peut influencer cette disponibilité locale du combustible. A cela s'ajoutent des risques de perte complète du stock en cas d'incendies. De plus, il faudra le mobiliser depuis d'autres centres de transformations, en cas de rupture. Pourtant, l'offre en résidus est généralement éparpillée en petites quantités dans de nombreuses industries agroalimentaires avec des périodes de transformation différentes.

4.2.2. Filière longue : cas d'une filière tiges de cotonnier - énergie

La filière tiges de cotonnier - énergie se caractérise par l'interaction de plusieurs acteurs dans la valorisation des tiges de cotonnier, disponibles dans les champs et donc nécessitant une mobilisation vers les centres de valorisation. Elle peut être structurée en six étapes plus ou moins distinctes : i) la récolte et/ou collecte, ii) le transport et stockage, iii) le prétraitement, et iv) la conversion du gaz en énergie finale (Figure 25).

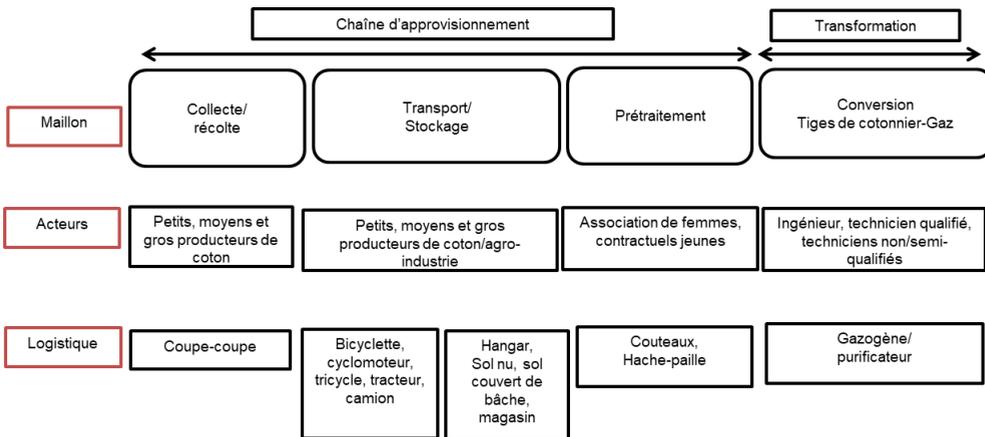


Figure 25 : Représentation schématique de la filière de gazéification de tiges de cotonnier

À chaque étape peuvent être associés des modes d'organisation, des coûts, des contraintes et incertitudes liées aux intervenants et à son intégration dans l'ensemble de la filière.

4.2.2.1. La collecte de la biomasse

Dans la collecte des tiges de cotonnier, plusieurs typologies d'acteurs peuvent intervenir. Ces acteurs sont surtout des producteurs de coton qui se caractérisent par deux types d'exploitation : les exploitations collectives et individuelles. Les exploitations collectives représentent un ensemble de producteurs individuels organisés en groupements de producteurs de coton (GPC), formés chacun d'au moins 15 personnes. Ce type d'exploitation est géré par un chef de ménage, et officiellement reconnu par le groupement villageois et les différentes structures d'interventions. Les exploitations individuelles sont des productrices non-membres du GPC. Selon le niveau d'équipement, trois typologies de producteurs se distinguent :

- les petits producteurs non équipés pratiquant la culture manuelle,
- les moyens producteurs possédant au moins une paire de bœuf pratiquant la culture attelée,
- les gros producteurs possédant un tracteur pratiquant la culture motorisée.

Les petits producteurs collectent eux-mêmes les tiges à l'aide de hache après les récoltes du coton graine ou au moment de la préparation du champ à l'approche de la prochaine saison. Le producteur utilisera la hache en moyenne 12 mois, et ses

frais d'exploitation sont quasi nuls à l'exception de son temps de travail. Toutefois, la dispersion des tiges de cotonnier dans le champ peut poser un véritable problème pour les petits producteurs.

Les moyens et gros producteurs, propriétaires ou locataires de charrette, de tricycle ou de tracteur, ramassent, engagent des contractuels pour couper les tiges de leur champ et peuvent aussi acheter chez les petits producteurs. Outre l'utilisation des gros moyens qui déterminent le coût de revient du transport, le coût de production comprend également l'investissement pour l'outillage, le salaire des ouvriers, le carburant et la location du tricycle ou du tracteur.

4.2.2.2. Le transport

Le transport des tiges de cotonnier et des balles de riz pour l'énergie n'est pas encore bien structuré au Burkina Faso. Toutefois, les acteurs potentiels peuvent s'organiser en trois groupes de transporteurs suivant le moyen de transport utilisé. On peut avoir :

- le cycliste qui assure une fonction ponctuelle. Il ne vend les tiges de cotonnier qu'en cas de besoin d'argent dans les centres de valorisation énergétique en assurant lui-même le transport. Il est soit propriétaire ou emprunteur d'une bicyclette.
- Le motocycliste qui assure le transport des tiges sur une distance moyenne de 15 kilomètres. Dans ce cas, le moyen de transport est soit acheté, loué ou emprunté.
- Le tractoriste ou tricycliste qui dispose d'un tricycle ou d'un tracteur. Selon les transporteurs des produits agricoles utilisant ce type de moyens de transport, la distance parcourue varie entre 15 et 25 kilomètres avec une moyenne de 20 kilomètres dans les zones de forte production cotonnière. Le transporteur est généralement un producteur moyen qui peut soit acheter les tiges de cotonnier aux petits producteurs ou engager des contractuels pour couper les tiges de son champ.
- Le véhiculé dispose d'un camion comme moyen de transport. C'est le moyen le plus efficace car il peut parcourir de longues distances, allant au-delà de 50 kilomètres autour du centre potentiel d'installation du gazogène. Bien que les camions soient des camions d'occasion, l'investissement est important. Les transporteurs sont parfois des grands producteurs ou des structures privées. Les camions offrent l'avantage de la distance parcourue et d'importante quantité transportée, en moyenne 10 tonnes par voyage.

4.2.2.3. Le stockage de la biomasse

Le stockage est une étape importante permettant d'assurer l'autonomie de production du gaz dans la centrale de gazéification. Aussi pour certains résidus agricoles, comme les tiges de cotonniers qui ne sont disponibles que pendant une période de l'année, le stockage permet de protéger la biomasse contre les intempéries. Plusieurs scénarios de stockage sont possibles à savoir le stockage au niveau de l'usine de conversion, les stockages intermédiaires dans les villages au niveau des groupements des producteurs de coton (GPC) et le stockage bord champ.

Le stockage au niveau de l'usine garantit une meilleure disponibilité de la

biomasse sans stockages intermédiaires. Cependant, il demande l'aménagement d'une grande surface pour le stockage. Le principal inconvénient de ce scénario est le risque de perte totale en cas d'incendie.

Les stockages intermédiaires au niveau des GPC favorisent une bonne organisation de la filière et une bonne disponibilité du combustible. Ils nécessitent au moins un magasin de stockage au sein des GPC bien que l'approvisionnement se fasse à la demande. Néanmoins, il permet de réduire la surface au sein de l'usine et limite le risque de perte du combustible en cas d'incendie.

Le stockage dans le champ diminue la charge d'organisation induite par la collecte de la biomasse et l'aménagement du magasin. Ce scénario peut être moins coûteux mais peut avoir des inconvénients majeurs notamment les incertitudes en termes de disponibilité de la biomasse pour une utilisation continue et de qualité du combustible liée aux conditions de stockage et son taux d'humidité.

L'approvisionnement en matière première est l'un des principaux obstacles à la rentabilité des filières compte tenu du coût lié à la collecte, au transport et au stockage de la matière première. Le choix d'un scénario de stockage dépend du type d'acteur du transport à privilégier. Un approvisionnement quotidien limite le volume du hangar de stockage. Quelle que soit l'option de stockage retenue, le stockage d'une quantité de biomasse sèche au sein de l'usine est à prévoir à l'usine afin de garantir une certaine sécurité d'approvisionnement. Un stock de sécurité pouvant assurer la production d'au moins quatre mois, correspondant à la période pluvieuse paraît une bonne option.

Le stockage peut se faire soit sur sol nu, sur sol recouvert de bâche, dans un hangar, dans un magasin, etc. (Figure 26). Quel que soit le moyen de stockage, divers critères devraient être remplis pour assurer la qualité du combustible en le protégeant contre l'humidité, sa destruction par les termites et limiter les risques de perte par incendie.

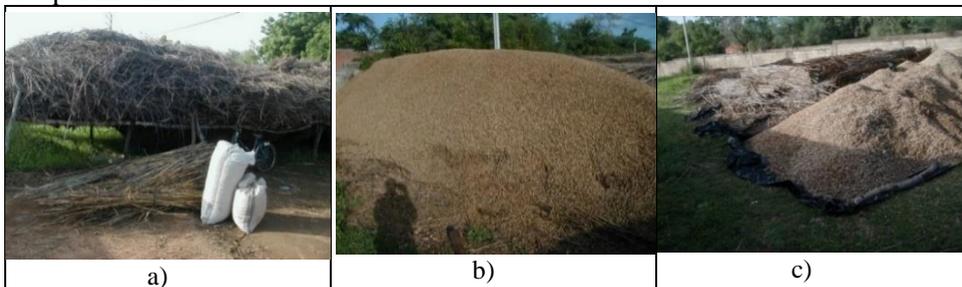


Figure 26 : Photographie des techniques de stockage de la biomasse :a) stockage des tiges de mil sur un hangar, b) stockage des coques d'arachide sur la paille et c) stockage sur une bâche
Source : Clichés de Sama, 2009

4.2.2.4. Le prétraitement de la biomasse

Le prétraitement consiste à conditionner la biomasse par découpage et séchage de sorte à assurer un bon écoulement dans le gazogène et obtenir une bonne qualité du gaz. L'objectif est de disposer, à l'entrée du gazogène, d'une biomasse avec un taux d'humidité inférieur à 20 % et d'une très faible granulométrie.

Les tiges de cotonnier ont un diamètre de 1 à 2 centimètres et des longueurs

inférieures à 2 mètres. Elles sont récoltées et entassées avant leur transport vers l'usine. Ces tiges sont d'abord séchées naturellement sur les champs. Puis le processus de séchage continue dans le lieu de stockage où l'humidité résiduelle peut continuer à s'évaporer.

Le découpage est manuel et s'effectue à l'aide de machettes afin de réduire au minimum les investissements nécessaires. Il nécessite une main d'œuvre importante. Cette main d'œuvre étant limitée en saison pluvieuse, le combustible nécessaire pour le fonctionnement continu du gazogène, doit être découpé et stocké avant cette saison durant laquelle la main-d'œuvre est mobilisée par diverses autres activités.

Quant aux balles, elles subissent un séchage à l'air libre au niveau de la centrale de production énergétique et un tri en vue d'obtenir des balles de qualité.

4.2.2.5. La conversion énergétique de la biomasse par gazéification

La conversion énergétique passe d'abord par le chargement de la biomasse dans le gazogène. L'alimentation de la biomasse se réalise en semi-continu à l'aide d'un sac. Cette étape nécessite l'emploi d'au moins deux personnes. À la sortie du gazogène, le gaz produit a une forte température, d'environ 500°C, et contient des particules de poussières et des goudrons pouvant détruire le moteur par encrassement. Il convient alors de le refroidir et d'en éliminer les particules et les goudrons à l'aide d'un épurateur.

4.3. Disponibilité de biomasse agricole au Burkina Faso

La présente section traite des résultats obtenus à l'issue des estimations de la disponibilité de la biomasse pour les besoins énergétiques à partir de la gazéification. Elle présente dans un premier temps des quantités théoriques de résidus produits au niveau national et régional en utilisant des informations statistiques sur la production agricole et les ratios résidus/produits obtenus dans la littérature. Par la suite, les quantités mobilisables pour la production d'énergie ont été analysées en tenant compte de plusieurs facteurs, notamment la conservation des sols, l'alimentation animale. Et enfin, la cartographie montre la répartition spatiale de ces résidus agricoles mobilisables dans l'ensemble du pays, et d'identifier les principales localités productrices de résidus. L'essentiel de cette partie est issu de l'article : "Geographical and economic assessment of feedstock availability for biomass gasification in Burkina Faso" de Fanta Barry^{a,c,*}, Marie Sawadogo^a, Igor W.K. Ouédraogo^a, Maïmouna Traoré/Bologo^b, Thomas Dogot^c publié en 2021, dans le journal « Energy Conversion and Management : X ».

4.3.1. Évolution des résidus agricoles au Burkina Faso

L'évolution du volume des résidus agricoles au Burkina Faso dépend des zones de cultures, des variétés de cultures et de la pluviométrie (Bambara et al., 2013). Les résidus disponibles sont issus de la culture du maïs, du sorgho, du riz, du coton et d'arachide. Le maïs et le coton sont produits presque dans les autres régions du pays. Ces cultures produisent d'importantes quantités en résidu. D'autres cultures comme le sorgho et l'arachide fournissent moins de résidus car elles sont produites dans des zones plus arides. Comme mentionné dans la méthodologie, le potentiel théorique de résidus a été calculé en utilisant les ratios résidus/produits (RPR) et les données de production des cultures obtenues à partir de la base de données statistiques et de la littérature. La figure 27 montre l'état des résidus théoriquement disponibles entre 2007 et 2018.

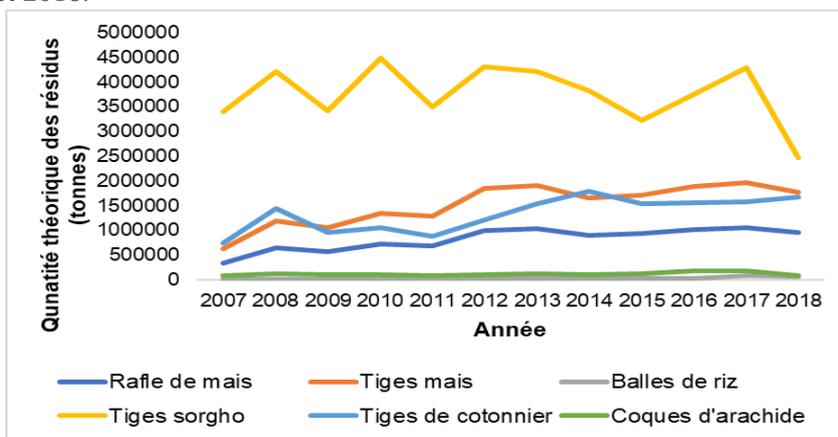


Figure 27 : Evolution des quantités des résidus agricoles sur le plan national

L'analyse de la figure 27 indique une légère tendance à l'augmentation de la production de résidus entre 2007 et 2011 et une augmentation prononcée entre 2012 et 2018. En outre, les tiges de cotonnier n'ont pas augmenté de manière significative. Elles sont restées à un faible niveau après la chute de 2009 jusqu'en 2014, où elles ont connu un léger pic. Aussi, les coques d'arachide et les balles de riz n'ont-elles pas non plus augmenté. Alors que les tiges de maïs, les tiges de cotonnier, les rafles de maïs et les coques d'arachide ont connu des augmentations observables entre 2012 et 2018, les tiges de sorgho ont oscillé avec des baisses significatives en 2011 et 2016. La quantité de biomasse théorique peut varier d'une année à une autre et d'une zone à une autre. Cela peut s'expliquer par le fait que la quantité de résidus varie exponentiellement avec la quantité de grains récoltés, qui est sensible à la pluviométrie, aux conditions pédologiques, aux paquets technologiques utilisés (types de variétés de culture, types et doses de fertilisants, pratiques culturales, etc.), les types et le nombre de résidu considéré et au comportement du producteur face aux pratiques agricoles recommandées. Ainsi, l'application de paquets technologiques tels que la combinaison des cordons pierreux, du zaï, du NPK et de l'urée a permis d'améliorer les rendements agricoles (Ouedraogo et al., 2020 ; Sissoko et al., 2018). Plus ces conditions sont favorables, plus les récoltes en grains

et en résidus sont abondantes. Cependant, une analyse plus détaillée montre que les tiges de cotonnier n'ont pas augmenté de manière significative. Elles sont restées à un faible niveau après la chute de 2009 jusqu'en 2014, où elles ont connu un léger pic. Cette période de baisse correspond à l'utilisation controversée du coton *Bt* génétiquement modifié (Vognan, 2019). Les coques d'arachide et les balles de riz n'ont pas non plus augmenté. Alors que les tiges de maïs, les tiges de coton, les épis de maïs et les coques d'arachide ont connu des augmentations observables entre 2012 et 2018, les tiges de sorgho ont oscillé avec des baisses significatives en 2011 et 2016. Le sorgho étant généralement cultivé dans la partie la moins arrosée du pays est sensible à la variation de la pluviométrie et les poches de sécheresse en début et en fin de saison conformément aux travaux de Bambara, Thiombiano, and Victor (2016).

4.3.2. Disponibilité théorique des résidus agricoles

Le gisement théorique de l'ensemble des résidus agricoles est d'environ 8 millions de tonnes en 2018 sur le plan national. Ce potentiel est formé par ordre de dominance, de 51 % de tiges de sorgho, 37 % de tiges et rafles de maïs, 11 % de tiges de cotonnier, et d'une faible proportion de coques d'arachide et de balles de riz (Figure 28).

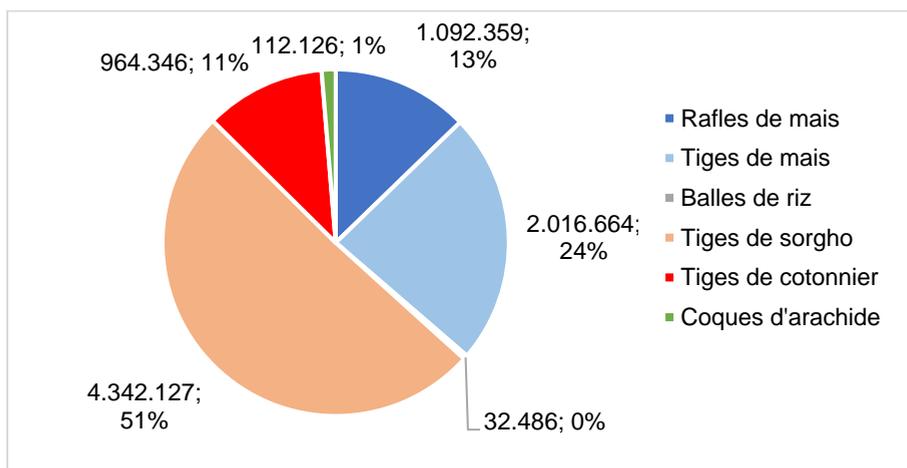


Figure 28 : Taille du gisement théorique national des résidus agricoles en 2018

L'analyse au niveau régional montre que les régions de forte production agricole enregistrent le plus de résidus avec des proportions de 16,05 % pour la région de la Boucle du Mouhoun et de 15,47 % pour celle des Hauts Bassins (Tableau 15).

Tableau 15 : Disponibilité théorique des résidus agricoles en 2018 par région

Région	Rafles de maïs	Tiges de maïs	Balles de riz	Tiges de sorgho	Tiges de cotonnier	Coques d'arachide	Total (tonnes)	Proportion du résidu (%)
Centre	13 183	4 056	620	59 430	-	22 667	99 957	1,19
Plateau central	30 974	9 531	720	276 114	7 451	51 360	376 149	4,47
Centre nord	8 208	2 526	4	412 831	421	115 884	539 875	6,41
Centre ouest	132 218	40 682	1 235	523 965	58 536	251 135	1 007 771	11,97
Centre sud	63 576	19 562	2 489	196 908	51 305	127 441	461 282	5,48
Sahel	3 690	1 135	6	220 636	-	28 595	254 061	3,02
Boucle du Mouhoun	130 864	40 266	8 279	826 747	168 650	175 708	1 350 514	16,05
Est	63 055	19 402	5 205	542 749	100 318	195 730	926 459	11,01
Centre est	101 769	31 314	3 679	251 099	92 833	169 609	650 303	7,73
Nord	6 726	2 069	143	339 706	-	179 834	528 478	6,28
Sud-ouest	103 225	31 762	536	226 989	108 190	60 299	531 000	6,31
Hauts Bassins	312 088	96 027	6 990	419 262	287 866	179 722	1 301 954	15,47
Cascades	122 783	37 779	2 581	45 693	88 777	90 931	388 544	4,62
Burkina Faso	1 092 359	336 111	32 486	4 342 127	964 346	1 648 917	8 416 347	100

4.3.3. Usages compétitifs des résidus agricoles

Le potentiel durable des résidus produits à des fins énergétiques dépend de leur densité et des usages compétitifs dans la région. Des entretiens avec les producteurs, il est ressorti qu'il existe une forte concurrence dans l'utilisation des résidus notamment les tiges de sorgho, les tiges de maïs, les rafles de maïs et les coques d'arachides (Tableau 16).

Tableau 16 : Utilisation compétitive des résidus agricoles

Résidus agricoles	Fourrage pour animaux	Litière pour volaille	Compost	Laissé au champ	Energie domestique	Proportion d'usage (%)
Balles de riz		X			X	80
Tiges de maïs	X		X	X	X	100
Rafles de maïs			X		X	100
Tiges de sorgho	X		X	X	X	100
Tiges de cotonnier				X		0
Coques d'arachide		X	X		X	100

^(x) Résidus utilisés

Le Tableau 16 montre que la majorité des résidus étudiés est quasi totalement utilisée. La proportion d'usage est de 100 % pour les tiges de maïs et de sorgho, les rafles de maïs et les coques d'arachide ; de 80 % pour les balles de riz, et rare pour les tiges de cotonnier selon les interviewés. Les résidus sont généralement utilisés pour soit l'élevage (alimentation du bétail et litière de volaille), la fertilisation des sols (amendement direct et compostage) et/ou l'usage domestique (construction de cases, fabrication de bicarbonate de potassium, énergie domestique).

L'utilisation des tiges de maïs et de sorgho prédomine dans l'élevage. Les éleveurs qui sont en général des agriculteurs, utilisent leurs propres résidus pour l'alimentation de leurs animaux. L'alimentation du bétail se fait généralement par pâturage des champs juste après les récoltes. Les résidus sont parfois stockés pour l'alimentation complémentaire des troupeaux pendant la saison sèche et pour l'embouche bovine ou ovine. Le stockage des résidus est très peu pratiqué à cause de la disponibilité du fourrage herbacé et ligneux dans les localités de forte production des résidus. Les balles de riz servent de litière de volaille.

La fertilisation des sols est possible à travers un amendement direct après le pâturage des champs ou un amendement organique à l'aide du compost. La restitution organique est quasi-nulle sauf chez certains agropasteurs qui possèdent un nombre important de troupeaux. Les tiges de sorgho et de maïs, les rafles de maïs et les coques d'arachide constituent la base pour le compostage.

La part de tiges de maïs et de sorgho laissées dans les champs se décompose et améliore la structure du sol. Si ces résidus sont ainsi utilisés, les tiges de cotonnier

laissées dans les champs se décomposent difficilement. Par conséquent, elles sont considérées non utilisées. Elles sont rassemblées puis brûlées au moment de la préparation des terres pour la prochaine campagne agricole. Mais les tiges de cotonniers sont de plus en plus associées à d'autres résidus agricoles pour produire du compost dans les centres de recherche agricole au Burkina Faso.

Les résidus de céréales sont devenus également des ressources énergétiques avec la dégradation des ressources forestières. Toutefois, l'exploitation des tiges de sorgho et de maïs pour le feu y est faible pour les zones relativement boisées regorgeant de quantités importantes de bois de chauffage comme Po et Dano par exemple. A Bama par contre, les balles de riz servent de combustible en remplacement du bois de chauffage qui se fait rare. Les rafles de maïs sont utilisées dans la cuisson. Au-delà de ces usages énergétiques, la cendre issue de cette combustion entre dans la fabrication du bicarbonate de potassium. En plus, les tiges sont utilisées dans la confection des seccos utiles à la construction des toits des cases, des nattes et des hangars.

Les coques d'arachide, les balles de riz et les tiges de cotonnier peuvent être mélangées à l'argile pour stabiliser les murs. Toutefois, les entretiens ont révélé qu'elles entrent rarement dans la construction.

En somme, seules les tiges de cotonnier et une partie des balles de riz sont inexploitées. Pourtant, elles ont une faible densité dans les champs au regard de leur diamètre. Leur valorisation pourrait nécessiter d'importants investissements. D'où l'intérêt de se focaliser sur ces résidus dans la suite de la recherche.

4.3.4. Potentiels mobilisables et énergétiques des résidus agricoles

Le potentiel mobilisable des résidus agricoles pour la bioénergie dans le contexte burkinabè se résume aux résidus peu valorisés tels que les tiges de cotonnier et les balles de riz. Le Tableau 17 synthétise le potentiel des balles de riz en 2018 et leur contenu énergétique par région.

Tableau 17 : Potentiels mobilisable et énergétique des balles de riz en 2018 par région

Région	Production de riz paddy (t)	Ratio	Potentiel théorique de balles de riz (t)	Potentiel mobilisable de balles de riz (t)	Energie potentielle (Tep)
Centre	2 953	0,21	620	124	51,24
Plateau central	3 427	0,21	720	144	59,51
Centre nord	21	0,21	4	1	0,41
Centre ouest	5 880	0,21	1 235	247	102,07
Centre sud	11 855	0,21	2 489	498	205,79
Sahel	26	0,21	6	1	0,41
Boucle du Mouhoun	39 423	0,21	8 279	1 656	684,32
Est	24 786	0,21	5 205	1 041	430,18
Centre est	17 517	0,21	3 679	736	304,14
Nord	682	0,21	143	29	11,98
Sud-ouest	2 551	0,21	536	107	44,22
Hauts Bassins	33 286	0,21	6 990	1 398	577,70
Cascades	12 290	0,21	2 581	516	213,23
Burkina Faso	154 697		32 486	6 497	2 684,80

Le Tableau 17 indique dans l'ensemble, un potentiel mobilisable de balles de riz relativement faible de l'ordre 6 497 tonnes courant 2018. La faiblesse du potentiel mobilisable des balles de riz peut s'expliquer par celle du RPR (0,21). Toutefois, il contient une quantité relativement importante en potentiel énergétique d'environ 2 685 Tep au niveau national. Sur le plan régional, les potentiels les plus élevés sont enregistrés dans 6 sur 13 régions administratives du pays. On a par ordre d'importance, la Boucle du Mouhoun (684,32 Tep), les Hauts Bassins (577,70 Tep), l'Est (430,18 Tep), le Centre Est (304,14 Tep), les Cascades (213,23 Tep) et le Centre Sud (205,79 Tep).

Les tiges de cotonnier constituent à elles seules plus de la moitié du potentiel mobilisable en résidus agricoles sur le plan national (Tableau 18).

Tableau 18 : Potentiels mobilisable et énergétique des tiges de cotonnier en 2018 par région

Région	Production en coton grain (t)	Ratio	Potentiel théorique de tiges de cotonnier (t)	Potentiel mobilisable de tiges de cotonnier (t)	Énergie potentielle (Tep)
Centre	-	2	-	-	-
Plateau central	3 725	2	7 451	5 588	2 296
Centre nord	211	2	421	316	130
Centre ouest	29 268	2	58 536	43 902	18 036
Centre sud	25 653	2	51 305	38 479	15 808
Sahel	-	-	-	-	-
Boucle du Mouhoun	84 325	2	168 650	126 487	51 963
Est	50 159	2	100 318	75 238	30 909
Centre-est	46 417	2	92 833	69 625	28 603
Nord	-	-	-	-	-
Sud-ouest	54 095	2	108 190	81 142	33 334
Hauts Bassins	143 933	2	287 866	215 899	88 695
Cascades	44 388	2	88 777	66 582	27 353
Burkina Faso	482 173		964 346	723 260	297 125

L'analyse du Tableau 18 indique que le potentiel mobilisable des tiges de cotonnier est de l'ordre de 723 260 tonnes en 2018 pour l'ensemble du pays. Il correspond à un potentiel énergétique de 297 125 Tep. Tout comme pour les balles de riz, la Boucle du Mouhoun et les Hauts Bassins sont les localités qui enregistrent le plus de potentiel avec des quantités respectives de 51 963 et de 88 695 Tep. Les tiges de cotonnier pourraient faire fonctionner un gazogène de 1 MW pendant plus d'un an dans ces régions de forte production agricole.

Les deux résidus mobilisables (tiges de cotonnier et balles de riz) renferment environ 300 000 Tep comme potentiel énergétique pouvant couvrir plus de 50 % des besoins énergétiques du Burkina Faso (90 525 Tep pour l'année 2018). Ces résidus pourraient ainsi contribuer de manière significative à la satisfaction durable des besoins futurs en bioénergie du secteur agro-industriel du pays.

Les résidus sont fortement concentrés dans la partie ouest du Burkina Faso, la zone la plus propice pour l'implantation d'une usine de gazéification (Figure 29).

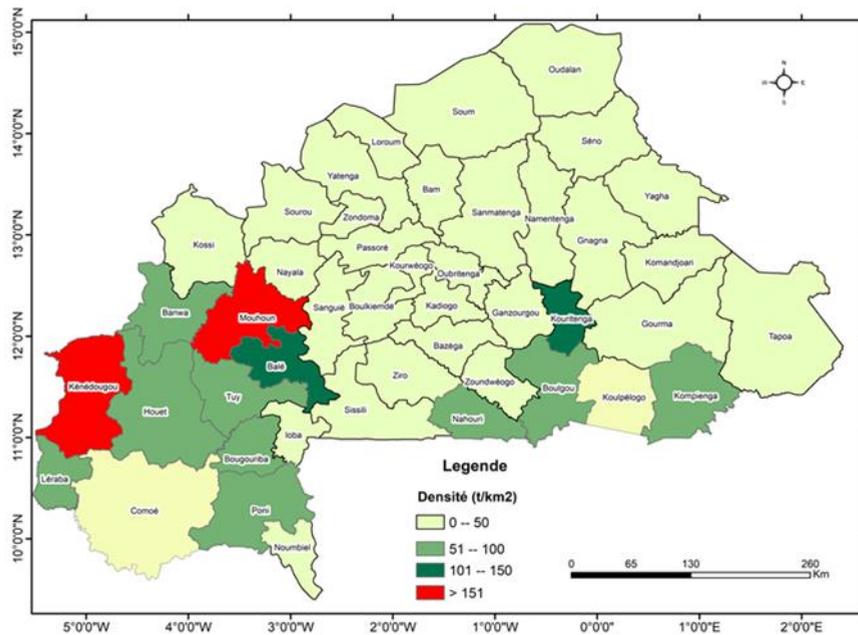


Figure 29: Densité des tiges de cotonnier dans les provinces du Burkina Faso

La Figure 29 montre que les faibles densités de tiges de cotonnier sont observées dans les provinces de sept régions telles que Sahel, Plateau central, Centre, Centre nord, Centre ouest, Centre sud, et Cascades. Le stock le plus important est enregistré dans des localités comme les Hauts-Bassins et la Boucle du Mouhoun avec une densité d'au moins 100 tonnes/km². Ces zones de forte production pourraient être plus propices à une éventuelle installation d'un gazogène d'une capacité de 1 MW. Cependant, la faible densité des tiges de cotonnier dans les champs pourrait entraîner l'augmentation des coûts de récolte et de transport, et par conséquent la hausse des coûts de production d'énergie. A cet effet, la section suivante analysera les différents coûts de production d'énergie.

4.4. Analyse financière de la chaîne de valeur « production d'énergie par gazéification de la biomasse » au Burkina Faso

L'analyse financière de la filière biomasse - énergie par gazéification au Burkina Faso passe par une analyse des différentes étapes en les intégrant dans une approche faisant ressortir le prix de revient relatif à la mobilisation d'une tonne de biomasse, rendue à l'entrée de la filière énergétique. L'analyse se base sur un modèle d'infrastructures et de réseau de collecte et sur des hypothèses opératoires.

4.4.1. Récolte ou collecte des résidus

Le coût de la collecte des résidus au champ dépend de la quantité des résidus collectée par hectare, du nombre d'hectares par jour et par personne, et du coût journalier de la main d'œuvre. En outre, le coût de la collecte des tiges de cotonnier

se fixe généralement à l'hectare au Burkina Faso. Dans ce cas, il s'élève à 20 000 FCFA l'hectare. Par contre, cette option n'implique que des contractuels individuels et ne tient donc pas compte de la valeur intrinsèque des résidus dont la fixation du prix est difficile étant donné qu'il n'existe pas de véritable marché. Une autre éventualité serait de baser l'échange de matières sur une compensation en nature. Les cendres issues de la gazéification peuvent être redistribuées aux producteurs pour la fertilisation des champs. Le transport des cendres peut être assuré soit par les producteurs ou par les camions au moment du départ pour la mobilisation des tiges. En outre, la redistribution n'engendre aucun coût quel que soit l'option adoptée.

De la première hypothèse, sachant que le rendement en tiges est en moyenne de 2 tonnes par hectare (DSS/DGESS/MAAHM, 2021a), calculé à partir des statistiques agricoles où le rendement moyen en coton grain est d'environ 1 tonne à l'hectare, le coût de collecte d'une tonne de tiges est de 10 000 FCFA ou 15,25 €.

La biomasse agricole n'est généralement pas vendue. Les seuls marchés existants sont les grandes villes où il y a des points de vente de fanes d'arachide pour l'alimentation du bétail et de tiges de céréales pour la construction des hangars. Dans ces marchés, le prix d'un fagot de 5 kilogrammes varie entre 300 et 500 FCFA selon la période et la localité. Ainsi, le coût d'achat d'un kilogramme de biomasse est compris entre 60 et 100 FCFA, équivalent au plus à 100 000 FCFA (153 €) la tonne. Des interviews avec les acteurs de projets de gazéification, il ressort que le prix bord champ d'une tonne de biomasse agricole, notamment les tiges de sorgho, de maïs, de cotonnier, les coques d'arachide ou les balles de riz était d'environ 196 770 FCFA par tonne, soit 300 € la tonne. Ce prix, comparé à celui d'une tonne de bois qui équivaut environ à 51 000 incluant toutes les taxes FCFA ou 77,76 € selon Ouedraogo (2015), l'opérateur gagnerait à utiliser le bois au lieu des résidus agricoles. Comme évoqué plus haut, cette option n'est pas envisageable en termes de durabilité mais met en avant une situation contradictoire quant à la tarification de la biomasse. Ainsi, c'est le coût de la biomasse tel qu'il a pu être observé sur les marchés qui sera considéré dans la présente recherche même si sa valorisation est d'une autre nature. Ce prix du marché tient compte du coût de collecte et de transport de la biomasse vers les marchés. Au regard du contexte de variabilité des prix des produits, un test de sensibilité sera réalisé en supposant une variation de plus ou moins 30 %, 60 % et 80 % du prix des résidus.

4.4.2. Transport de la biomasse

L'estimation du coût de revient du kilogramme de tiges de cotonnier transportées s'effectue pour chacune des catégories d'acteurs du transport énumérées plus haut. L'analyse prend en compte deux options de calcul. La première vise à objectiver les coûts supportés par un opérateur, c'est-à-dire tous les investissements nécessaires pour le transport ainsi que les consommables et frais de personnel. La seconde se base sur le marché locatif afin de mettre en perspective les coûts relatifs à la sous-traitance.

Les cyclistes transportent de faibles quantités sur de courtes distances. Toutefois, leur implication dans la filière contribue à créer des emplois, l'une des conditions importantes pour la durabilité. Ce facteur pourrait être mesuré en termes de nombre

d'emplois créés pour l'activité de transport des tiges de cotonnier. Pourtant, une usine de gazéification nécessite un nombre important d'acteurs pour l'approvisionnement viable. Dans ce cas, la tenue de l'exploitation devient plus complexe engendrant des incertitudes dans l'approvisionnement du combustible. Le cycliste, qu'il soit producteur ou acheteur, investit 75 000 FCFA dans l'acquisition d'un vélo qui peut être supposé s'amortir en 5 années d'utilisation. L'amortissement du vélo revient à 15 000 FCFA par an ou 7 500 FCFA pour 6 mois, en considérant que l'engin ne sera utilisé que 6 mois (de novembre à avril) dans l'année correspondant à la période de disponibilité des résidus dans les champs. Il dépense environ 1 000 FCFA par mois pour les entretiens et réparations, soit 6 000 FCFA durant la période d'activité. La distance moyenne de 7 km lui permet d'effectuer 2 voyages par jour, soit 40 voyages par mois. La quantité moyenne de tiges de cotonnier transportée s'élève à 3 600 kilogrammes pour les 6 mois, à raison de 15 kilogrammes en un voyage, sous l'hypothèse de 2 voyages par jour pendant 5 jours de travail dans la semaine. Le cycliste peut être considéré comme un contractuel qui assure en plus du transport, le fagotage des tiges. Ainsi, sa main d'œuvre journalière est estimée à 750 FCFA pour les 2 voyages, d'où un coût total d'opportunité de la main d'œuvre de 90 000 FCFA incluant la rémunération de son temps de travail pendant les 6 mois. Le coût de revient du cycliste est alors de 28 750 FCFA ou 43,83 € par tonne.

Pour le motocycliste, le coût de revient de la biomasse transportée peut être évalué en ajoutant les coûts liés à l'achat du carburant. Il lui faut 1 litre à 750 FCFA pour assurer une distance moyenne de 15 km. Le moyen de déplacement qui peut coûter en moyenne 500 000 FCFA, pourrait s'amortir sur 5 ans, soit 100 000 FCFA/an ou 50 000 FCFA pour la campagne de 6 mois. Les frais liés à l'entretien et aux réparations d'une motocyclette s'élèvent en moyenne à 2 000 FCFA par mois, équivalent à 12 000 FCFA durant la période d'activité. Il transporte en moyenne 30 kilogrammes de tiges au cours d'un voyage sur une distance moyenne de 30 kilomètres. La quantité totale de biomasse transportée au cours de 6 mois est de 7 200 kilogrammes pour un total de 240 voyages en raison de 2 voyages par jour pendant les 5 jours de travail dans la semaine supposé plus haut. La constitution des fagots des tiges en fagots de 5 kilogrammes peut être réalisée soit par le motocycliste lui-même ou un contractuel. Etant donnée les quantités relativement faibles à transporter, le fagotage peut être assuré par le motocycliste. Ainsi, la rémunération de sa main d'œuvre qui tient également compte du fagotage des tiges est habituellement estimée à 1000 FCFA par jour selon les interviews. Le coût total d'opportunité de la main d'œuvre revient à 120 000 FCFA. Le prix de revient est ainsi de 75 278 FCFA ou 115 € la tonne de tiges transportées à moto.

Les tractoristes ou tri-cyclistes sont généralement des producteurs moyens qui pourraient soit acheter les tiges de cotonnier aux petits producteurs ou engager des contractuels pour couper les tiges de cotonnier dans leurs champs. La distance de transport varie de 15 à 25 kilomètres avec une moyenne de 20 kilomètres dans les zones de forte production cotonnière.

Pour un voyage, une quantité d'au moins 600 kilogrammes de tiges de cotonnier peut être transportée par voyage quel que soit le moyen utilisé selon les transporteurs et les producteurs interviewés. Ces moyens de transport sont

généralement possédés par des responsables de coopératives agricoles et des commerçants. La détermination du coût de revient se fonde alors les frais de location et les quantités transportées par voyage.

La location d'un tricycle est de 2 500 FCFA par voyage sans les chargeurs et de 3 500 FCFA avec les chargeurs/déchargeurs et les frais de carburant. En supposant une location avec toutes les charges et en se basant sur le coût d'un seul voyage, le prix de revient d'un kilogramme de tiges transportées dans ce cas est de 5,83 FCFA ou 5 833 FCFA par tonne. Ce prix de revient est de 12,5 FCFA (12 500 FCFA/tonne) pour le tracteur qui peut être loué soit à 5 000 ou à 7 500 FCFA respectivement avec et sans chargeurs/déchargeurs en appliquant le même principe de calcul.

Le camion est le moyen de transport le plus efficace pour une longue distance. Cette distance est supérieure à celle des tricycles et tracteurs. Les transporteurs sont parfois des grands producteurs ou des structures privées. Au regard de la distance à parcourir, un seul voyage peut être effectué en une journée. Toutefois, d'énormes quantités sont transportées, en moyenne 10 à 20 tonnes par voyage selon la capacité du camion. En considérant un camion de 20 tonnes, la location journalière est de 300 000 FCFA. Ce montant inclut le salaire du chauffeur, les frais de chargement et de déchargement de la biomasse, de carburant et les frais de route. Ainsi, le prix de revient d'une tonne de tiges transportées est le même que celui obtenu avec l'usage d'un tracteur à savoir 15 000 FCFA. Par contre, pour cette même quantité obtenue avec un camion, l'utilisation d'un tracteur ou d'un tricycle nécessitera au moins 15 voyages. Cela implique aussi une marge importante de risques associés à l'obtention d'un bon nombre de tracteurs ou de tricycle, des pannes, à la fluctuation du prix du carburant et une consommation plus importante de carburant, un combustible fossile qui impacte négativement l'environnement. Il revient alors nécessaire de privilégier l'utilisation de camion pour réduire les incertitudes, car il offre l'avantage de la distance parcourue et d'importantes quantités transportées. Le Tableau 19 fournit la synthèse du coût de revient du transport de la biomasse.

Tableau 19 : Coût de revient lié au transport de la biomasse

Type de moyen de transport	Bicyclett	Motocyclet	Tricycl	Tracteur	Camion
Amortissement	7 500	50 000			
Entretien/réparation	6.000	12 000			
Main-d'œuvre	90 000	120 000			
Location avec chauffeur et apprentis, et frais divers (FCFA/voyage)			3 500	7 500	250 000
Carburant et lubrifiant		360 000			
Quantité totale biomasse transportée (tonne/semestre ou voyage)	3,6	7,2	0,6	0,6	20
Coût de revient en FCFA/tonne	28 750	75 278	5 833	12 500	15 000
Coût de revient en	8,56	10,46	0,61	1,31	0,83

L'analyse du Tableau 19 révèle que le prix de revient du transport d'une tonne de tiges de cotonnier varie entre à 5 833 et 75 278 FCFA équivalent à 8,93 et 115 €. En effet, le tricycle engendre le coût de revient le plus faible par rapport à la motocyclette. Ce dernier moyen de transport conduit aux coûts de revient les plus élevés avec au moins 10 FCFA pour transporter une tonne sur un kilomètre de distance parcourue suivi de la bicyclette. Les autres moyens à savoir le tricycle, le camion et le tracteur enregistrent les coûts de revient au kilomètre les plus faibles, soient respectivement 0,61 ; 0,83 et 1,31 FCFA pour une tonne de tiges transportées par kilomètre. On constate alors qu'il est plus bénéfique de louer le moyen de transport à utiliser plus tôt que de l'acheter. Par la suite, l'utilisation des moyens de transport loués comme le camion seront privilégiés dans des scénarios visant à réduire le coût de revient de la biomasse mobilisée à l'entrée de l'usine de gazéification.

4.4.3. Stockage de la biomasse

Le coût de revient du stockage de la biomasse dépend des types d'acteurs et des moyens de stockage qui peuvent être le sol nu, une bâche, un hangar ou un magasin comme évoqué plus haut. Le stockage sur sol nu ou sous une bâche pourrait coûter moins cher. L'inconvénient est son exposition aux attaques des termites, à l'effet du vent et de la pluie. Il est donc préférable d'envisager des solutions qui pourront garantir la sécurité du stock telles que préconisées dans des études de filière applicables à grande échelle. Le seul moyen à considérer est donc le magasin.

Deux options se présentent pour la construction d'un magasin : soit en adobe pour une durée de vie 10 ans ou une construction en parpaing dont la durée de vie de l'ouvrage peut atteindre 20 ans. Tchouate Heteu (2003) a supposé un hangar de volume d'au moins 500 mètres cubes pour stocker 44 tonnes de tiges de cotonnier, équivalent à un volume de 440 mètres cubes obtenu sur la base d'estimation d'un ratio moyen de 100 kilogrammes par mètre cube à partir des mesures réalisées au Burkina Faso avec des masses volumiques comprises entre 30 et 200 kilogrammes par mètre cube. Dans ce sens, il faudra ici un volume de 480 mètres cubes pour les 48 tonnes de tiges considérées. D'autres mesures récemment effectuées par nous-mêmes donnent un volume de 417 mètres cubes pour stocker des balles de riz de 48 tonnes en se basant sur une masse volumique de 115 kilogrammes par mètre cube. Ceci rejoint l'hypothèse qu'il faut un magasin de 500 mètres cubes.

Selon les entrepreneurs locaux, le coût total de construction d'un magasin de cette capacité en parpaing peut s'élever à 600 000 FCFA. En considérant un amortissement annuel de 30 000 FCFA, avec une durée de l'ouvrage de 20 ans, le prix de revient du stockage d'une tonne de tiges est de 625 FCFA, soit 0,95 €. Et le coût de construction d'un magasin en adobe est d'un montant de 200 000 FCFA avec un amortissement annuel de 20 000 FCFA conduisant à un coût de revient de 417 FCFA/tonne, soit 0,64 € par tonne pour stocker une quantité de 48 tonnes.

Étant donné l'influence du calendrier de disponibilité des tiges de cotonnier sur le coût du stockage, trois scénarios s'appliquent : soit centraliser le stockage au niveau de l'usine, ou procéder uniquement à un stockage intermédiaire, soit combiner les deux types de stockage. Pour chaque scénario, on peut opter pour des magasins en adobe et/ou en parpaing. Un stockage intermédiaire n'implique certainement pas la

construction d'un seul magasin. Il impose néanmoins la construction de plusieurs magasins de plus petite taille afin de les rapprocher des zones de collecte. S'ils sont de plus petite taille, ils coûteront moins cher à l'unité mais il y a certainement des frais incompressibles. Dans l'hypothèse du stockage intermédiaire combiné à un stockage au sein de l'usine, le stock de sécurité au niveau de l'usine peut être également réduit. Concernant la taille des magasins, on peut considérer qu'ils peuvent être de plus petite taille s'il y a du stockage intermédiaire. Ceci étant, la taille d'un magasin ne se limite pas à la surface utile de stockage. S'il y a du séchage à prévoir, il faudra étaler les tiges, les retourner avant de les empiler. Le stockage d'une matière trop humide peut être très dommageable. Cela demande de la surface et de la manutention. On pourrait alors considérer que les magasins conservent la même taille que celle précédemment estimée avec une surface de stockage utile de 50 %. Il faudrait donc 2 magasins intermédiaires capables de stocker 24 tonnes chacun et un magasin à l'usine qui, selon les mêmes principes, aurait un stock de sécurité de 24 tonnes. Dans le stockage intermédiaire, deux manœuvres peuvent assurer la manutention des tiges dans les magasins. Cette activité étant ponctuelle et ne mobilisant les manœuvres qu'en cas d'arrivée de biomasse, le salaire forfaitaire de 45 000 FCFA par personne peut être estimée, soit 90 000 FCFA en supposant un travail journalier individuel de 750 FCFA par jour et par personne durant au moins deux mois, période de forte disponibilité des résidus agricoles (janvier et février). Le Tableau 20 présente ces combinaisons possibles.

Tableau 20 : Coût de revient du stockage des tiges de cotonnier

Désignation	Stockage intermédiaire uniquement	Stockage centralisé au sein de l'usine uniquement	Stockage intermédiaire et au sein de l'usine
Amortissement de 2 magasins en adobe (FCFA)	40 000		40 000
Amortissement d'un magasin en parpaing (FCFA)		30 000	30 000
Manutention des tiges (FCFA/an)	90 000		90 000
Quantité stockée (tonne)	48	48	48
Coût de revient (FCFA par tonne)	2 708	2 708	7 083

L'analyse du Tableau 20 montre que le prix de revient du stockage d'une tonne de tiges de cotonnier est compris entre 625 et 7 083 FCFA ou 0,95 et 10,80 € selon la combinaison de type de stockage.

4.4.4. Prétraitement de la biomasse

La gazéification de la biomasse implique des exigences d'humidité et de granulométrie pour générer un meilleur rendement énergétique et faciliter l'alimentation de la biomasse à l'entrée du gazogène. La granulométrie de la biomasse idéale étant entre 2 et 5 millimètres et le taux d'humidité viable inférieur à 20 %, le broyage ou découpage, et le séchage de la biomasse s'imposent. Deux

options sont possibles à savoir un prétraitement avant stockage intermédiaire au sein des GPC ou un prétraitement au sein de l'usine.

Le prétraitement au lieu de stockage intermédiaire facilitera le transport d'une quantité importante donc permettra de réduire le nombre de voyages. Étant donné les difficultés d'accès à l'électricité dans les zones rurales du Burkina Faso, le prétraitement manuel est privilégié dans ce lieu de stockage intermédiaire. Dans ce cas, l'activité pourrait employer au moins 20 contractuels, femmes et jeunes, dans la région productrice de la matière première pouvant être payé selon les interviewés, à concurrence d'un montant forfaitaire de 20 000 FCFA par tonne correspondant à 960 000 FCFA pour les 48 tonnes. Cela n'empêche pas un séchage supplémentaire au sein de l'usine qui peut être réalisé par deux manœuvres, recevant chacun un salaire journalier de 750 FCFA pendant une année. Ce qui revient à 360 000 FCFA à raison de 5 jours de travail dans la semaine. Le coût de revient du prétraitement d'une tonne de tiges à l'entrée du gazogène est de 27 500 FCFA ou 42 €.

Lorsque le prétraitement est effectué au sein de l'usine uniquement, le découpage des tiges de cotonnier peut se faire à l'aide de hache-paille manuel vendu à 260 000 FCFA en tenant compte de son amortissement au bout de 5 ans. L'amortissement annuel de l'outil revient à 52 000 FCFA. Les coûts variables se constituent du salaire forfaitaire de 150 000 FCFA, en supposant l'emploi de deux agents pour un broyage ponctuel des 48 tonnes. Dans l'ensemble, le découpage/broyage revient alors à environ 4 208 FCFA la tonne, soit 5,59 € par tonne (Tableau 21).

Tableau 21 : Coût de revient lié au prétraitement de la biomasse

Désignation	Prétraitement intermédiaire	Prétraitement au sein de l'usine	Prétraitement intermédiaire et au sein de l'usine
Contractuels (FCFA par tonne)	960 000		960 000
Hache-paille (FCFA/an)		52 000	
Salaire agents pour broyage (FCFA/6 mois)		150 000	360 000
Quantité de tiges prétraitées (tonne)	48	48	48
Coût de revient (FCFA/tonne)	20 000	4 208	27 500

De l'analyse du Tableau 21, il ressort qu'il est moins coûteux d'effectuer le prétraitement à l'aide de hache-paille (4 208 FCFA par tonne) que d'avoir recours aux contractuels.

Dans l'ensemble, le scénario d'approvisionnement de biomasse qui semble être le plus plausible, est séquencé comme suit : *Achat de la biomasse (marché local) – Transport par tricycle – Prétraitement (contractuels) - Stockage intermédiaire (2 magasins en adobe) – Transport par camion – Prétraitement (hache-paille) – Stockage au sein de l'usine (magasin en parpaing)*. Cette combinaison fournit le prix de revient de la biomasse rendue à l'entrée de la centrale de gazéification le plus réaliste qui est de 155 416 FCFA ou 237,27 € par tonne correspondant à 155 FCFA le kilogramme (Tableau 22).

Tableau 22 : Part des activités dans le coût de revient global des tiges de cotonnier mobilisées du marché à l'entrée du centre de gazéification

Activités	Coût de revient (FCFA/tonne)	Part des activités dans le coût de revient total (%)
Collecte de la biomasse	100 000	64,34
Transport de la biomasse (tricycle plus camion)	20 833	13,40
Prétraitement intermédiaire et au sein de l'usine	27 500	17,69
Stockage intermédiaire et au sein de l'usine	7 083	4,56
Total	155 416	100,00

L'analyse du Tableau 22 révèle que l'acquisition des tiges de cotonnier est l'activité déterminante en amont de la chaîne de production du syngas. Ce dernier implique un coût de revient assez important, soit une contribution au coût de revient global de plus de 60 %. L'activité de collecte de la biomasse est suivie du prétraitement puis du transport. On peut également imaginer un autre scénario, où on réduit les coûts d'acquisition de la biomasse en optant pour une collecte réalisée par des contractuels en lieu et place de l'achat sur les marchés. Ce qui renvoie à un schéma organisationnel en circuit long qui combine la *Collecte contractuelle – Transport avec des tricycles – Stockage intermédiaire dans deux magasins en adobe – Transport avec un camion – Prétraitement intermédiaire et au sein de l'usine - Stockage au sein de l'usine dans un magasin en parpaing* (Figure 30).

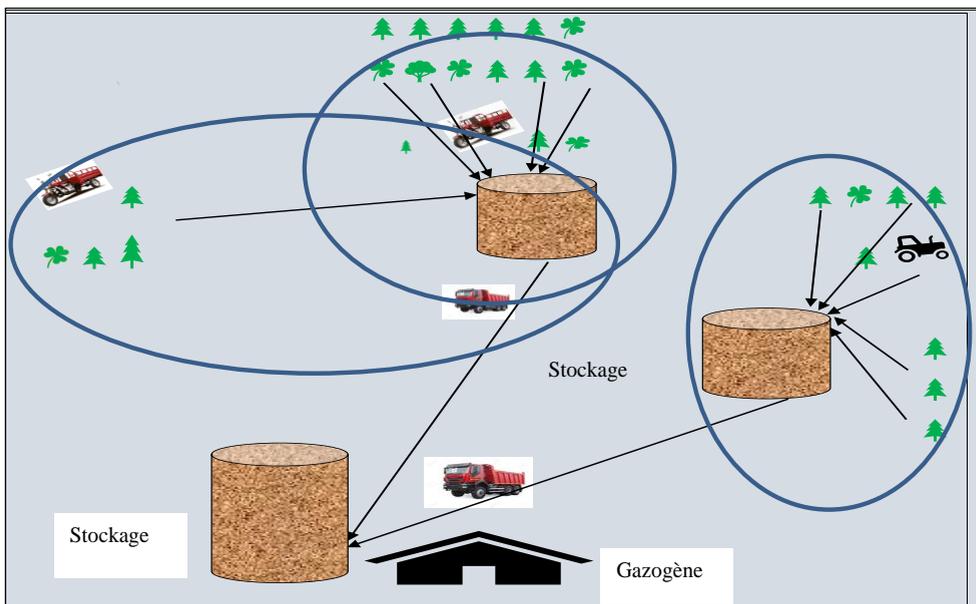


Figure 30 : Représentation du transport avec des sites de stockage intermédiaires

Dans ce circuit, la collecte est effectuée par des contractuels. Les producteurs recevront non seulement de la cendre issue de la gazéification pour fertiliser leurs champs mais aussi bénéficieront de l'appui gratuit pour le nettoyage. Ce qui permet de contourner l'achat de la biomasse qui est une activité déterminante en amont de la chaîne comme démontrée plus haut. Le transport des tiges se fait d'abord à l'aide de tricycles sur des pistes ralliant les champs au point de collecte puis d'un camion de 20 tonnes loué. Le stockage est double (stockage intermédiaire et au sein de l'usine), et le prétraitement constitue une activité ponctuelle, réalisée à l'aide de hache-paille. Sur la base de cette schématisation, le prix de revient des tiges de cotonnier rendues à l'entrée de l'usine de gazéification est de 65 416 FCFA ou environ 100 € par tonne (Tableau 23).

Tableau 23 : Coût de revient des tiges de cotonnier mobilisées du champ à l'entrée du centre de gazéification

Activités	Coût de revient en FCFA/tonne	Part des activités dans le coût total (%)
Collecte de biomasse	10 000	15,29
Transport de la biomasse (tricycle plus camion)	20 833	31,85
Prétraitement intermédiaire et au sein de l'usine	27 500	42,04
Stockage intermédiaire et au sein de l'usine	7 083	10,83
Total	65 416	100,00

L'analyse du Tableau 23 montre que les activités de prétraitement (42,04 %) et de transport (31,85 %) deviennent les plus dominantes dans la formation du coût de revient global des tiges rendues à l'entrée de l'usine de gazéification en réduisant le coût de revient dû à l'achat organisé de la biomasse.

4.4.5. Accessibilité des résidus mobilisables pour la production du syngas

L'analyse des coûts liés à la production du syngas s'applique à deux options, 1) l'utilisation de la technologie de gazéification fabriquée localement, et 2) l'utilisation de la technologie de gazéification importée (Tableau 24).

Tableau 24 : Coût de revient d'un kWh de syngas issue des résidus mobilisables

Désignation	Technologie locale		Technologie importée	
	Balles de riz	Tiges de cotonnier	Balles de riz	Tiges de cotonnier
Besoin en biomasse (tonne/an)	48	48	48	48
Rendement du gazogène (%)	30	30	30	30
Quantité d'énergie thermique potentielle (kWh)	194 400	252 000	194 400	252 000
Coût de collecte de la biomasse (€)	0	732	0	732
Coût de transport de la biomasse (€)	0	1 525	0	1 525
Prétraitement intermédiaire et/ou au sein de l'usine (€)	308	2 013	308	2 013
Stockage intermédiaire et/ou au sein de l'usine (€)	198	518	198	518
Amortissement de la technologie (€)	2 096	2 096	2 096	2 096
Coût dû au transport et à l'implantation de la technologie (€/an)	-	-	5 000	5 000
Salaire pour le fonctionnement (€/an)	15 150	15 150	15 150	15 150
Coût de revient (€/kWh)	0,091	0,087	0,117	0,104
Coût de revient (FCFA/kWh)	60	57	77	68

Le Tableau 24 montre que le coût de revient diffère du type de résidu et de l'origine de la technologie de conversion. En effet, le coût de revient du gaz issu des balles de riz est légèrement supérieur à celui des tiges de cotonnier. Cette différence est due aux caractéristiques spécifiques telles que le pouvoir calorifique et la teneur en humidité de chaque résidu qui peuvent affecter le processus de gazéification. Il est en accord avec les résultats obtenus lors de l'évaluation du palmier à huile comme source d'énergie en Malaisie (Kheang Loh 2017). Par ailleurs, l'analyse basée sur l'origine de la technologie montre qu'avec une technologie fabriquée localement, le coût de revient est relativement plus faible, soit 0,09 €/kWh de gaz issu de balles de riz par rapport à celui obtenu avec l'hypothèse appliquant une technologie importée (environ 0,12 €/kWh). Le même résultat est observé pour les tiges de cotonnier, soit respectivement 0,09 et 0,10 €/kWh, en considérant un gazogène local et un, importé. Cette situation peut s'expliquer par l'absence des dépenses liées au transport et à l'implantation pour un gazogène fabriqué localement.

Le coût lié à l'acquisition de la technologie étant le poste le plus élevé, il pourrait être réduit en mettant en œuvre et en améliorant les technologies locales. Pour optimiser la marge tout en maintenant un prix compétitif par rapport à la concurrence, qui est le prix du gaz butane, une analyse basée sur la détermination de la valeur de la subvention a été réalisée (Tableau 25).

Tableau 25 : Comparaison du prix de revient du kWh de différentes sources d'énergie en fonction des options subventionnées et non subventionnées

Désignation	Sans subvention	Avec subvention	Valeur de la subvention existante ou souhaitée*	Proportion de subvention souhaitée (%)
Coût de revient du gaz butane (€/kWh)	0,097	0,051	0,046	52,38
Technologie locale				
Coût de revient du gaz issu des balles de riz (€/kWh)	0,091	-	0,040	44,14
Coût de revient du gaz issu des tiges de cotonnier (€/kWh)	0,087	-	0,036	41,66
Technologie importée				
Coût de revient du gaz issu des balles de riz (€/kWh)	0,117		0,066	56,42
Coût de revient du gaz issu des tiges de cotonnier (€/kWh)	0,107		0,056	52,45

*= La subvention souhaitée pour un coût du kWh issu des résidus agricoles au plus égal au coût du kWh de gaz butane sur le marché local (avec subvention)

De l'analyse du Tableau 25, la biomasse agricole est une source d'énergie économiquement intéressante par rapport au gaz butane dans le cas d'une technologie fabriquée localement avec une proportion de subvention d'environ 40 %, quels que soient le résidu. Par contre, une technologie importée est moins compétitive que le gaz butane surtout lorsqu'elle est appliquée à des balles de riz. Le

gaz butane étant importé, il peut être avantageux pour le pays de promouvoir l'utilisation des tiges de cotonnier comme source d'énergie. La valorisation des tiges avec une technologie fabriquée localement, pourrait créer des emplois au niveau local conformément aux résultats de Chidikofan (2017). Même avec des politiques d'exonération des taxes d'importation de l'équipement comme pour la filière photovoltaïque, le prix du kWh serait toujours moins compétitif car le coût initial de la technologie est non seulement très élevé mais aussi elle nécessite une main d'œuvre qualifiée impliquant des coûts importants. D'autant plus pour des applications à des fins de production d'électricité, le prix du kWh par gazéification demeurerait non compétitif avec celui obtenu issu des combustibles fossiles. D'autres charges s'ajoutent inévitablement comme le coût d'achat du moteur pour la conversion du syngas en électricité.

4.4.6. Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité est basée sur une variation des coûts de revient de l'achat des tiges et du transport de plus ou moins 30 % ; 60 % et 80 %. Les différentes variations sont censées représenter à la fois les changements dans les connaissances implicites de la valeur des tiges de cotonnier et la possibilité d'un changement découlant par exemple de l'amélioration des conditions pluviométriques et des pratiques agricoles, des politiques incitatives de la valorisation des résidus agricoles et des variations du prix des hydrocarbures. L'effet des changements de paramètres a été examiné par rapport aux coûts de revient relatifs à la cession des tiges. Les poids des autres activités varient inversement par rapport au coût de la biomasse. Une augmentation des coûts de la biomasse tend à réduire le poids des autres activités dans le coût de revient global et vice versa. Cependant, le changement du poids du coût de transport entraîne un fort changement du poids du coût de collecte de la biomasse. La part des autres activités varie faiblement (Figure 31).

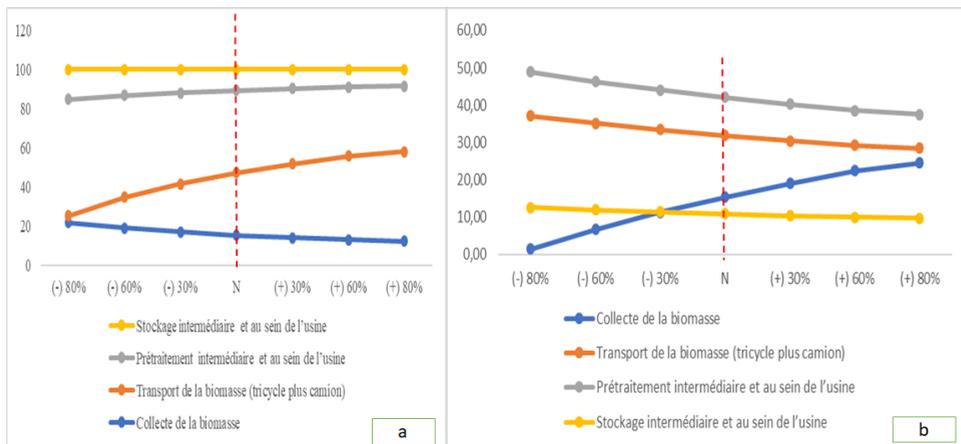


Figure 31 : Variation des coûts de revient : a) d'acquisition des tiges de cotonnier et b) du transport des tiges de cotonnier

4.5. Conclusion partielle

Le chapitre 4 a permis de mieux appréhender l'organisation de la logistique entrante pour la gazéification et la faisabilité technico-économique de la filière, à travers une approche chaîne de valeur. Il ressort de l'analyse organisationnelle, une cartographie de la chaîne de valeur formée de trois principales fonctions à savoir l'approvisionnement dont la collecte, le prétraitement, l'acquisition, le stockage et le transport des résidus agricoles ; la valorisation ou la transformation des résidus et l'utilisation énergétique. Les acteurs assurant plusieurs fonctions à la fois, les catégories d'acteurs rencontrées sont des collecteurs/transporteurs de biomasse, des transporteurs/transformateurs de biomasse, des transformateurs, des transformateurs/utilisateurs et des utilisateurs.

Le potentiel durable et accessible des résidus agricoles pouvant être convertis en énergie a également été analysé. Le potentiel théorique des résidus agricoles s'élève à environ 8 millions de tonnes pour l'année 2018. Les résidus les plus disponibles au niveau national proviennent de la culture du maïs et du sorgho dépendant des conditions agro-climatiques de la zone et des paquets technologiques utilisés. La planification d'une usine de gazéification doit tenir compte des ressources disponibles et de leurs utilisations concurrentes. Ce travail a démontré que les résidus sont utilisés prioritairement dans l'alimentation du bétail, la fertilisation des sols et la consommation d'énergie des ménages, limitant la quantité de biomasse disponible pour l'énergie. La fréquence d'utilisation des résidus des tiges de sorgho, de maïs, des rafles de maïs et des coques d'arachide est plus importante que celle des tiges de cotonnier et des balles de riz. Ces derniers résidus peuvent être valorisés avec une quantité totale nationale d'environ 730 000 tonnes en 2018, équivalent à environ 300 000 Tep. La part importante de ces résidus est concentrée dans les zones de forte production agricole comme les régions des Hauts-Bassins et de la Boucle du Mouhoun avec une densité moyenne d'au moins 100 tonnes par km². La valorisation de ces résidus par une application de la technologie de gazéification peut faciliter leur transformation. Toutefois, les tiges de cotonnier sont dispersées dans les champs rendant souvent difficile sa mobilisation vers une quelconque centrale de gazéification dont la rentabilité dépendra des coûts totaux de production.

L'analyse financière révèle que l'activité critique en amont de la chaîne de production d'énergie par gazéification de biomasse est l'acquisition des tiges de cotonnier. Le coût d'acquisition des résidus est largement au-dessus des coûts des autres activités comme le transport, le prétraitement et le stockage excepté si un mécanisme de compensation de la fourniture des tiges contre la restitution des cendres peut être négocié avec les producteurs. De l'analyse basée sur l'ensemble des résidus mobilisables en aval de la chaîne, il est ressorti que le coût de revient varie en fonction du type de résidu mais aussi de l'origine de la technologie de conversion. En effet, le coût de revient du gaz issu des balles de riz est relativement plus important que celui issu des tiges de cotonnier. Pour chaque type de résidu, une technologie fabriquée localement est plus compétitive sur le marché local qu'avec une technologie importée. Elle fournit un gain en subvention d'environ 10 % comparativement au gaz butane qui est subventionné par l'Etat à hauteur de 52,38 %.

5

Discussion générale

Chapitre 5: Discussion générale

Dans ce chapitre, les réponses aux questions de recherches posées dans la problématique de la thèse ont été abordées en vue d'étudier les conditions de développement de la technologie de gazéification de biomasse agricole dans le contexte du Burkina Faso. En effet, trois questions spécifiques de recherche ont fait l'objet d'investigations à savoir :

- quels sont les déterminants clés susceptibles d'expliquer le blocage de l'adoption de la gazéification au Burkina Faso ?
- La disponibilité des résidus est-elle un facteur bloquant l'adoption de la technologie de gazéification ?
- Le syngas issu de ces résidus est-il compétitif avec le marché local ?

En guise de synthèse des différents résultats, plusieurs barrières ont contribué au non-déploiement de la gazéification au Burkina Faso. L'application de la méthode AHP a montré que les barrières les plus importantes sont d'ordre socioculturel et organisationnel, et écologique et géographique. Une analyse plus approfondie de ces barrières avec la triangulation des données de terrain a montré que la disponibilité de la biomasse est une barrière qui nécessite plus d'investigations dans le développement de la gazéification au Burkina Faso, tout comme les pays en développement en vue de faire face au déficit énergétique. Ainsi, la recherche a également montré à travers la quantification des résidus agricoles à l'échelle nationale, que le gisement mobilisable en biomasse agricole est d'environ 730 000 tonnes, constitué de tiges de cotonnier et de balles de riz avec un contenu énergétique potentiel d'environ 300 000 Tep. Pour une transformation avec l'application d'une technologie de gazéification donnée, le coût de revient de la mobilisation d'une tonne de tiges de cotonnier est de 65 416 (environ 100 €) et de 155 416 FCFA (237 €) respectivement pour une collecte des tiges dans le champ et pour un achat sur les marchés locaux. Quant à la production du syngas, le coût de revient d'un kWh produit varie d'environ 0,09 à 0,12 € selon l'origine de la technologie et le type de résidus agricole utilisé.

5.1. Soutenabilité de la gazéification

Concernant les barrières clés identifiées, le benchmarking réalisé sur la pyrolyse qui s'apparente à la gazéification, a révélé que ces barrières sont, à l'inverse, les moteurs de succès de la pyrolyse. Elle a connu un succès grâce à ses attributs intrinsèques. Ces attributs sont entre autres l'avantage comparatif, la compatibilité, la complexité, l'adaptabilité et l'observation. La réussite de la pyrolyse serait inspirée de l'échec de la gazéification. Elle a été adoptée grâce à son coût initial, relativement faible et le temps de retour sur investissement court de trois mois. De plus, la disponibilité des informations sur son fonctionnement et sa gestion, la formation et l'encadrement des utilisateurs, la disponibilité et l'accessibilité des pièces de rechange, l'implication des acteurs dans la conception du projet ont également été des moteurs du succès de la pyrolyse. Par ailleurs, la fiabilité avérée de la pyrolyse pilote et la facilité d'accès à la biomasse dans un circuit court ont guidé l'implantation d'autres projets pyrolyses. En effet, les usages actuels des

coques de noix de cajou n'arrivent pas à absorber les quantités disponibles qui sont de 7 000 tonnes en 2019 selon l'ONG Nitidae.

Le succès de la pyrolyse a donc permis de mieux identifier les principales barrières au déploiement de la gazéification. Sansaniwal et al. (2017), ont trouvé des barrières similaires, bien qu'ils aient peu insisté sur leur hiérarchisation, comme l'exige la méthode AHP. Les manuels d'utilisation de la gazéification portant essentiellement sur la description de la biomasse, des techniques de transformation et des paramètres de fonctionnement, ne sont pas disponibles dans une langue compréhensible par les utilisateurs. De plus, ces utilisateurs ne sont pas formés à l'utilisation des équipements, et les informations sur les spécifications des produits, les coûts de maintenance et les coûts technologiques ne sont toujours pas disponibles.

Hormis ces barrières, le Gouvernement s'est très peu impliqué dans la diffusion de la technologie. En effet, il n'existe aucune politique dédiée au soutien de la gazéification (SE4ALL, 2014 ; START, 2021). En revanche, la question de soutien politique à l'utilisation de la gazéification de la biomasse est capitale pour son adoption conformément aux résultats des plusieurs études (Thomson et al., 2020 ; Dimitriou et al., 2018 ; Sansaniwal et al., 2017). L'instabilité des prix des sources d'énergie fossile peut affecter le contrôle de la tarification des facteurs de production d'énergie. Si la dimension politique a été démontrée comme étant le levier du déploiement de la gazéification dans certains pays comme la Chine et l'Inde, elle est souvent incitative à la hausse du coût de la biomasse, et par conséquent au coût de production de l'énergie (Dasappa et al., 2011 ; Chang et al., 2016 ; Narnaware & Panwar, 2022). Cela est conforme aux résultats obtenus en Amérique latine, où malgré des politiques favorables au développement des énergies renouvelables, la gazéification a eu peu de succès. Les projets de gazéification devraient commencer avec un accompagnement du Gouvernement afin de lever les verrous informationnels de la technologie et de faciliter son acceptabilité. Le succès d'une innovation est obtenu par la combinaison de plusieurs paquets technologiques sociaux, économiques, organisationnels, comme ce fut le cas pour la pyrolyse, où en plus des avantages économiques de la production de chaleur, les sous-produits, principalement le charbon, sont utilisés comme combustible par les femmes employées dans les industries concernées.

5.2. Disponibilité des résidus agricoles

En considérant comme référence, l'année 2018, le potentiel théorique est d'environ 8 millions de tonnes. Ce potentiel théorique provient essentiellement de la culture du maïs et du sorgho avec une contribution globale d'environ 90 %. Cependant, cette quantité est revue en baisse en prenant en compte la notion de durabilité. Les utilisations concurrentes, telles que l'élevage, la fertilisation des sols ou la consommation d'énergie des ménages, ont réduit la quantité de biomasse disponible pour la bioénergie, comme le montrent les résultats obtenus en Bolivie où seul 43 % du potentiel théorique peut produire de l'énergie (Morato et al., 2019). En considérant ces paramètres, tous les résidus de culture tels que les tiges et les épis de maïs, les tiges de sorgho, les coques d'arachide sont destinés à d'autres usages.

Seules les tiges de cotonnier et une partie des balles de riz peuvent être valorisées énergétiquement au Burkina Faso. Elles sont constituées des minéraux et des oxydes métalliques, difficiles à éliminer pouvant polluer l'environnement. Le recyclage de ces résidus leur confère une valeur bénéfique comme le soulignent plusieurs études (Abdullah et al., 2020 ; Naqvia et al., 2019 ; Ashraf et al., 2019). L'utilisation à grande échelle de ces ressources de biomasse agricole pourrait contribuer à améliorer la situation énergétique des agro-industries au Burkina Faso en réduisant la dépendance aux interconnexions.

5.3. Compétitivité de la chaîne de production du syngas

Le développement de la production d'énergie à partir des combustibles fossiles, les industries ont utilisé des processus centralisés à grande échelle pour atteindre les avantages économiques d'échelle et des systèmes de transport, de distribution et de stockage efficaces à grande échelle pour les matières premières. Ces facteurs ont abouti à un véritable développement à faible coût. Cela est encore facilité par la haute intensité énergétique de la matière première. Cependant, l'approche pour assurer un développement est opposé pour la biomasse agricole car elle est caractérisée par un faible contenu énergétique, une teneur en humidité relativement élevée et une répartition spatiale plus dispersée. Ainsi, les coûts de cession et de transport peuvent être excessifs et nécessiter une ou plusieurs étapes de prétraitement pour réduire les coûts, le nombre de voyages et la distance totale à parcourir conformément aux résultats des travaux de Singh et al. (2017) ; Ko et al. (2019) et Thomson et al. (2020). Par conséquent, le développement de la conversion de la biomasse s'établit sur la capacité de générer un produit à un prix compétitif sur le marché.

L'analyse de la chaîne de valeur de la production d'énergie à partir de la biomasse agricole mobilisable dans le contexte du Burkina Faso a permis de mieux cerner l'organisation et le fonctionnement des parties prenantes qui étaient impliquées dans le processus de gazéification. Ainsi, la faiblesse de la filière de production d'énergie par gazéification réside dans les frais d'investissement lié à l'acquisition de la technologie qui ressortent très élevés. Le coût de la biomasse représente l'une des conditions essentielles à la rentabilité de la gazéification conformément aux résultats de Zhou et al. (2012). La nécessité d'un capital important, d'un savoir-faire et d'une bonne expérience est alors requise pour la fabrication, la maintenance et le fonctionnement de la technologie. Cette faiblesse s'associe également à des risques de non-sûreté de marché pour le syngas, et une concurrence accrue avec la politique de promotion de l'entrepreneuriat qui pourrait donner naissance à d'autres secteurs de valorisation comme des fermes avicoles et la promotion d'électrification rurale et de l'énergie solaire. En revanche, la production de syngas à l'échelle industrielle doit encore générer des coûts plus compétitifs avec les combustibles fossiles et les autres énergies renouvelables pour se positionner sur le marché de l'énergie (Thomson et al., 2020). L'analyse financière effectuée dans cette étude a porté sur les deux types de biomasses disponibles à l'issue de l'évaluation du potentiel à savoir les balles de riz et les tiges de cotonnier.

Concernant les tiges de cotonniers, l'analyse a montré que l'activité critique est la collecte des tiges de cotonnier comparativement aux autres activités comme le

transport, le prétraitement et le stockage. Cette situation peut être liée à la dispersion de la ressource, aux mauvaises récoltes déterminées par divers paramètres pédoclimatiques et l'existence d'un marché potentiel. Pourtant de nombreuses études ont démontré que le transport et le prétraitement sont les activités essentielles de la chaîne, surtout en cas d'une mobilisation de la biomasse depuis des emplacements dispersés vers une unité centralisée, entraînant des coûts de transport exorbitants et sensibles à la fluctuation du prix du pétrole conformément (Batidzirai et al., 2016).

L'analyse des résultats sur les coûts de revient de production d'énergie par rapport à la situation des énergies renouvelables montre une situation contradictoire. D'un côté, il y a une hypothétique promotion des énergies renouvelables en vue de limiter l'usage des énergies fossiles ainsi que du bois qui posent un problème de durabilité contre une autre situation de marché dans laquelle la mobilisation des résidus agricoles n'est pas compétitive. Ces résultats mitigés sont en conformité avec ceux des travaux antérieurs (Ahn, Chu, and Lee, 2021 ; Fang, 2011). Ces études ont montré que l'augmentation de la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique diminue le bien-être social en termes de croissance économique à long terme. Le coût plus élevé de l'approvisionnement en énergie renouvelable par rapport à l'énergie fossile entraîne les effets néfastes de l'utilisation des énergies renouvelables sur le bien-être social. Cet effet négatif se produit parce que l'effet négatif de la réduction du rapport coût-efficacité l'emporte sur l'effet positif de la diminution des dommages climatiques sur le bien-être social. De plus, une incertitude accrue en matière de politique conduit à une plus grande incertitude sur le rendement du capital, ce qui pousse les agents rationnels à différer leur investissement. Ceci interpelle les décideurs politiques à mener des actions visant à contrôler le prix de la biomasse, par une organisation des acteurs de la chaîne et une mise en réseautage de ces acteurs avec des structures de soutien à la mobilisation de la biomasse comme la SOFITEX pour le cas des tiges de cotonnier et l'UNERIZ pour l'approvisionnement en balles de riz. Le développement de la filière de gazéification des résidus agricoles au Burkina Faso serait possible en trouvant le moyen d'intéresser les producteurs.

5.4. Quel avenir pour la gazéification au Burkina Faso ?

Au regard des résultats obtenus, la gazéification est une technologie complexe, non encore maîtrisée et moins compétitive que d'autres technologies comme la pyrolyse. Malgré la connaissance des différentes barrières, le gazogène conçu localement et expérimenté dans le cadre de ce projet PRD a rencontré des défaillances opérationnelles ayant entraîné des pertes thermiques et de faible rendement en syngas (Zoungrana, 2022). De plus, l'expérimentation du moteur thermique utilisant le syngas pour produire de l'électricité a connu d'énormes difficultés de calibrage du dispositif. Ce qui démontre le besoin en main d'œuvre qualifiée pour la conception du système, le fonctionnement et la maintenance de l'équipement. La gazéification n'est alors pas une solution adaptée pour produire de l'énergie dans le contexte actuel du Burkina Faso.

À cette ère de promotion d'autonomisation financière des pays et d'indépendance face à l'utilisation des hydrocarbures, les technologies de pyrolyse et de biodigesteurs qui sont à un stade assez avancé, conviendront mieux à la production de l'énergie pour les industries de transformation agroalimentaire du pays qui n'ont pas une bonne autonomie financière. De plus, le contexte sécuritaire actuel du pays limite les actions du Gouvernement au profit de la valorisation des ressources énergétiques locales. La plupart des zones de forte production de la biomasse est occupée par des groupes armés. Le budget de l'Etat est distribué prioritairement à l'éducation (30,09 %), à la défense et sécurité (20,27 %), la santé (13,89 %). Le secteur de l'énergie bénéficie d'une allocation budgétaire relativement faible de 1,79 % (MEMC, 2020). Néanmoins, il est important de faire preuve de prudence avant de tirer des conclusions fermes à partir de peu de cas d'études et de la phase d'essai de la technologie de gazéification. Malgré l'existence des programmes de soutien dans certains pays comme la Chine et l'Inde, il a été démontré que la gazéification n'est viable qu'après plusieurs recherches de long terme. Les recherches doivent donc être menées davantage en vue de soutenir le déploiement de la gazéification dans le contexte du Burkina Faso. D'autres barrières restent à prendre en compte pour le développement de la filière comme la gestion des sous-produits de la gazéification tels que les cendres, les goudrons et les eaux usées.

À propos de la méthodologie utilisée dans cette recherche, elle n'est pas dépourvue de biais compte tenu du contexte de défaillance des gazogènes installés. Il a été difficile de retrouver les acteurs de la gazéification, parfois découragés. La méthodologie a permis d'identifier les barrières clés d'adoption de la gazéification et les emplacements qui génèrent le plus de résidus agricoles. En revanche, les approches utilisées pour les analyses présentent des insuffisances qui pourraient être considérées dans des futures recherches. L'approche AHP a des limites liées à la nature subjective du processus de modélisation. Les matrices de comparaison par paire ont été construites sur la base des opinions d'experts en énergie et en gazéification. Ces opinions sont liées aux antécédents de l'expert. Elles peuvent donc être biaisées. D'autres méthodes telles que les méthodes ELECTRE peuvent être combinées à AHP afin d'intégrer des données quantitatives telles que le coût de la biomasse et de la technologie. Cette recherche a par ailleurs fourni le potentiel bioénergétique national sans examiner la répartition parcellaire des ressources en biomasse. Cette répartition, utilisant des approches de pointe comme les satellites SENTINEL pourrait permettre de disponibiliser d'une base de données de la production agricole et des superficies emblavées à des échelles de : communes voire de villages. En plus, l'emplacement d'une installation nécessite l'analyse de contraintes sociales, environnementales et économiques.

Conclusion générale

La présente thèse a visé globalement à analyser les conditions de développement de la filière de gazéification de biomasse dans le contexte du Burkina Faso. De manière spécifique, elle a abordé d'abord l'identification des barrières clés d'adoption de la technologie, ensuite l'analyse de l'accessibilité de la biomasse agricole, et enfin celle de la chaîne de valeur production d'énergie par gazéification de biomasse agricole. À l'issue de cette recherche, les résultats obtenus ont été organisés en chapitres après une partie introductive qui a permis de situer le contexte ayant justifié le sujet de la thèse, les objectifs, les hypothèses et la problématique de recherche. Ainsi, le contexte de déficit énergétique du Burkina Faso impliquant le recours à la bioénergie a d'abord été développé. La problématique de l'utilisation des technologies de conversion de la biomasse modernes a ensuite été révélée en mettant en exergue l'intérêt d'utiliser la gazéification pour la valorisation énergétique de la biomasse et le non-déploiement de la technologie en vue de justifier le positionnement scientifique de la thèse.

Le premier chapitre a exploré les concepts et le cadre théorique en lien avec les thématiques de la thèse. Du point de vue conceptuel, la notion de biomasse et ses différentes voies de valorisation ont été décrites. Par ailleurs, l'état de l'art a relevé les gaps à combler à savoir la non-disponibilité des données sur les quantités de biomasse et les barrières d'adoption de la gazéification ne sont que génériquement décrites. Du point de vue théorique, les méthodes d'analyse potentielles de cette problématique ont été largement développées en vue de retenir celles qui sont appropriées pour l'atteinte des objectifs de recherche fixés. Ainsi, la théorie de la sociologie de la traduction a servi de cadre d'analyse des jeux d'acteurs lors du processus d'installation de la gazéification au Burkina Faso. Une analyse plus approfondie a été réalisée à l'aide de la méthode AHP afin de déterminer par ordre d'importance les barrières de développement de la technologie étudiée. La méthode d'analyse statistique est la plus adaptée pour la quantification de la biomasse. L'approche chaîne de valeur a été appliquée pour l'analyse organisationnelle et fonctionnelle de la filière. En plus, des simulations basées sur des hypothèses de calcul du coût de revient ont permis d'analyser la faisabilité technico-économique de la chaîne de valeur de production d'énergie par gazéification.

Le deuxième chapitre portant sur la méthodologie de recherche a d'abord présenté la justification du choix de la zone d'étude et les techniques de collecte des données avant de détailler ces méthodes retenues. Les sites de recherche diffèrent pour chaque objectif de recherche. Les données sont obtenues à l'aide de l'exploitation des statistiques agricoles et des entretiens auprès des parties prenantes des filières de gazéification et de pyrolyse (producteurs agricoles, responsables d'huilerie, des transformateurs de riz, de mangues, d'anacarde, des experts en charge de l'énergie, des agents techniques d'agriculture et des correspondants coton). Cette démarche a d'abord porté sur la sélection des sites de la recherche, la collecte des données auprès des transformateurs (trices) de riz paddy, des mangues, de l'anacarde, utilisateurs des technologies de gazéification et de pyrolyse, des agents et des experts en charge de l'énergie, des producteurs agricoles, des agents techniques d'agriculture, et des correspondants coton.

Le troisième chapitre a relevé au total 27 barrières pouvant bloquer le déploiement de la gazéification de biomasse sur la base des entretiens réalisés sur le terrain formant 2 dimensions et 5 catégories en utilisant la méthode AHP. Les barrières d'ordre socioculturel et organisationnel, et d'ordre écologique et géographique ont été identifiées comme les principaux déterminants de l'adoption de la gazéification de biomasse. Ces barrières requièrent plus d'attention pour la mise en œuvre de la technologie. L'adoption de toute technologie ou innovation peut être facilitée par une formation adéquate et une approche qui inclut toutes les parties prenantes. Les barrières internes, en particulier les barrières techniques, pourraient être réadaptés ou modifiés en fonction des besoins et des aspirations des utilisateurs.

En revanche, modifier l'environnement social de la gazéification, comme le comportement individuel ou collectif des parties prenantes, nécessite des années, voire des générations. La promotion de la technologie doit se faire en essayant d'imiter les cas de réussite. Une fois que ces barrières les plus pertinentes ont été éliminées, il y a de bonnes chances de supprimer les autres catégories d'obstacles susceptibles d'influencer l'adoption de la technologie de gazéification. Ainsi, la première hypothèse de recherche est confirmée. Toutefois ces résultats ont suscité des interrogations sur la manière de donner une valeur ajoutée aux sous-produits tels que les cendres laissées par la biomasse traitée visant à assurer le déploiement de la gazéification dans le contexte burkinabè.

Le quatrième chapitre a combiné les résultats sur la disponibilité de la biomasse et l'analyse de la chaîne de valeur de production de syngas. Ainsi, une analyse statistique a permis de démontrer qu'il existe un réel potentiel en biomasse mobilisable pouvant couvrir plus de 50 % des besoins énergétiques du Burkina Faso provenant de la culture du coton et du riz mais très dispersé dans l'espace. Le potentiel théorique des résidus agricoles s'élève à environ 8 millions de tonnes pour l'année 2018 avec une importante contribution des résidus issus de la culture du maïs et du sorgho. La disponibilité théorique dépend de plusieurs paramètres tels les conditions pédoclimatiques, les savoirs et pratiques culturels, les paquets culturels utilisés, leurs utilisations concurrentielles. Les usages compétitifs comme l'utilisation des résidus dans l'élevage, la fertilisation des sols et la consommation d'énergie des ménages, peuvent réduire la quantité de biomasse disponible pour l'énergie. L'ensemble des résidus de culture tels que les tiges et les épis de maïs, les tiges de sorgho, les coques d'arachide sont destinés à ces différents usages. Seules les tiges de cotonnier et une partie des balles de riz peuvent être valorisées avec un potentiel mobilisable d'environ 730 000 tonnes. Cependant, les différents résidus sont très dispersés dans l'espace rendant complexe leur mobilisation vers des potentiels centres de valorisations. Ces résultats confirment la deuxième hypothèse. L'analyse de la chaîne de valeur réalisée en amont et aval de la chaîne de production du syngas a montré un coût de revient d'une tonne de biomasse n'est viable qu'avec l'acquisition de la biomasse dans les champs et le syngas issu des résidus mobilisables est compétitive avec le marché du gaz butane en considérant une technologie fabriquée localement. La troisième hypothèse est partiellement confirmée car le développement de la gazéification nécessite l'implication de plusieurs parties prenantes et des coûts abordables de la biomasse et de la

technologie que les dépenses dues aux moyens de transport, de prétraitement et de stockage.

Les résultats obtenus intéresseront à la fois les coordinateurs de projets de développement, les chercheurs, le gouvernement et l'industrie. L'approche utilisée aidera donc les décideurs à prendre en compte les barrières mises en évidence dans leur processus de décision pour la mise en œuvre de la gazéification en créant par exemple un centre de formation qui fournira une ressource humaine qualifiée dans le domaine de conception, d'entretien et de maintenance de la gazéification, de la valorisation de la biomasse. L'approche peut également être étendue à l'adoption des énergies renouvelables dans le contexte africain. La méthode AHP est l'une des méthodes de prise de décision multicritères les plus populaires et les plus utilisées. Son approche est adaptée à de nombreux problèmes de prise de décision. Dans cette recherche, elle a été utilisée pour identifier les principales barrières au déploiement de la gazéification. L'utilisation des résidus agricoles mobilisables pourrait contribuer à la revitalisation du secteur de la gazéification, et à améliorer l'environnement et la situation énergétique des agro-industries au Burkina Faso. Cependant, les décideurs doivent agir en planifiant et en élaborant des politiques à court et long terme pour produire plus d'énergie en utilisant les ressources de biomasse résiduelles afin de réduire la crise énergétique dans le pays.

Les résultats obtenus dans le cadre de cette thèse pourraient être améliorés à travers les actions suivantes :

- la détermination de l'emplacement optimal des potentiels gazogènes à installer dans les zones de forte production de la biomasse mobilisable.
- L'évaluation de la valeur agronomique, de la rentabilité économique et de l'impact environnemental des sous-produits issus de la gazéification des résidus agricoles.
- La formulation d'une chaîne de valeur complète de la bioénergie prenant en compte toutes les technologies de valorisation de la biomasse.

Références bibliographiques

- Abatzoglou, Nick, Nick Barker, Philipp Hasler, and Harrie Knoef. 2000. "The Development of a Draft Protocol for the Sampling and Analysis of Particulate and Organic Contaminants in the Gas from Small Biomass Gasifiers." *Biomass and Bioenergy* 18(1):5–17.
- Abazajian, A. 2018. "Technical and Economic Challenges of Biomass and Waste to Syngas Feedstock, Process and Product Selection." in *Global syngas technology conference*. Colorado Springs, CO.No.
- Abdullah, Aisha, Ashfaq Ahmed, Parveen Akhter, Abdul Razzaq, Murid Hussain, Nazia Hossain, Muhammad Saifullah Abu Bakar, Shahzad Khurram, Khaliq Majeed, and Young Kwon Park. 2020. "Potential for Sustainable Utilisation of Agricultural Residues for Bioenergy Production in Pakistan: An Overview." *Journal of Cleaner Production* (xxxx):125047.
- Agbo, Emmanuel P., Collins O. Edet, Thomas O. Magu, Armstrong O. Njok, Chris M. Ekpo, and Hitler Louis. 2021. "Solar Energy: A Panacea for the Electricity Generation Crisis in Nigeria." *Heliyon* 7(e07016):21.
- Agrebi, Maroi. 2018. "Méthodes d'aide à La Décision Multi-Attribut et Multi-Acteur Pour Résoudre Le Problème de Sélection Dans Un Environnement Certain/Incertain : Cas de La Localisation Des Centres de Distribution." Thèse de doctorat, Université Polytechnique Hauts-de-France et l'Université de Sfax Spécialité : Informatique.
- Ahn, Kwangwon, Zhuang Chu, and Daeyong Lee. 2021. "Effects of Renewable Energy Use in the Energy Mix on Social Welfare." *Energy Economics* 96:19.
- Akbi, Amine. 2017. "Les Politiques de Soutien Aux Biocarburants. Cahier de Recherche N° 17.04.117." 46.
- Akrich, Madeleine. 1989. "La Construction d'un Système Socio-Technique : Esquisse Pour Une Anthropologie Des Techniques." *Anthropologie et Sociétés* 13(2):31–54.
- Aksoy, B., H. Cullinan, D. Webster, K. Gue, S. Sukumaran, M. Eden, and N. Jr. Sammons. 2011. "Woody Biomass and Mill Waste Utilization Opportunities in Alabama: Transportation Cost Mini- Mization, Optimum Facility Location, Economic Feasibility, and Impact." *Environmental Progress & Sustainable Energy* 30(4):720–32.
- Alauddin, Zainal Alimuddin Bin Zainal, Pooya Lahijani, Maedeh Mohammadi, and Abdul Rahman Mohamed. 2010. "Gasification of Lignocellulosic Biomass in Fluidized Beds for Renewable Energy Development: A Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14(9):2852–62.
- Albadvi, A., S. K. Chaharsooghi, and A. Esfahanipour. 2007. "Decision Making in Stock Trading : An Application of PROMETHEE." *European Journal of Operational Research* 177(2):673–683.
- Algieri, Angelo, Serafina Andiloro, Vincenzo Tamburino, and Demetrio Antonio

- Zema. 2019. "The Potential of Agricultural Residues for Energy Production in Calabria (Southern Italy)." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 104(December 2017):1–14.
- Amie Assouh, Antoine, José Carré, Jérôme Delcarte, Frédéric Douard, Philippe Girard, Ludovic Lacrosse, Didier Marchal, Joseph Martin, Alfredo Napoli, Arthur Riedacker, Daniel Rolot, Yves Ryckmans, Yves Schenkel, Michaël Temmerman, and Marc Wauthélet. 2005. *Guide Biomasse Énergie*. 2e édition. Gembloux, Belgique: Organisation Internationale de la Francophonie.
- An, H., WE Wilhelm, and SW Searcy. 2011. "Biofuel and Petroleum-Based Fuel Supply Chain Research: A Literature Review." *Biomass and Bioenergy* 35:3763–74.
- An, H, WE Wilhelm, and SW Searcy. 2011. "A Mathematical Model to Design a Lignocellulosic Biofuel Supply Chain System with a Case Study Based on a Region in Central Texas. 2011." *Bioresource Technology* 102:7860–70.
- Antar, Mohammed, Dongmei Lyu, Mahtab Nazari, Ateeq Shah, Xiaomin Zhou, and Donald L. Smith. 2021. "Biomass for a Sustainable Bioeconomy: An Overview of World Biomass Production and Utilization." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 139(April 2020):110691.
- Antonini, Gérard, and Mourad Hazi. 2004. "Pyrolyse–Gazéification de Déchets Solides." *Procedis* 0–130.
- Asadullah, Mohammad. 2014. "Barriers of Commercial Power Generation Using Biomass Gasification Gas : A Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 29:201–15.
- ASE. 2017. *Evaluation Finale Pour La Capitalisation Des Resultats Du Projet Gazoriz : Amélioration de La Production de Riz Étuvé à Bama Par Gazéification de Balles de Riz*. Burkina Faso.
- Ashraf, Asma, Sattar Hamed, and Munir Shahid. 2019. "Thermal Decomposition Study and Pyrolysis Kinetics of Coal and Agricultural Residues under Non-Isothermal Conditions." *Fuel* 235:504–14.
- Atarodi, S., A. M. Berardi, and A. M. Toniolo. 2019. "The Technology Acceptance Model since 1986: 30 Years of Development." *Psychologie Du Travail et Des Organisations* 25(3):191–207.
- Audouin, Sarah, and Laurent Gazull. 2015. *Disponibilité Des Ressources En Biomasse et Possibilités d'approvisionnement Des Centres de Songhaï*. Bénin.
- Ayamga, Ezekiel Anabire, Francis Kemausuor, and Ahmad Addo. 2015. "Technical Analysis of Crop Residue Biomass Energy in an Agricultural Region of Ghana." *Resources, Conservation and Recycling* 96:51–60.
- Baba, Yasutsugu, Andante Hadi Pandyaswargo, and Hiroshi Onoda. 2020. "An Analysis of the Current Status of Woody Biomass Gasification Power Generation in Japan." *Energies* 13(4903):1–13.

- Balaman, SY, and H. Selim. 2014. "A Fuzzy Multiobjective Linear Programming Model for Design and Management of Anaerobic Digestion Based Bioenergy Supply Chains." *Energy* 74(C):928–40.
- Bambara, D., A. Bilgo, E. Hien, D. Masse, and A. Thiombiano. 2013. "Perceptions Paysannes Des Changements Climatiques et Leurs Conséquences Socio Environnementales à Tougou et Donsin, Climats Sahélien et Sahélo-Soudanien Du Burkina Faso." *Bulletin de La Recherche Agronomique Du Bénin (BRAB)* 16.
- Bambara, Dasmané, Adjima Thiombiano, and Hien Victor. 2016. "Changements Climatiques En Zones Nord-Soudanienne et Sub-Sahélienne Du Burkina Faso : Comparaison Entre Savoirs Paysans et Connaissances Scientifiques." *Revue d'Ecologie (Terre et Vie)* 71(1):35–58.
- Bambara, L. D. F. 2018. "Analyse et Optimisation de La Durabilité Des Systèmes de Production de Biocarburants Oléagineux En Afrique de l'Ouest." Institut International de l'Eau et de l'Environnement (2iE) et Université de Lorraine.
- Barry, Fanta, Marie Sawadogo, Maimouna Bologo, Igor W. K. Ouédraogo, and Thomas Dogot. 2021. "Key Barriers to the Adoption of Biomass Gasification in Burkina Faso." *Sustainability (Switzerland)* 13(13):1–14.
- Basser-Mens, Claudine, Hatem Belhouchette, Sophie Colvine, Guillaume Essecofy, Fatiha Fort, Michel Garrabé, Stéphane Georgé, Véronique Bail-Declerck, Didier Lenicol, Martine Padilla, David Page, Giulia Palma, and Sylvain Portal. 2014. "Promotion de Filières s'inscrivant Dans Le Développement Durable à Travers Un Outil d'aide à La Décision." 39.
- Basu, P. 2013. *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction. Practical Design and Theory*. Cambridge, MA, USA: Academic Press.
- Basu, Prabir. 2010. *Biomass Gasification and Pyrolysis : Practical Design and Theory*. Academic Press.
- Batidzirai, B., E. M. W. Smeets, and A. P. C. Faaij. 2012. "Harmonising Bioenergy Resource Potentials - Methodological Lessons from Review of State of the Art Bioenergy Potential Assessments." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16(9):6598–6630.
- Batidzirai, B., M. Valk, B. Wicke, M. Junginger, V. Daioglou, W. Euler, and A. P. C. Faaij. 2016. "Current and Future Technical, Economic and Environmental Feasibility of Maize and Wheat Residues Supply for Biomass Energy Application: Illustrated for South Africa." *Biomass and Bioenergy* 92:106–29.
- Bellón De La Cruz, Beatriz. 2018. "Une Approche Multiscale Par Télédétection Pour La Cartographie et La Caractérisation Des Systèmes Agricoles à l'échelle Régionale." Université de Montpellier.
- Bentsen, Niclas Scott, Claus Felby, and Bo Jellesmark Thorsen. 2014. "Agricultural Residue Production and Potentials for Energy and Materials Services." *Progress in Energy and Combustion Science* 40(1):59–73.
- Berahab, Rim. 2019. "Energies Renouvelables En Afrique : Enjeux, Défis et

- Opportunités.” *Policy Center for the New South* 1–36.
- Bhattacharya, Sribas C. 2003. “Commercialisation Options for Biomass Energy Technologies in ESCAP Countries.” *International Journal of Energy Technology and Policy* 1(4):363–99.
- Blair, M. J., B. Gagnon, A. Klain, and B. Kulišić. 2021. “Contribution of Biomass Supply Chains for Bioenergy to Sustainable Development Goals.” 10(181):1–28.
- Blanchard, Guilhem. 2017. “Quelle Traduction Des Stratégies Territoriales de Transition Énergétiques Dans Les Choix Opérationnels Des Projets d'aménagement? L'exemple de Bordeaux Saint-Jean Belcier.” *Développement Durable et Territoires* 8(Vol. 8, n°2):0–19.
- Boullier, Dominique. 2016. “Du Bon Usage d'une Critique Du Modèle Diffusionniste : Discussion- Prétexte Des Concepts de Everett M . Rogers.” *Réseaux* 7:31–51.
- Bourbonnais, Régis. 2015. *Econométrie: Cours et Exercices Corrigés*. 9e édition. edited by Dunod. Paris.
- Brans, P. J., Ph. Vincke, and B. Mareschal. 1986. “How to Select and How to Rank Projects: The Promethee Methods.” *European Journal of Operational Research* 24(2):228–38.
- Brew-Hammond, Abeeku, and Francis Kemausuor. 2008. *Guidebook on Modern Bioenergy Conversion Technologies in Africa*. Kumasi, Ghana.
- Bukari, Dramani, Francis Kemausuor, David A. Quansah, and Muyiwa S. Adaramola. 2021. “Towards Accelerating the Deployment of Decentralised Renewable Energy Mini-Grids in Ghana: Review and Analysis of Barriers.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 135(September 2020):110408.
- Caillet, Renaud. 2003. “Analyse Multicritère : Étude et Comparaison Des Méthodes Existantes En Vue d'une Application En Analyse de Cycle de Vie.” 52.
- Callon, M., and B. Latour. 1985. “Les Paradoxes de La Modernité. Comment Concevoir Les Innovations?” *Prospective et Santé* 35:13–25.
- Callon, Michel. 1986. *Éléments Pour Une Sociologie de La Traduction. La Domestication Des Coquilles Saint- Jacques et Des Marins-Pêcheurs Dans La Baie de Saint-Brieuc*. 36th ed. L'année sociologique.
- Catherine., Polac, and B. Latour. 1992. “Aramis Ou l'amour Des Techniques.” Pp. 170–73 in *Politix*. Vol. 7.
- Caupin, Vincent, and Claude Gravellini, Jean-Marc Périou. 2014. “L'action Des Bailleurs de Fonds Pour Soutenir Le Développement Financier En Afrique : Le Cas de l'agence Française de Développement.” *Revue d'économie Financière* 4(116):177–92.
- Chang, C. W., C. R. Wu, C. T. Lin, and H. C. Chen. 2007. “An Application of AHP and Sensitivity Analysis for Selecting the Best Slicing Machine.” *Computers & Industrial Engineering* 52:296–307.

- Chang, Q., S. Zhuo, J. Meng, S. Qin, and S. Yao. 2016. "Clean Coal Technologies in China: Current Status and Future Perspectives." *Engineering* 2((4)):447-459.
- Chao, Zhenhua, Ning Liu, Peidong Zhang, Tianyu Ying, and Kaihui Song. 2019. "Biomass and Bioenergy Estimation Methods Developing with Remote Sensing Information for Energy Crop Biomass: A Comparative Review." *Biomass and Bioenergy* 122(August 2018):414–25.
- Chen, CW, and Y. Fan. 2012. "Bioethanol Supply Chain System Planning under Supply and Demand Uncertainties." *Transportation Research Part E* 48:150–64.
- Chianu, J. N., and H. Tsujii. 2004. "Determinants of Farmers' Decision to Adopt or Not Adopt Inorganic Fertilizer in the Savannas of Northern Nigeria." *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 70(3):293–301.
- Chidikofan, Grâce F. 2017. "Développement Méthodologique Pour l'évaluation Des Performances et de La Durabilité de Systèmes de Production d'électricité Par Gazéification de Biomasse En Milieu Rural. Etude de Cas Au Burkina Faso." Thèse de Doctorat en Cotutelle entre l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE)/Energie, Ouagadougou et l'École Nationale Supérieur d'Arts et Metiers/Génie Energétique, Paris.
- Ciferno, Jared P., and John J. Marano. 2002. "Benchmarking Biomass Gasification Technologies for Fuels, Chemicals and Hydrogen Production." *U.S. Department of Energy*. (National Energy Technology Laboratory):58.
- Coopération Internationale et Développement - EuropeAid. 2018. "Note Méthodologique: Cadre et Outils." *Agrinatura* 20.
- Cox, A. 1999. "Power, Value and Supply Chain Management. Supply Chain Management:" *Supply Chain Management* 4(4):167–75.
- Dabat, Marie-Hélène, Frédéric Lancon, Ellen Hanak, and Pierre Fabre. 2010. "Manuel d'analyse Des Filières Agroalimentaires." 227.
- Das, Barun Kumar, and S. M. Najmul Hoque. 2014. "Assessment of the Potential of Biomass Gasification for Electricity Generation in Bangladesh." *Journal of Renewable Energy* 2014:11.
- Dasappa, S., D. N. Subbukrishna, K. C. Suresh, P. J. Paul, and G. S. Prabhu. 2011. "Energy for Sustainable Development Operational Experience on a Grid Connected 100 KWe Biomass Gasi Fi Cation Power Plant in Karnataka , India." *Energy for Sustainable Development* 15(3):231–39.
- Davis, F. D., R. P. Bagozzi, and P. R. Warshaw. 1989. "User Acceptance of Computer Technology: A Comparison Oftwo Theoretical Models." *Management Science* 35(8):982–1003.
- Davis, Fred D. 1989. "Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, and User Acceptance of Information Technology." *MIS Quarterly: Management Information Systems* 13(3):319–39.
- Diedhiou, Ansoumane, Lat-grand Ndiaye, Ammar Bensakhria, and Oumar Sock.

2019. "Thermochemical Conversion of Cashew Nut Shells , Palm Nut Shells and Peanut Shells Char with CO₂ and/or and/or Steam to Aliment a Clay Brick Fi Ring Unit." *Renewable Energy* 142:581–90.
- Dimitriou, Ioanna, Harry Goldingay, and Anthony V Bridgwater. 2018. "Techno-Economic and Uncertainty Analysis of Biomass to Liquid (BTL) Systems for Transport Fuel Production." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 88(December 2017):160–75.
- Dimpl, Elmar. 2011. "Small-Scale Electricity Generation from Biomass Part I: Biomass Gasification." 22.
- Direction Générale pour la Coopération Internationale et le Développement - EuropeAid. 2017. "Analyser Les Chaînes de Valeur Pour Agir plus Effi Cacement." 4.
- Djellal, Faridah, and Faïz Gallouj. 2012. "Innovation Sociale et Innovation de Service: Première Ébauche d'un Dialogue Nécessaire." *Innovations* 2(38):37 à 66.
- Dockès, AC, C. Guinot, F. Kling-Eveillard, S. Fourdin, and M. Barbier. 2012. "Etudier Les Controverses: Approche Méthodologique et Application à La Question de La Consommation de Viande Rouge et Des Gaz à Effet de Serre." *Rencontres Autour Des Recherches Sur Les Ruminants* 12(1):17–20.
- Doray, Pierre, Jorge Niosi, and Serge Proulx. 2018. *Diffusion de La Technologie et Des Innovations*. edited by Montréal Presses de l'Université de Montréal. Montréal, Canada.
- DSS/DGESS/MAAHM. 2021a. *Annuaire Des Statistiques Agricoles 2020*. Ouagadougou, Burkina Faso.
- DSS/DGESS/MAAHM. 2021b. *Résultats Définitifs de La Campagne Agropastorale 2020/2021, de La Situation Alimentaire et Nutritionnelle Du Pays et Perspectives*. Burkina Faso, Rapport global.
- ENER-SUPPLY. 2012. "Handbook on Renewable Energy Sources." *Comprehensive Energy Systems* 157.
- Ettorchi-Tardy, Amina, Marie Levif, and Philippe Michel. 2011. "Le Benchmarking: Une Méthode d'amélioration Continue de La Qualité En Santé." *Pratiques et Organisation Des Soins* 42(4):35 à 46.
- Fang, Yiping. 2011. "Economic Welfare Impacts from Renewable Energy Consumption: The China Experience." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15(9):5120–28.
- FAO. 2005. "L'approche Filière: Analyse Fonctionnelle Des Flux." 23.
- FAO. 2014a. *Bioénergie et Sécurité Alimentaire, Évaluation Rapide (BEFS RA) Manuel d'Utilisation: Gazéification*.
- FAO. 2014b. *Bioénergie et Sécurité Alimentaire Évaluation Rapide (BEFS RA), Manuel d'utilisation: Résidus de Cultures et d'élevage*.
- FAO. 2014c. *Evaluation Des Ressources Forestières Mondiales 2015*. Burkina Faso, Rapport national.

- FAO. 2014d. *Résidus Agricoles et Sous-Produits Agro-Industriels En Afrique de l'Ouest*.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 1998. *Proceedings of the Regional Expert Consultation on Modern Applications of Biomass Energy*. Kuala Lumpur, Malaysia.
- Fedorova, Elena, and Eva Pongrácz. 2019. "Cumulative Social Effect Assessment Framework to Evaluate the Accumulation of Social Sustainability Benefits of Regional Bioenergy Value Chains." *Renewable Energy* 131:1073–88.
- Ferrenbach, David Vilar, Cambreleng Lundager Nazih, Mahmud Hage Ali, Yurena, Ojeda Rodríguez Penélope Ramírez, González Tomás, and González Dunia, Mentado Rodríguez Ico Sánchez-Pinto. 2012. *Les Énergies Renouvelables En Afrique de l'Ouest. État, Expériences et Tendances*. edited by CEREEC, ITC, and CASA AFRIKA.
- Fishbein, M., and I. Ajzen. 1975. *Belief, Attitude, Intention and Behavior: An Introduction to Theory and Research*. Psychology. edited by Flichman. New York, NY, US: Free Press.
- Fliegel, Frederick C., and Joseph E. Kivlin. 1966. "Attributes of Innovations as Factors in Diffusion." *The American Journal of Sociology* 72(3):235–48.
- Foxon, T. J., R. Gross, A. Chase, J. Howes, A. Arnall, and D. Anderson. 2005. "UK Innovation Systems for New and Renewable Energy Technologies: Drivers, Barriers and Systems Failures." *Energy Policy* 33:2123–37.
- Franchi, Marco. 2015. "Study of Coal and Biomass Gasification."
- Fulconis, F., G. Paché, and G. Roveillo. 2011. *La Prestation Logistique : Origines, Enjeux et Perspectives*. Editions M.
- Furaha Mirindi, Germaine. 2017. "Analyse Comparée Des Chaines de Valeur Du Riz Dans La Plaine de La Ruzizi de La Communauté Economique Des Pays Des Grands Lacs (CEPGL)." Université de Liège/Gembloux Agro-Bio Tech, Belgique.
- Furutani, Yuki, Koyo Norinaga, and Shinji Kudo. 2017. "Current Situation and Future Scope of Biomass Gasification in Japan." *EVERGREEN Joint Journal of Novel Carbon Resource Sciences & Green Asia Strategy* 4(4):24–29.
- García-Condado, Sara, Raúl López-Lozano, Lorenzo Panarello, Iacopo Cerrani, Luigi Nisini, Antonio Zucchini, Marijn Van der Velde, and Bettina Baruth. 2019. "Assessing Lignocellulosic Biomass Production from Crop Residues in the European Union: Modelling, Analysis of the Current Scenario and Drivers of Interannual Variability." *GCB Bioenergy* 11(6):809–31.
- Gauvrit, Lisa, and Olivier Mora. 2010. "Etude Prospective Les Futurs Usages Non Alimentaires de La Biomasse Végétale à l'horizon 2050." 1–91.
- Ghimire, Laxman Prasad, and Yeonbae Kim. 2018. "An Analysis on Barriers to Renewable Energy Development in the Context of Nepal Using AHP." *Renewable Energy* 129:446–56.
- Greene, W. 2011. *Econométrie*. 7e édition. edited by Pearson. New York.

- Groupe de Travail PyroGaz. 2015. *Pyrolyse et Gazeification, Une Filière Complémentaire Pour La Transition Énergétique et Le Développement de l'économie Circulaire*.
- Groupe e-sud. 2014. *Etude Sur La Structuration, l'organisation et Le Fonctionnement Des Filières Jatropha En Afrique de l'ouest*.
- Gueye, Macodou, Mar Ngom, Amel Benkahla, Iba Mar Faye, and Cécile Broutin. 2014. "La Promotion Des Activités Économiques Des Femmes Dans Le Bassin Arachidier: Capitalisation de l'expérience de Deux Associations Membres de La FONGS : ADAK et EGABI." 25.
- Guillard, Joanny. 2002. "Un Auxiliaire Oublié: Le Gaz Des Forêts." *Revue Forestière Française, AgroParisTech* 54(2):201–3.
- Guitouni, A., and J. M. Martel. 1998. "Tentative Guidelines to Help Choosing an Appropriate MCDA Method." *European Journal of Operational Research* 109:501–21.
- Gunduz, Murat, and Mohammed Almuajebh. 2020. "Critical Success Factors for Sustainable Construction Project Management." *Sustainability (Switzerland)* 12(5).
- Hamurcu, Mustafa, and Tamer Eren. 2020. "Strategic Planning Based on Sustainability for Urban Transportation: An Application to Decision-Making." *Sustainability (Switzerland)* 12(9).
- Heidenreich, Steffen, and Pier Ugo Foscolo. 2015. "New Concepts in Biomass Gasification." *Progress in Energy and Combustion Science* 46:72–95.
- Hiloidhari, Moonmoon, and Debendra Chandra Baruah. 2011. "Rice Straw Residue Biomass Potential for Decentralized Electricity Generation: A GIS Based Study in Lakhimpur District of Assam, India." *Energy for Sustainable Development* 15(3):214–22.
- Höök, Mikael, and Xu Tang. 2013. "Depletion of Fossil Fuels and Anthropogenic Climate Change-A Review." *Energy Policy* 52:797–809.
- IED. 2019. *Cadrage et Étude de Faisabilité de Centrales Solaires PV*. Vol. 1. Ouagadougou, Burkina Faso.
- INSD. 2017. *Annuaire Statistique 2016*. Ouagadougou, Burkina Faso.
- Institut National de la Statistique et de la Démographie (INSD). 2008. *Recensement Général de La Population et de l'habitation 2006 (RGPH 2006) : Résultats Définitifs*. Burkina Faso.
- IRENA. 2017. *Biogas for Domestic Cooking: Technology Brief*. International Renewable Energy Agency.
- Jacob, Jean-pierre. 2015. "La Sociologie de La Traduction , l'anthropologie Du Développement et l'APAD." *Anthropologie & Développement* (42–23):85–97.
- Jiménez, A., A. Mateos, and S. Rios-Insua. 2007. "Missing Consequences in Multiattribute Utility Theory." *Omega-International Journal of Management Science* 37(2):395–410.

- Jin, Chua Chang, Lim Chee Seong, and Aye Aye Khin. 2020. "Consumers' Behavioural Intention to Accept of the Mobile Wallet in Malaysia." *Journal of Southwest Jiaotong University* 55(1):1–13.
- Kaplinsky, Raphael, and Mike Morris. 2000. *A Handbook for Value Chain: An Important Health Warning or a Guide for Using This Handbook*. IDRC.
- Karan, Shivesh Kishore, and Lorie Hamelin. 2021. "Crop Residues May Be a Key Feedstock to Bioeconomy but How Reliable Are Current Estimation Methods?" *Resources, Conservation and Recycling* 164(September 2020):105211.
- Karatayev, Marat, Stephen Hall, Yelena Kalyuzhnova, and Michèle L. Clarke. 2016. "Renewable Energy Technology Uptake in Kazakhstan: Policy Drivers and Barriers in a Transitional Economy." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 66:120–36.
- Karine, Boiteau. 2016. "La Sociologie de La Traduction Comme Révélateur Des Freins et Des Facilitateurs de La Conduite Du Changement à l'hôpital Public. Le Cas Du Projet de Fidélisation Du Personnel Infirmier de Psychiatrie." Aix Marseille Université, Ecole Doctorale de Sciences Economiques et de Gestion 372 CNRS, LEST (Laboratoire d'Economie et de Sociologie du Travail) UMR 7317 LA.
- Kartha, S., and E. D. Larson. 2000. *Bioenergy Primer: Modernised Biomass Energy for Sustainable Development*. United Nations Development Programme, New York.
- Keeley, Alexander Ryota, and Ken'ichi Matsumoto. 2018. "Relative Significance of Determinants of Foreign Direct Investment in Wind and Solar Energy in Developing Countries – AHP Analysis." *Energy Policy* 123(May):337–48.
- Keeney, R., and H. Raiffa. 1976. *Decision with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs*. Wiley, New York.
- Kemausuor, Francis, Andreas Kamp, Sune Tjalfe Thomsen, Edem Cudjoe Bensah, and Hanne Stergård. 2014. "Assessment of Biomass Residue Availability and Bioenergy Yields in Ghana." *Resources, Conservation and Recycling* 86:28–37.
- Kheang Loh, Soh. 2017. "The Potential of the Malaysian Oil Palm Biomass as a Renewable Energy Source." *Energy Conversion and Management* 141:285–98.
- Kim, J., MJ Realff, and JH Lee. 2011. "Optimal Design and Global Sensitivity Analysis of Biomass Supply Chain Networks for Biofuels under Uncertainty." *Computers and Chemical Engineering* 35:1738–51.
- Kim, S. K., and O. Song. 2009. "A MAUT Approach for Selecting a Dismantling Scenario for the Thermal Column in KRR-1." *Annals of Nuclear Energy* 36(2):145–150.
- Kinnunen, Juss. 1996. "Gabriel Tarde as a Founding Father of Innovation Diffusion Research." *Acta Sociologica* 39(4):431.
- Kirkels, Arjan F., and Geert P. J. Verbong. 2011. "Biomass Gasification: Still

- Promising? A 30-Year Global Overview.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15:471–81.
- Ko, S., P. Lautala, JQ Fan, and DR Shonnard. 2019. “Economic, Social, and Environmental Cost Optimization of Biomass Transportation: A Regional Model for Transportation Analysis in Plant Location Process.” *Biofuels Bioproducts & Biorefining-Biofpr.* 13(3):582–98.
- Koppejan, Jaap, and Van Sjaak Loo. 2012. *The Handbook of Biomass Combustion and Co-Firing.* edited by Sjaak van Loo and Jaap Koppejan.
- Kumar, Ajay, David D. Jones, and Milford A. Hanna. 2009. “Thermochemical Biomass Gasification: A Review of the Current Status of the Technology.” *Energies* 2(3):556–81.
- Kumar, Anil, Nitin Kumar, Prashant Baredar, and Ashish Shukla. 2015. “A Review on Biomass Energy Resources, Potential, Conversion and Policy in India.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 45:530–39.
- Kwofie, E. M., and M. Ngadi. 2017. “A Review of Rice Parboiling Systems, Energy Supply, and Consumption.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 72(November 2016):465–72.
- Lam, HL, P. Varbanov, and J. Klemes. 2010. “Minimising Carbon Footprint of Regional Biomass Supply Chains.” *Resource, Conservation and Recycling* 54:303–9.
- Lan, Weijuan, Guanyi Chen, Xinli Zhu, Xuetao Wang, and Bin Xu. 2015. “Progress in Techniques of Biomass Conversion into Syngas.” *Journal of the Energy Institute* 88(2):151–56.
- Lebailly, P. 1990. “Concept de Filière, Économie Agro-Alimentaire et Développement.” *Tropicultura* 8(1):9–14.
- Lebailly, Philippe, Thomas Dogot, Pham Van Bien, and Tran Tien Khai. 2000. *La Filière Rizicole Au Sud Viêt-Nam. Un Modèle Méthodologique.* edited by Les Presses Agronomiques de Gembloux. Gembloux, Belgique.
- Lepoivre, Fabien. 2005. “Benchmarking: Concept et Methodologie.” *Nevao Conseil* 02:22.
- Leung, Dennis Y. C., X. L. Yin, and C. Z. Wu. 2004. “A Review on the Development and Commercialization of Biomass Gasification Technologies in China.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 8(6):565–80.
- Loken, E., A. Botterud, and A. Holen. 2009. “Use of the Equivalent Attribute Technique in Multi-Criteria Planning of Local Energy Systems.” *European Journal of Operational Research* 197:1075–83.
- Louvel, Roland, and Christian Gromard. 2017. “De La Biomasse à La Bioéconomie, Une Stratégie Énergétique Pour l’Afrique ?” *Afrique Contemporaine* (261–262):223 à 240.
- Lovrak, Ana, Tomislav Pukšec, and Neven Duić. 2020. “A Geographical Information System (GIS) Based Approach for Assessing the Spatial Distribution and Seasonal Variation of Biogas Production Potential from

- Agricultural Residues and Municipal Biowaste.” *Applied Energy* 267(April):115010.
- Luthra, Sunil, Sanjay Kumar, Dixit Garg, and Abid Haleem. 2015. “Barriers to Renewable/Sustainable Energy Technologies Adoption: Indian Perspective.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41:762–76.
- Mahil, Aziza, and Diane-gabrielle Tremblay. 2018. “Théorie de l’acteur-Réseau.” Pp. 234–37 in *Sciences, technologies et sociétés de A à Z*, edited by P. de l’Université de Montréal. Presses de l’Université de Montréal.
- Makwana, Jignesh P., Jay Pandey, and Gaurav Mishra. 2019. “Improving the Properties of Producer Gas Using High Temperature Gasification of Rice Husk in a Pilot Scale Fluidized Bed Gasifier (FBG).” *Renewable Energy* 130:943–51.
- Malhotra, Yogesh, and Dennis F. Galletta. 1999. “Extending the Technology Acceptance Model to Account for Social Influence: Theoretical Bases and Empirical Validation.” *Proceedings of the Hawaii International Conference on System Sciences* 00(c):5.
- Malik, Syed A., and Abdul Rahman Ayop. 2020. “Solar Energy Technology: Knowledge, Awareness, and Acceptance of B40 Households in One District of Malaysia towards Government Initiatives.” *Technology in Society* 63(September):101416.
- Mansaray, Lamin R., Kangyu Zhang, and Adam Sheka. 2020. “Dry Biomass Estimation of Paddy Rice with Sentinel-1A Satellite Data Using Machine Learning Regression Algorithms.” *Computers and Electronics in Agriculture* 176(May):105674.
- Marangunić, Nikola, and Andrina Granić. 2015. “Technology Acceptance Model: A Literature Review from 1986 to 2013.” *Universal Access in the Information Society* 14(1):81–95.
- Marimin, Darmawan Muhammad Arif, Machfud Muhammad Panji Islam Fajar Putra, and Bangkit Wiguna. 2014. “Value Chain Analysis for Green Productivity Improvement in the Natural Rubber Supply Chain: A Case Study.” *Journal of Cleaner Production* 85:201–11.
- Marvin, W. Alex, Lanny D. Schmidt, and Prodromos Daoutidis. 2012. “Biorefinery Location and Technology Selection Through Supply Chain Optimization.” *Industrial and Engineering Chemistry Research* 52(9):3192–3208.
- Maung, T. A., C. R. Gustafson, D. M. Saxowsky, J. Nowatzki, T. Miljkovic, and D. Ripplinger. 2013. “The Logistics of Supplying Single vs. Multi-Crop Cellulosic Feedstocks to a Biorefinery in Southeast North Dakota.” *Appl. Energy*.
- McFadden, D. 1975. “The Revealed Preferences of Government Bureaucracy: Theory.” *The Bell Journal of Economics* 6(2):401–416.
- ME. 2018. “Stratégie Dans Le Domaine de l’énergie 2019-2023.” 71.
- ME. 2019. “Tableau de Bord 2018 Du Ministère de l’Energie.” 47.

- MEEVCC/SP-CNDD. 2017. *Plans d'actions Technologiques Pour l'adaptation Dans Les Secteurs de l'Agriculture et de La Foresterie Au Burkina Faso*. Ouagadougou, Burkina Faso.
- MEMC. 2020. *Tableau de Bord 2020 Du Ministère de l'Energie, Des Mines et Des Carrieres*. Ouagadougou, Burkina Faso.
- Mena, Sami Ben. 2000. "Introduction Aux Méthodes Multicritères d'aide à La Décision." *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 4(2):83–93.
- Merkovic-orenstein, Alex, and Cheikh Samb. 2018. *Analyse de La Production de Biomasse 2017 et Perspectives Pour 2018*.
- Mermoud, F. 2006. "Gazéification de Charbon de Bois à La Vapeur d'eau : De La Particule Isolée Au Lit Fixe Continu." (Upr 42):221.
- Meyssonnier, François. 2001. "Le Calcul Des Coûts de Revient Dans La Sidérurgie de La Seconde Guerre Mondiale à La Nationalisation." *Comptabilité - Contrôle - Audit* 7(1):5.
- Michel, Baudouin, Desclee Doriane, Boureima Fayçal, and Gaita Mamadou. 2016. "Analyse et Développement Inclusif et Durable de La Chaîne de Valeur Du Riz Au Mali." 90.
- Ministère de l'Environnement et du Développement Durable. 2012. "Plan de Préparation à La REDD Du Burkina Faso." 149.
- Mohamed Abdul Ghani, N. Muhammad Aslaam, Chrysafis Vogiatzis, and Joseph Szmerekovsky. 2018. "Biomass Feedstock Supply Chain Network Design with Biomass Conversion Incentives." *Energy Policy* 116(February):39–49.
- Mohan, D., CU Pittman, and Jr PH Steele. 2006. "Pyrolyse Du Bois / Biomasse Pour La Bio-Huile: Un Examen Critique." *Energy Fuels* 20:848–89.
- Morato, Teresa, Mahdi Vaezi, and Amit Kumar. 2019. "Assessment of Energy Production Potential from Agricultural Residues in Bolivia." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 102:14–23.
- Mosnier, C. 2009. "Pour Obtenir Le Grade de Docteur d'AgroParis Tech Adaptation Des Élevages de Bovins Allaitants Aux Aléas de Prix et de Climat : Approches Par Modélisation Adaptation of Suckler Cow Farms to Weather and Beef Price Risks : Moufouma-Okia."
- Mugwe, Jayne, Daniel Mugendi, Monicah Mucheru-Muna, Roel Merckx, Jonas Chianu, and Bernard Vanlauwe. 2009. "Determinants of the Decision to Adopt Integrated Soil Fertility Management Practices by Smallholder Farmers in the Central Highlands of Kenya." *Experimental Agriculture* 45(1):61–75.
- Muhammad, Faizan Naveed. 2021. *Effect of Wind Speed and Temperature on Efficiency of PV Module*.
- Nair, Lakshana G., Komal Agrawal, and Pradeep Verma. 2022. "An Overview of Sustainable Approaches for Bioenergy Production from Agro-Industrial Wastes." *Energy Nexus* 6(March):100086.
- Naqvia, Salman Raza, Hameed Zeeshan, Tariqa Rumaisa, A. Taqv. Syed, Ali

- Imtiaz, M. Bilal Khan Niazi, Noor Tayyaba, Hussaina Arshad, Iqbal Naseem, and M. Shahbaz. 2019. "Synergistic Effect on Co-Pyrolysis of Rice Husk and Sewage Sludge by Thermal Behavior, Kinetics, Thermodynamic Parameters and Artificial Neural Network." *Waste Management* 85(15):131–40.
- Narnaware, Sunil L., and N. L. Panwar. 2022. "Biomass Gasification for Climate Change Mitigation and Policy Framework in India: A Review." *Bioresource Technology Reports* 17(September 2021):100892.
- Natarajan, Karthikeyan, Petri Latva-Käyrä, Anas Zyadin, and Paavo Pelkonen. 2016. "New Methodological Approach for Biomass Resource Assessment in India Using GIS Application and Land Use/Land Cover (LULC) Maps." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 63:256–68.
- Neofytou, H., A. Nikas, and H. Doukas. 2020. "Sustainable Energy Transition Readiness: A Multicriteria Assessment Index." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 131.
- Nguyen, Hong Nam, Hoai-son Nguyen, Minh Ha-duong, Laurent Van De, Hong Nam Nguyen, Hoai-son Nguyen, Minh Ha-duong, and Laurent Van De Steene. 2016. "Biomass Gasification in Southeast Asia : Factors Influencing Technology Adoption in Cambodia."
- Nguyen, Quynh Anh, Luc Hens, Charlotte Macalister, Lester Johnson, Boripat Lebel, Sinh Bach Tan, Hung Manh Nguyen, The Ninh Nguyen, and Louis Lebel. 2019. "Theory of Reasoned Action as a Framework for Communicating Climate Risk : A Case Study of Schoolchildren in the Mekong Delta in Vietnam." *Sustainability* 10:1–14.
- Numata, Masako, Masahiro Sugiyama, and Gento Mogi. 2020. "Barrier Analysis for the Deployment Of." *Energies* 13(1400):16.
- Nunes, L. J. R., T. P. Causer, and D. Ciolkosz. 2020. "Biomass for Energy: A Review on Supply Chain Management Models." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 120(December 2019):8.
- Nygaard, Ivan, Thilde Beck Bruun, Oumar Fatogama Traoré, Filifeng Dembélé, Ibrahim Dao, Adama Mariko, Nanourou Coulibaly, Famakan Kamissoko, and Rasmus Borgstrøm. 2012. *Résidus Agricoles Pour La Production de l'énergie Au Mali*.
- OCDE. 2005. "Manuel d'Oslo." (3rd).
- Ocuaye, Gideon. 2012. "The Role of Biomass Gasification in Rural Electrification in Ghana."
- OECD/IEA. 2010. *Sustainable Production of Second-Generation Biofuels: Potential and Perspectives in Major Economies and Developing Countries*. Paris, France.
- Ouedraogo, Boukary. 2015. "Tarification Du Bois-Énergie Au Burkina Faso : La Problématique de l ' Internalisation Des Coûts Sociaux Liés à l ' Exploitation de l ' Énergie." (December).
- Ouedraogo, Jean, Idriss Serme, Mathias Bouinzemwendé Pouya, Sogo Bassirou

- Sanon, and Korodjouma Ouattara. 2020. "Amélioration de La Productivité Du Sorgho Par l'introduction d'options Technologiques de Gestion Intégrée de La Fertilité Des Sols En Zone Nord Soudanienne Du Burkina Faso." *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 14(9):3262–74.
- Ozer, Pierre. 2004. "Bois de Feu et Déboisement Au Sahel : Mise Au Point." *Sécheresse* 15(3):243–51.
- Panwar, N. L. 2011. "Biomass for Domestic and Agro Industrial Applications." in *Wood: types, properties, and uses, Inc.*, edited by L. F. Botannini. New York: Nova Science.
- Parker, N., P. Tittmann, Q. Hart, R. Nelson, K. Skog, A. Schmidt, E. Gray, and B. Jenkins. 2010. "Development of a Biorefinery Optimized Biofuel Supply Curve for the Western United States." *Biomass & Bioenergy* 34:1597–1607.
- Patel, Madhumita, Xiaolei Zhang, and Amit Kumar. 2016. "Techno-Economic and Life Cycle Assessment on Lignocellulosic Biomass Thermochemical Conversion Technologies: A Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 53:1486–99.
- Porter, Michel E. 1985. "Competitive Advantage: Creating and Sustaining Superior Performance." Free Press, New York, USA.
- Rentizelas, Athanasios A., Athanasios J. Tolis, and Ilias P. Tatsiopoulos. 2009. "Logistics Issues of Biomass: The Storage Problem and the Multi-Biomass Supply Chain." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13(4):887–94.
- Ricoul, François. 2016. "Association d'un Procédé de Gazéification Avec Une Pile à Combustible Haute Température (SOFC) Pour La Production d'électricité à Partir de Biomasse." Université de Nantes.
- Rimal, Abu Taha, and Daim Tugrul. 2013. "Multi-Criteria Applications in Renewable Energy Analysis, a Literature Review." *Research and Technology Management in the Electricity Industry, Green Energy and Technology* 60:17–31.
- Rogers, Everett M. 2002. "Diffusion of Preventive Innovations." *Addictive Behaviors* 27 27:989–93.
- Rogers, Everett M. 2003. *Diffusion Des Innovations*. Fifth edit. New York: Free Press.
- Ronzon, T., and S. Piotrowski. 2017. "Are Primary Agricultural Residues Promising Feedstock for the European Bioeconomy?" *Ind. Biotechnol.* 13(3):113–127.
- Roy, B. 1985. *Méthodologie Multicritère d'aide à La Décision. Sous La Dir. de V. Giard. Paris.*
- Roy, B., and P. Bertier. 1971. "La Méthode Electre II, Une Méthode de Classement En Présence de Critères Multiples." 50.
- Ruiz, J. A., M. C. Juárez, M. P. Morales, P. Muñoz, and M. A. Mendivil. 2013. "Biomass Gasification for Electricity Generation: Review of Current Technology Barriers." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.

- Saaty, T., and K. Kearns. 2014. "Analytical Planning: The Organization of System." *Elsevier* 7:216.
- Saaty, T. L. 2008. "Decision Making with the Analytic Hierarchy Process." *Int. J. Services Sciences* 1(1):83–98.
- Saaty, T. L., and K. P. Kearns. 1985. "Analytical Planning: The Organization of System." *Pergamon Press: New York, NY, USA*.
- Saaty, Thomas L. 2001. "Fundamentals of the Analytic Hierarchy Process." Pp. 15–35 in *The Analytic Hierarchy Process in Natural Resource and Environmental Decision Making*. The Netherlands: Springer, Dordrecht.
- Saaty, TL. 2000. *Fundamentals of Decision Making and Priority Theory*. 2nd ed. Pittsburgh: PA: RWS Publications.
- SABA, Fatimata. 2011. "Performances de La Fertilisation Par Micro Dose Au Poquet Suivant Les Niveaux de Toposéquence Dans Le Terroir de Nagréongo (Plateau Central)." Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso.
- Saidou, Ahmed Liman. 2013. "Caractérisation Des Performances d'une Unité Pilote de Gazéification de Biomasse: Analyse de Faisabilité Technique, Économique et Environnementale Pour Une Utilisation Chez Un Artisan d'une Filière Agroalimentaire Au Burkina." Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, Ouagadougou, Burkina Faso.
- Sanayei, A., S. Farid Mousavi, M. Abdi, and A. Mohaghar. 2008. "An Integrated Group Decisionmaking Process for Supplier Selection and Order Allocation Using Multi-Attribute Utility Theory and Linear Programming." *Journal of the Franklin Institute* 345(7):731–747.
- Sangare, Oumar. 2016. "Rôle de l'orpaillage Dans Le Système d'activités Des Ménages En Milieu Agricole : Cas de La Commune Rurale de Gbomblora Dans La Région Sud-Ouest Du Burkina Faso." Université de Laval, Québec, Canada.
- Sansaniwal, S. K., M. A. Rosen, and S. K. Tyagi. 2017. "Global Challenges in the Sustainable Development of Biomass Gasification: An Overview." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 80:23–43.
- Sarkar, Biswajit, Muhammad Omair, and Seok Beom Choi. 2018. "A Multi-Objective Optimization of Energy, Economic, and Carbon Emission in a Production Model under Sustainable Supply Chain Management." *Applied Sciences (Switzerland)* 8(10):1–25.
- Sawadogo, Edith. 2021. "Discours, Pratiques et Dynamiques Environnementales Autour de l'orpaillage Dans La Commune de Kampti (Sud-Ouest Du Burkina Faso)." Université Joseph Ki-Zerbo Ouaga 1 (Ouagadougou, Burkina Faso) et Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne.
- SE4ALL. 2014. "[Burkina Faso]: Evaluation Rapide et Analyse d'écart." 41.
- Secrétariat Permanent de la Coordination des Politiques Sectorielles Agricoles. 2017. *Deuxième Programme National Du Secteur Rural (PNSR) 2016-2020*. Ouagadougou, Burkina Faso.
- Sharma, B., R. G. Ingalls, C. L. Jones, and A. Khanchi. 2013. "Biomass Supply

- Chain Design and Analysis: Basis, Overview, Modeling, Challenges, and Future.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 24:608–27.
- Sheppard, B. H., J. Hartwick, and P. R. Warshaw. 1988. “The Theory of Reasoned Action: A Meta-Analysis of Past Research with Recommendations for Modifications and Future.” *Journal of Consumer Research* 15(3):325–343.
- Simon, U., R. Bruggmann, and S. Pundez. 2004. “Aspects of Decision Support in Water Management.” *In Water Research* 38(7):1809–16.
- Singh, Jaswinder. 2015. “Overview of Electric Power Potential of Surplus Agricultural Biomass from Economic, Social, Environmental and Technical Perspective - A Case Study of Punjab.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 42:286–97.
- Singh, Vineet, Ming Zhao, Paul S. Fennell, Nilay Shah, and Edward J. Anthony. 2017. “Progress in Biofuel Production from Gasi Fi Cation.” *Progress in Energy and Combustion Science* 61:189–248.
- Sissoko, P., F. Berti, S. Gry, and P. Lebailly. 2018. “Effets de l’adoption de La Technique Du Microdosage d’engrais Sur La Disponibilité et l’accessibilité Céréalière Des Exploitations Agricoles à Base de Mil et de Sorgho Au Mali.” *Agronomie Africaine* 30(2):193–204.
- Situmorang, Yohanes Andre, Zhongkai Zhao, Akihiro Yoshida, Abuliti Abudula, and Guoqing Guan. 2020. “Small-Scale Biomass Gasification Systems for Power Generation (< 200 KW Class): A Review.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 117(January 2019):109486.
- Soro, Y. M., Alain K. Tossa, D. Yamegueu, and Lionel Sicot. 2018. “Experimental Platform for Outdoor Characterization of Photovoltaic Modules Under Hot Climate.” *International Journal of Renewable Energy Research* 8(3):13.
- Spier, L. 1929. “The Building of Cultures Roland B. Dixon.” N. (New York: Charles Scribner’s Sons, 1928. X, 312 Pp. \$4.00.)” *American Anthropologist* 140–45.
- START. 2021. *ProGREEN Burkina Faso Evaluation Des Energies Renouvelables*. Québec.
- Van De Steene, Laurent. 2014. “De La Description Fine de La Gazéification En Lit Fixe à l’optimisation Des Procédés Étagés.” Université de Perpignan Via Domitia Section CNU 62 : Energétique et Génie des Procédés De.
- Tanger, Paul, John L. Field, Courtney E. Jahn, Morgan W. Defoort, Jan E. Leach, and Gordon G. Allison. 2013. “Biomass for Thermochemical Conversion: Targets and Challenges.” *Frontiers in Plant Science* 4(July):1–20.
- Tchouate Heteu, Pepin. 2003. “Contribution Des Énergies Renouvelables Au Développement Durable Du Secteur Électrique: Le Cas Du Cameroun.” Université de Louvain La Neuve.
- Temple, Ludovic, Frédéric Lançon, Florence Palpacuer, Gilles Paché, Ludovic

- Temple, Frédéric Lançon, Florence Palpacuer, and Gilles Paché. 2013. "Actualisation Du Concept de Filière Dans l ' Agriculture et l ' Agroalimentaire To Cite This Version: HAL Id: Hal-00802690 Actualisation Du Concept de Filière Dans l ' Agriculture et l ' Agroalimentaire."
- Thomson, Richard, Philip Kwong, Ejaz Ahmad, and K. D. P. Nigam. 2020. "Clean Syngas from Small Commercial Biomass Gasifiers; a Review of Gasifier Development, Recent Advances and Performance Evaluation." *International Journal of Hydrogen Energy* 45(41):21087–111.
- Thuo, Mary, Boris E. Bravo-Ureta, Ibrahim Hathie, and Patrick Obeng-Asiedu. 2005. "Adoption of Chemical Fertilizer by Smallholder Farmers in the Peanut Basin of Senegal." *The African Journal of Agricultural and Resource Economics* 6(1):1–17.
- Tornatzky, Louis G., and Katherine J. Klein. 1982. "Innovation Characteristics and Innovation Adoption-Implementation: A Meta-Analysis of Findings." *IEEE Transactions on Engineering Management* EM-29(1):28–45.
- Tripathi, Amarmani, and S. K. Shukla. 2015. "Comparative Studies of Gasification Potential of Agro-Waste with Wood and Their Characterization." *Advances in Energy Research* 3(3):181–94.
- Tursi, Antonio. 2019. "A Review on Biomass: Importance, Chemistry, Classification, and Conversion." *Biofuel Research Journal* 6(2):962–79.
- Vassilev, Stanislav V., David Baxter, Lars K. Andersen, and Christina G. Vassileva. 2010. "An Overview of the Chemical Composition of Biomass." *Fuel* 89(5):913–33.
- Vassilev, Stanislav V., David Baxter, Lars K. Andersen, Christina G. Vassileva, and Trevor J. Morgan. 2012. "An Overview of the Organic and Inorganic Phase Composition of Biomass." *Fuel* 94:1–33.
- Vognan, Gaspard. 2019. "Performance Différenciée Du Coton Bt En Début de Diffusion : Cas Du Burkina Faso." *Cah. Agric.* 28(26):10.
- Walsh, Isabelle, and Alexandre Renaud. 2010. "La Théorie de La Traduction Revisitée Ou La Conduite Du Changement Traduit. Application à Un Cas de Fusion-Acquisition Nécessitant Un Changement de Système d'Information." *Management & Avenir* 39(9):283.
- Wang, Lijun, Curtis L. Weller, David D. Jones, and Milford A. Hanna. 2008. "Contemporary Issues in Thermal Gasification of Biomass and Its Application to Electricity and Fuel Production." *Biomass and Bioenergy* 32(7):573–81.
- Xiaohan, Yu, Zhang Suojuan, Liao Xianglin, and Qi Xiuli. 2018. "ELECTRE Methods in Prioritized MCDM Environment." *Information Sciences* 301–16.
- Yelles Chaouche, Fatima Zohra. 2021. "Gestion de Production et Coût de Revient Cible Dans l'entreprise Économique." *Les Cahiers Du MECAS* 17(2):203–13.
- Yu, Hao, Elisabeth Román, and Wei Deng Solvang. 2017. "A Value Chain

- Analysis for Bioenergy Production from Biomass and Biodegradable Waste : A Case Study in A Value Chain Analysis for Bioenergy Production from Northern Norway Biomass and Biodegradable Waste : A Case Study in Northern Norway.” P. 24 in *Energy Systems and Environment*.
- Zahraee, Seyed Mojib, Nirajan Shiwakoti, and Peter Stasinopoulos. 2020. “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* 142(January):105777.
- Zailan, Roziah, Jeng Shiun, Zainuddin Abdul, Sharifah Rafidah, Wan Alwi, Behnam Mohammadi-ivatloo, and Khairulnadzmi Jamaluddin. 2021. “Malaysia Scenario of Biomass Supply Chain-Cogeneration System and Optimization Modeling Development: A Review.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 148(May):111289.
- Zandi Atashbar, N., N. Labadie, and C. Prins. 2016. “Modeling and Optimization of Biomass of Biomass Supply Chains: A Review and a Critical Look Look.” *IFAC-Papers OnLine* 49(12):604–15.
- Zhang, Zhengfeng, B. Chen, A. Chen, and W. Zhao. 2013. “Barriers to Commercialization Development of Crop Straw Gasification Technology in China and Promoting Policy Design.” *Energy Sources, Part B: Economics, Planning and Policy* 8(3):279–89.
- Zheng, Yanan, and Feng Qiu. 2020. “Bioenergy in the Canadian Prairies: Assessment of Accessible Biomass from Agricultural Crop Residues and Identification of Potential Biorefinery Sites.” *Biomass and Bioenergy* 140(July):105669.
- Zhou, Zhaoqiu, Xiuli Yin, Jie Xu, and Longlong Ma. 2012. “The Development Situation of Biomass Gasification Power Generation in China.” *Energy Policy* 51(x):52–57.
- Zongo, Bétéo. 2016. “Stratégies Innovantes d’adaptation à La Variabilité et Au Changement Climatiques Au Sahel : Cas de l’irrigation de Complément et de l’information Climatique Dans Les Exploitations Agricoles Du Burkina Faso.” Thèse en cotutelle, dissertation originale, Institut International d’Ingénierie de l’Eau et de l’Environnement (2iE) et Université de Liège, Gembloux Agro-Bio Tech (ULg - GxABT).
- Zoungrana, D. T. Laetitia. 2022. “Conception et Caractérisation Expérimentale d’un Réacteur de Gazéification Pour l’Afrique de l’Ouest.” UCLouvain et 2iE.

Annexes

Annexe 1 : Questionnaire adressé aux parties prenantes pour l'identification des barrières clés d'adoption de la gazéification

1.1. Quel est l'ordre d'importance des dimensions et des barrières de blocage de l'adoption de la gazéification ?

N°	Barrières	Barrières comparatifs	Eléments d'appréciation 1= Egale importance ; 3= Légèrement plus important ; 5= Fortement plus important ; 7= Très fortement plus important ; 9= Importance absolue ; 2, 4, 6, 8 = Valeurs intermédiaires.
1	Interne à la technologie	Externe à la technologie	/...../
2	Techniques	Économiques et financiers	/...../
		Socioculturels et organisationnels	/...../
		Politiques, gouvernementaux, Institutionnels	/...../
		Ecologiques et géographiques	/...../
3	Économiques et financiers	Socioculturels et organisationnels	/...../
		Politiques, gouvernementaux, Institutionnels	/...../
		Ecologiques et géographiques	/...../
4	Socioculturels et organisationnels	Politiques, gouvernementaux, institutionnels	/...../
		Ecologiques et géographiques	/...../
5	Politiques, gouvernementaux, Institutionnels	Ecologiques et géographiques	/...../

1.2. Quel est l'ordre d'importance des sous catégories de barrières de l'adoption de la gazéification ?

1.2.1. Sous catégories des barrières techniques

N°	Sous catégories de barrières	Eléments comparatifs	Eléments d'appréciation 1= Egale importance ; 3= Légèrement plus important ; 5= Fortement plus important ; 7= Très fortement plus important ; 9= Importance absolue ;

Evaluation des conditions de développement d'une filière de gazéification de biomasse agricole au Burkina Faso

			2, 4, 6, 8 =Valeurs intermédiaires.
1	Technologie complexe : de grande taille	Manque de connaissance de la technologie (pas d'informations sur l'entretien, le fonctionnement et la maintenance)	/...../
		Problème de dimensionnement de l'équipement par rapport aux besoins réels des utilisateurs	/...../
		Matériel de conception non approprié aux conditions de hautes températures	/...../
		Technologie moins efficace / pratiques anciennes	/...../
		Manque de ressources humaines (expertise) et matérielles qualifiées locales et nationales	/...../
		Matériel de conception non approprié aux conditions de hautes températures	/...../
2	Manque de connaissance de la technologie (pas d'informations sur l'entretien, le fonctionnement et la maintenance)	Problème de dimensionnement de l'équipement par rapport aux besoins réels des utilisateurs	/...../
		Matériel de conception non approprié aux conditions de hautes températures	/...../
		Technologie moins efficace / pratiques anciennes	/...../
		Manque de ressources humaines (expertise) et matérielles qualifiées locales et nationales	/...../
		Matériel de conception non approprié aux conditions de hautes températures	/...../
4	Problème de dimensionnement de l'équipement par rapport aux besoins réels des utilisateurs	Matériel de conception non approprié aux conditions de hautes températures	/...../
		Technologie moins efficace / pratiques anciennes	/...../
		Manque de ressources humaines (expertise) et matérielles qualifiées locales et nationales	/...../
		Matériel de conception non approprié aux conditions de hautes températures	/...../
5	Matériel de conception non approprié aux conditions de hautes températures	Technologie moins efficace / pratiques anciennes	/...../
		Manque de ressources humaines (expertise) et matérielles qualifiées locales et nationales	/...../
		Matériel de conception non approprié aux conditions de hautes températures	/...../
6	Technologie moins efficace / pratiques anciennes	Manque de ressources humaines (expertise) et matérielles qualifiées locales et nationales	/...../
		Matériel de conception non approprié aux conditions de hautes températures	/...../

7	Manque de ressources humaines (expertise) et matérielles qualifiées locales et nationales	Matériel de conception non approprié aux conditions de hautes températures	/...../
---	-------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------	---------

1.2.2. Sous catégories des barrières économiques et financiers

N°	Sous catégories des barrières	Barrières comparatifs	Eléments d'appréciation 1= Egale importance ; 3= Légèrement plus important ; 5= Fortement plus important ; 7= Très fortement plus important ; 9= Importance absolue ; 2, 4, 6, 8 =Valeurs intermédiaires.
1	Coût d'investissement initiaux élevés	Coût élevé des pièces de rechange	/...../
		Absence de mécanisme de financement	/...../
		Absence de subventions	/...../
		Avantage relatif de la technologie: rentabilité par rapport aux anciennes techniques	/...../
		Insuffisance de ressources financières pour un investissement	/...../
		Temps de retour sur investissement élevé	/...../
2	Coût élevé des pièces de rechange	Prix non concurrentiel de l'énergie	/...../
		Absence de mécanisme de financement	/...../
		Absence de subventions	/...../
		Avantage relatif de la technologie: rentabilité par rapport aux anciennes techniques	/...../
		Insuffisance de ressources financières pour un investissement	/...../
		Temps de retour sur investissement élevé	/...../
3	Absence de mécanisme de financement	Prix non concurrentiel de l'énergie	/...../
		Absence de subventions	/...../
		Avantage relatif de la technologie: rentabilité par rapport aux anciennes techniques	/...../
		Insuffisance de ressources financières pour un investissement	/...../
		Temps de retour sur investissement élevé	/...../
4	Absence de subventions	Prix non concurrentiel de l'énergie	/...../
		Avantage relatif de la technologie: rentabilité par rapport aux anciennes techniques	/...../
		Insuffisance de ressources financières pour un investissement	/...../
		Temps de retour sur investissement élevé	/...../

Evaluation des conditions de développement d'une filière de gazéification de biomasse agricole au Burkina Faso

		Insuffisance de ressources financières pour un investissement	/...../
		Temps de retour sur investissement élevé	/...../
		Prix non concurrentiel de l'énergie	/...../
5	Avantage relatif de la technologie: rentabilité par rapport aux anciennes techniques	Insuffisance de ressources financières pour un investissement	/...../
		Temps de retour sur investissement élevé	/...../
		Prix non concurrentiel de l'énergie	/...../
6	Insuffisance de ressources financières pour un investissement	Temps de retour sur investissement élevé	/...../
		Prix non concurrentiel de l'énergie	/...../
7	Temps de retour sur investissement élevé	Prix non concurrentiel de l'énergie	/...../

1.2.3. Sous catégories des barrières socioculturels et organisationnels

N°	Barrières	Barrières comparatifs	Eléments d'appréciation 1= Egale importance ; 3= Légèrement plus important ; 5= Fortement plus important ; 7= Très fortement plus important ; 9= Importance absolue ; 2, 4, 6, 8= Valeurs intermédiaires.
1	Manque d'expérience en matière de gazéification (fiabilité non prouvée de la technologie)	Manque de connaissances sur la technologie et ses avantages	/...../
		Manque de sensibilisation des utilisateurs	/...../
		Manque de prise en compte du genre	/...../
		Insuffisance de formation des utilisateurs	/...../
		Mauvaise planification et organisation du travail	/...../
		Manque d'implication des acteurs clés et de coordination entre les différentes parties prenantes	/...../
		Manque de confiance entre les acteurs dans la planification de la mise en œuvre et l'implantation de la technologie	/...../
2	Manque de connaissances sur la technologie et ses avantages	Rupture des liens sociaux dû à l'innovation	/...../
		Manque de sensibilisation des utilisateurs	/...../
		Manque de prise en compte du genre (/...../
		Insuffisance de formation des utilisateurs	/...../
		Mauvaise planification et organisation du travail	/...../
		Manque d'implication des acteurs clés et de coordination entre les différentes parties prenantes	/...../
	Manque de confiance entre les acteurs dans la planification de la mise en œuvre et l'implantation de la technologie	/...../	

3	Manque de sensibilisation des utilisateurs	Rupture des liens sociaux dû à l'innovation	/...../
		Manque de prise en compte du genre	/...../
		Insuffisance de formation des utilisateurs	/...../
		Mauvaise planification et organisation du travail	/...../
		Manque d'implication des acteurs clés et de coordination entre les différentes parties prenantes	/...../
		Manque de confiance entre les acteurs dans la planification de la mise en œuvre et l'implantation de la technologie	/...../
4	Manque de prise en compte du genre (technologie adaptée à un idéal de personnes=difficulté de manipulation de la technologie par les femmes)	Rupture des liens sociaux dû à l'innovation (changement des pratiques)	/...../
		Insuffisance de formation des utilisateurs	/...../
		Mauvaise planification et organisation du travail	/...../
		Manque d'implication des acteurs clés et de coordination entre les différentes parties prenantes	/...../
		Manque de confiance entre les acteurs dans la planification de la mise en œuvre et l'implantation de la technologie	/...../
		Rupture des liens sociaux dû à l'innovation (changement des pratiques)	/...../
5	Insuffisance de formation des utilisateurs	Mauvaise planification et organisation du travail	/...../
		Manque d'implication des acteurs clés et de coordination entre les différentes parties prenantes	/...../
		Manque de confiance entre les acteurs dans la planification de la mise en œuvre et l'implantation de la technologie	/...../
		Rupture des liens sociaux dû à l'innovation (changement des pratiques)	/...../
6	Mauvaise planification et organisation du travail	Manque d'implication des acteurs clés et de coordination entre les différentes parties prenantes	/...../
		Manque de confiance entre les acteurs dans la planification de la mise en œuvre et l'implantation de la technologie	/...../
		Rupture des liens sociaux dû à l'innovation (changement des pratiques)	/...../
7	Manque d'implication des acteurs clés (SONABEL, SOFITEX, Ministères en charge de l'Energie, de l'Agriculture, de la Recherche, etc.) et de coordination entre les différentes parties prenantes	Manque de confiance entre les acteurs dans la planification de la mise en œuvre et l'implantation de la technologie	/...../
		Rupture des liens sociaux dû à l'innovation (changement des pratiques)	/...../
8	Manque de confiance entre les acteurs dans la planification de la mise en œuvre et l'implantation de la technologie	Rupture des liens sociaux dû à l'innovation (changement des pratiques)	/...../

1.2.4. Sous catégories des barrières politiques, gouvernementaux, institutionnels

N°	Sous catégories de barrières	Sous catégories de barrières comparatifs	Eléments d'appréciation 1= Egale importance ; 3= Légèrement plus important ; 5= Fortement plus important ; 7= Très fortement plus important ; 9= Importance absolue ; 2, 4, 6, 8= Valeurs intermédiaires.
	Manque d'engagement politique	Absence de politique gouvernementale adéquate	/...../
		Absence de cadre institutionnel, juridique et réglementaire	/...../
		Instabilité politique	/...../
		Manque de promotion et d'intérêt par le gouvernement	/...../
		Manque de subvention pour la biomasse-énergie	/...../
		Appartenance politique des acteurs des projets	/...../
	Absence de politique gouvernementale adéquate	Absence de cadre institutionnel, juridique et réglementaire	/...../
		Instabilité politique	/...../
		Manque de promotion et d'intérêt par le gouvernement	/...../
		Manque de subvention pour la biomasse-énergie	/...../
		Appartenance politique des acteurs des projets	/...../
	Absence de cadre institutionnel, juridique et réglementaire	Instabilité politique	/...../
		Manque de promotion et d'intérêt par le gouvernement	/...../
		Manque de subvention pour la biomasse-énergie	/...../
		Appartenance politique des acteurs des projets	/...../
	Instabilité politique	Instabilité politique	/...../
		Manque de promotion et d'intérêt par le gouvernement	/...../
		Manque de subvention pour la biomasse-énergie	/...../
		Appartenance politique des acteurs des projets	/...../

	Manque de promotion et d'intérêt par le gouvernement	Manque de subvention pour la biomasse-énergie	/...../
		Appartenance politique des acteurs des projets	/...../
	Manque de subvention pour la biomasse-énergie	Appartenance politique des acteurs des projets	/...../

1.2.5. Sous catégories des barrières écologiques et géographiques

N°	Sous catégories de barrières	Sous catégories de barrières comparatives	Eléments d'appréciation 1= Egale importance ; 3= Légèrement plus important ; 5= Fortement plus important ; 7= Très fortement plus important ; 9= Importance absolue ; 2, 4, 6, 8 =Valeurs intermédiaires.
1	Insuffisance de la quantité de biomasse	Conditions géographiques (accessibilité des lieux de collecte de la biomasse)	/...../
		Utilisation compétitif de la biomasse pour la conservation des terres (fertilisation organique, paillage)	/...../
		Problème de transport de la biomasse	/...../
		Accès à l'électricité de la localité abritant la technologie	/...../
2	Conditions géographiques (accessibilité des lieux de collecte de la biomasse)	Utilisation compétitif de la biomasse pour la conservation des terres (fertilisation organique, paillage)	/...../
		Problème de transport de la biomasse	/...../
		Accès à l'électricité de la localité abritant la technologie	/...../
3	Utilisation compétitif de la biomasse pour la conservation des terres (fertilisation organique, paillage)	Problème de transport de la biomasse	/...../
		Accès à l'électrification de la localité abritant la technologie	/...../
4	Problème de transport de la biomasse	Accès à l'électricité de la localité abritant la technologie	/...../

Annexe 2 : Résultats d'analyse de sensibilité sur les barrières d'adoption de la gazéification

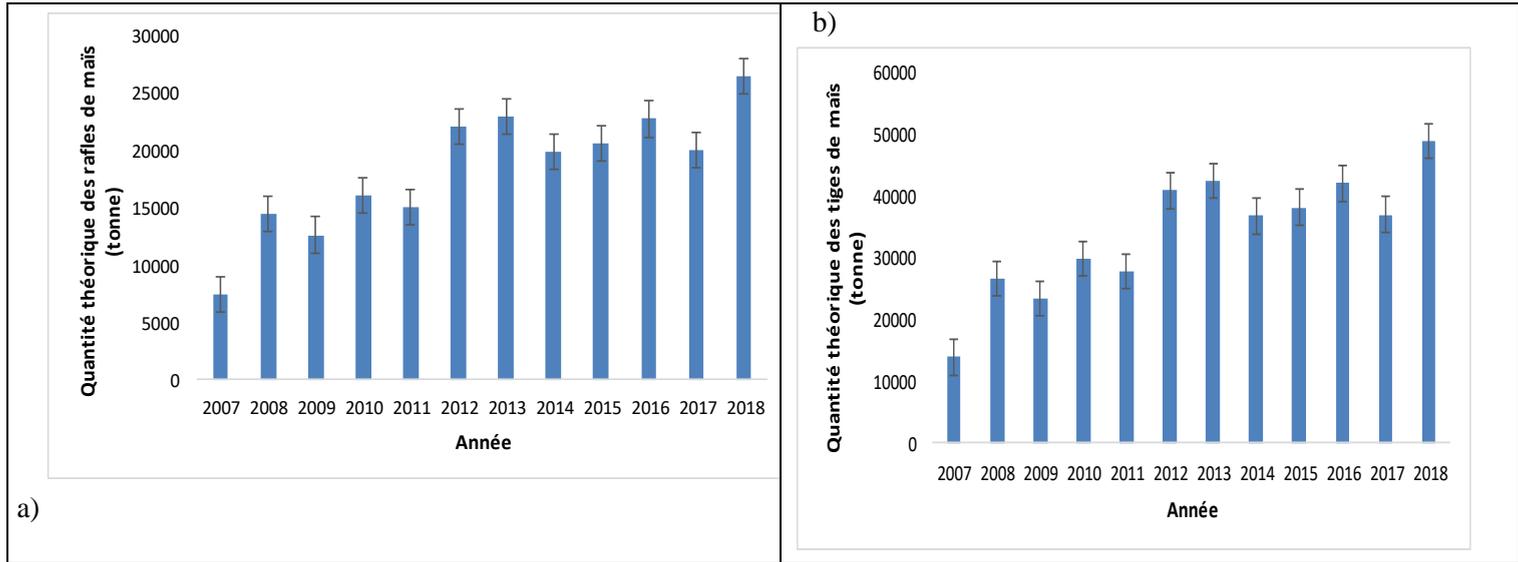
Variation SCO/EG (%)	10	20	30	34,26	40	50	60	70	80	90	100
Variation SCO/EG (Valeur)	0,87	1,75	2,62	3	3,5	4,37	5,26	6,12	7	7,87	8,75
Catégories des facteurs d'adoption de la gazéification											
Techniques	0,218549	0,22510	0,2271	0,2276	0,2280	0,2284	0,2286	0,2287	0,2288	0,2289	0,2289
Économiques et financiers	0,078542	0,07598	0,0738	0,0730	0,0721	0,0709	0,0699	0,0691	0,0685	0,0679	0,0675
Socioculturels et organisationnels	0,267514	0,31081	0,3350	0,3426	0,3510	0,3621	0,3706	0,3770	0,3822	0,3864	0,39
Politiques, gouvernementaux, Institutionnels	0,074841	0,07093	0,0672	0,0672	0,0662	0,0647	0,0636	0,0627	0,0620	0,0615	0,0610
Ecologiques et géographiques	0,360555	0,31716	0,2958	0,2894	0,2825	0,2736	0,2670	0,2622	0,2582	0,2551	0,2525
Sous-catégories des facteurs d'adoption de la gazéification											
Grande taille de la technologie	0,062603	0,06448	0,0650	0,0651	0,0653	0,0654	0,0655	0,0655	0,0655	0,0655	0,0655
Problème de dimensionnement de l'équipement par rapport aux besoins réels des utilisateurs	0,030581	0,03149	0,0317	0,0318	0,0319	0,0319	0,0319	0,0320	0,0320	0,0320	0,0320
Manque de ressources humaines et matérielles	0,125365	0,12912	0,1303	0,1305	0,1308	0,1310	0,1311	0,1312	0,1312	0,1313	0,1313
Coût d'investissement initiaux élevés	0,008469	0,00819	0,0079	0,0078	0,0077	0,0076	0,0075	0,0074	0,0073	0,0073	0,0072

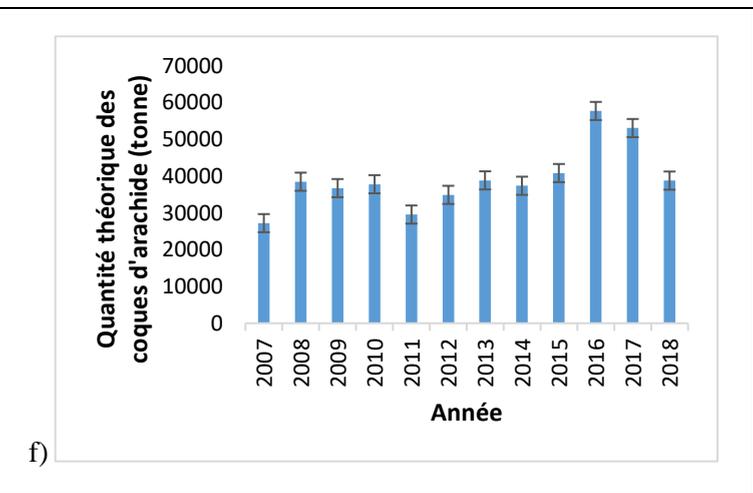
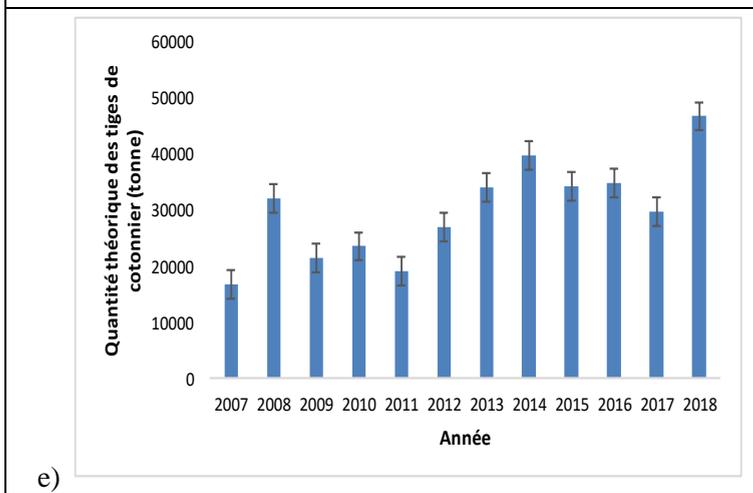
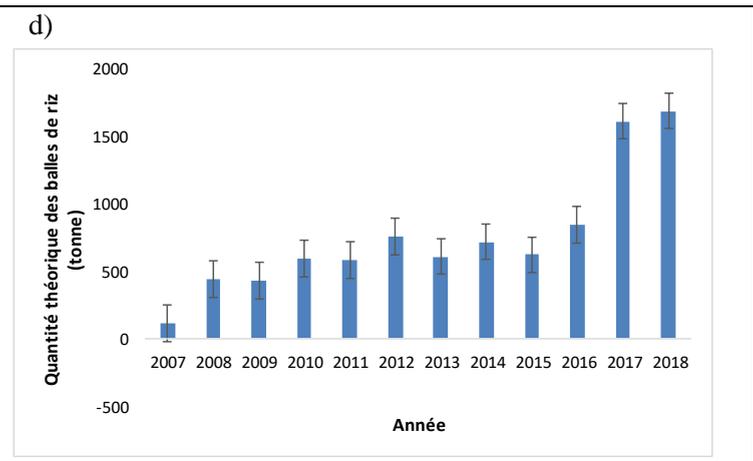
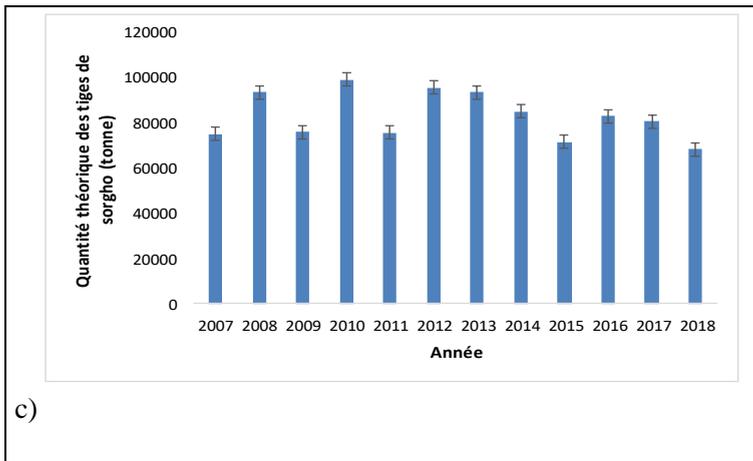
Coût élevé des pièces de rechange	0,009332	0,00902	0,0087	0,0086	0,0085	0,0084	0,0083	0,0082	0,0081	0,0080	0,0080
Absence de mécanisme de financement	0,011404	0,01103	0,0107	0,0106	0,0104	0,0102	0,0101	0,0100	0,0099	0,0098	0,0098
Absence de subventions	0,006866	0,00664	0,0064	0,0063	0,0063	0,0061	0,0061	0,0060	0,0059	0,0059	0,0059
Rentabilité par rapport aux anciennes techniques	0,015788	0,01527	0,0148	0,0146	0,0145	0,0142	0,0140		0,0137	0,0136	0,0135
Insuffisance de ressources financières pour un investissement	0,005535	0,00535	0,0052	0,0051	0,0050	0,0049	0,0049	0,0048	0,0048	0,0047	0,0047
Temps de retour sur investissement élevé	0,012932	0,01251	0,0121	0,0120	0,0118	0,0116	0,0115	0,0113	0,0112	0,0111	0,0111
Prix non concurrentiel de l'énergie	0,008217	0,00794	0,0077	0,0076	0,0075	0,0074	0,0073	0,0072	0,0071	0,0071	0,0070
Manque d'expérience en matière de gazéification	0,054663	0,06351	0,0684	0,0700	0,0717	0,0740	0,0757	0,0770	0,0781	0,0789	0,0796
Manque de sensibilisation des utilisateurs	0,045664	0,05305	0,0571	0,0584	0,0599	0,0618	0,0632	0,0643	0,0652	0,0659	0,0665
Manque de prise en compte du genre	0,027705		0,0346	0,0354	0,0363	0,0375	0,0383	0,0390	0,0395	0,0400	0,0403
Insuffisance de formation des utilisateurs	0,078658	0,03219	0,0985	0,1007	0,1032	0,1064	0,1089	0,1108	0,1123	0,1136	0,1146
Manque d'implication des acteurs clés et de coordination entre les différentes parties prenantes	0,060824	0,09139	09	59	07	9	91	63	95	32	73
Manque d'engagement politique	0,00965	0,07066	0,0761	0,0779	0,0798	0,0823	0,0842	0,0857	0,0869	0,0878	0,0886
Absence de politique gouvernementale adéquate	0,004941	0,060824	9	74	14	07	45	79	27	11	68
		0,00914	0,0087	0,0086	0,0085	0,0083	0,0082	0,0080	0,0080	0,0079	0,0078
		0,00965	7	94	74	4	54	09	97	05	3
		0,00468	0,0045	0,0044	0,0043	0,0042	0,0042	0,0041	0,0040	0,0040	0,0040
		0,004941	3	03	41	72	77	03	46	99	6

Evaluation des conditions de développement d'une filière de gazéification de biomasse agricole au Burkina Faso

Absence de cadre institutionnel, juridique et réglementaire	0,007268	0,00688	0,0066	0,0065	0,0064	0,0062	0,0061	0,0060	0,0060	0,0059	0,0059
		9	23	33	32	92	82	99	29	72	24
		0,01582	0,0152	0,0150	0,0147	0,0144	0,0142	0,0140	0,0138	0,0137	0,0136
Instabilité politique	0,016695	4	13	06	74	53	01	08	49	19	09
Manque de promotion et d'intérêt par le gouvernement	0,01199	4	26	77	11	8	99	61	46	53	74
Manque de subvention pour la biomasse-énergie	0,017035	6	23	12	75	47	9	94	31	99	86
Appartenance politique des acteurs des projets	0,007262	3	18	28	27	87	77	94	24	68	2
			0,1146	0,1121		0,1060	0,1034	0,1016	0,1000	0,0988	0,0978
Disponibilité de la biomasse	0,13971	0,1229	3	4	0,1095	5	9	1	8	7	5
Accessibilité des lieux de collecte de la biomasse	0,046572	0,04096	0,0382	0,0373	0,0365	0,0353	0,0344	0,0338	0,0333	0,0329	0,0326
		7	09	81	01	51	97	69	62	56	17
Moyens de transport de la biomasse non industriels	0,064599	0,05682		0,0518	0,0506	0,0490	0,0478	0,0469	0,0462	0,0457	0,0452
		5	0,053	51	3	36	51	79	76	13	44
Accès à l'électricité de la localité abritant la technologie	0,109669	0,0899	0,0880	0,0859	0,0832	0,0812	0,0797	0,0785	0,0776	0,0768	
		0,09647	77	27	54	47	36	56	61	06	09

Annexe 3 : Evolution des quantités théoriques pour chaque culture étudiée





Annexe 4 : Productions scientifiques

● **Communications orales**

RESUME

1er Colloque International sur le nexus Eau-Énergie-Alimentation-Habitat « SustainEng 2018 » organisé par 2iE du 12 au 14 décembre 2018.

Titre : Etude des conditions de développement durable d'une filière de gazéification de la biomasse agricole au Burkina Faso

BARRY Fanta; Pr. Igor OUEDRAOGO, Pr. Thomas DOGOT, Dr. Marie SAWADOGO, Dr. Maimouna BOLOGO

Les populations rurales de l'Afrique de l'Ouest dépendent quasi exclusivement de la ressource bois comme source d'énergie, utilisé surtout pour la cuisson des aliments et pour quelques activités de transformation agroalimentaire. Cet usage associé à la fourniture des villes en combustible induit une pression sur le gisement bois. Parallèlement, les activités agricoles mènent à la production de quantités abondantes de résidus (tiges de coton, balle de riz, etc.) sous-exploités. Ces résidus présentent un potentiel énergétique important qui pourrait contribuer au développement rural. Contrairement au bois, ils sont difficiles à exploiter directement. La gazéification est une solution innovante permettant de transformer ces résidus en source d'énergie thermique flexible. Les installations existantes sont peu nombreuses et basées sur des technologies importées mal maîtrisées localement et difficiles à entretenir ou à réparer. Ce qui constitue un verrou important pour le développement de cette voie de valorisation énergétique des déchets agricoles. La présente recherche visera à préciser les conditions à remplir pour développement durable de la filière de gazéification au Burkina Faso. Elle se basera d'abord sur la théorie de la sociologie de la traduction pour analyser les facteurs de blocage et de motivation de l'adoption de la technologie. Puis les méthodes d'analyse structurelle et fonctionnelle permettront d'évaluer les performances des différentes composantes constitutives de la chaîne de valeur de la filière de production d'énergie renouvelable par gazéification de biomasse agricole. Les méthodes d'analyse de cycle de vie environnementale et sociale seront utilisées pour évaluer la durabilité de la filière de gazéification. Les modèles d'aide à la décision seront également utilisés pour soutenir la filière. Les données seront collectées à l'aide de guide d'entretien et de questionnaire auprès des acteurs potentiels connaissant la technologie de gazéification.

Mots clés : Gazéification, développement durable, biomasse agricole, Burkina Faso.

Facteurs clés d'adoption de la gazéification de biomasse au Burkina Faso



Fanta BARRY^{1,2}, Doctorante en 3^{ème} année
Tél : (00226) 77 48 38 92 - Email : fanta.barry@2ie-edu.org

Équipe de direction/encadrement : M. SAWADOGO³, M. BOLOGO/TRAORE³, I. W. K. OUEDRAOGO³, T. DOGOT³

¹Laboratoire de l'Énergie Renouvelable et Efficacité Énergétique (LabEREE), Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (Institut 2iE), Burkina Faso,
²Département de l'Économie et développement rural, Gemboux Agro Bio-Tech, Université de Liège, Belgique

Le secteur de l'agro-industrie burkinabè est moins compétitif sur le marché local que sous régional en partie à cause du faible taux d'accès à l'énergie. Le pays utilise très peu sa potentielle source d'énergie renouvelable pour satisfaire ses besoins énergétiques. La technologie de gazéification se présente comme une solution pertinente pour combler cette demande énergétique mais elle n'a pas connu de succès dans le pays. Cet article analyse les facteurs clés à son adoption. La recherche s'est basée sur le recensement des facteurs potentiels à l'aide des entretiens auprès des utilisateurs de ces technologies et des agents du Ministère en charge des énergies renouvelables. Une analyse des informations recueillies basée sur la méthode AHP a permis de relever les obstacles les plus importants à l'adoption de la technologie étudiée. Au total vingt-sept facteurs ont été recensés puis hiérarchisés en deux dimensions et cinq catégories dont les facteurs techniques ; économiques et financiers ; socioculturels et organisationnels ; politiques, gouvernementaux, institutionnels ; et les facteurs écologiques et géographiques. La catégorie de facteurs socioculturels et organisationnels est ressortie comme étant la plus déterminante dans l'adoption de la gazéification. Cette dernière mérite une attention particulière pour dépasser la phase d'essai de la technologie et espérer son adoption.

Mots-clés : Adoption, Burkina Faso, Gazéification.

Format de la présentation

Type	Communication Orale	Poster	Ma Thèse en 180 secondes	Mon Projet Innovant en 120 secondes
	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Thématique	Climat, Eau et Assainissement	Eco-matériaux de Construction et Durabilité des Ouvrages	Énergies Renouvelables et Systèmes intelligents	
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	





Conditions de développement durable d'une filière de gazéification de la biomasse agricole: cas du Burkina Faso

Faata BARRY^{1,2}, MariemTOMORE¹, Malimoua BOLOGOITRAORE¹, Igor OUBERAGO¹, Thomas DOGOT³
1 Laboratoire d'Énergie Renouvelable et d'Effizienz Énergétique (LABRE3), Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (I2E2), Burkina Faso.
 2 Département de l'Économie et Développement Rural, Centre de Bio-Énergie, Université de Liège, Belgium.
 3 *Correspondence: faata.barry@i2e2.org, faata.barry@i2e2.org, fbarry01@gmail.com

Introduction

Contexte
 Afrique de l'Ouest
 Forte croissance démographique associée à un faible accès aux services énergétiques modernes, soit, seulement 6 pays de la CDEMOA sur les 16 pays ont un taux national d'accès à l'électricité > 30% (CEREEC, 2012).
 Dépendance au bois et au charbon pour la cuisson domestique entraînant une dégradation accrue des forêts (FAO, 2015).
 Existence d'un fort potentiel de résidus agricoles mal valorisés, d'où l'opportunité de convertir cette biomasse en énergie thermique.

Problématique
 La gazéification est un procédé de conversion de la matière solide à base de carbone (charbon, bois, paille, etc.), sous l'effet d'un agent oxydant, en gaz de synthèse ou syngaz, composé d'hydrogène (H₂), de l'oxyde de carbone (CO), de dioxyde de carbone (CO₂) et du méthane.
 Sa vulgarisation se heurte à plusieurs contraintes telles :
 • coûts par rapport à d'autres technologies alternatives ;
 • dimensionnement de l'installation ;
 • mobilisation de la biomasse.

Comment assurer la durabilité de la filière au Burkina Faso?

Objectifs
 • Analyser les facteurs de motivation et de blocage de l'adoption de la gazéification à partir de biomasse agricole ;
 • analyser la chaîne d'approvisionnement en biomasse ;
 • évaluer les déterminants socio-économiques de la durabilité de la gazéification de biomasse.

Conclusion

Les principaux facteurs socio-économiques et environnementaux de blocage de l'adoption de la gazéification au Burkina Faso ainsi que la taille des gisements des résidus agricoles économiquement mobilisables seront connus. Les indicateurs sociaux de durabilité de la filière de gazéification de biomasse et un modèle d'aide à la décision seront également proposés.

Méthodologie

Techniques de collecte des données
 Revue documentaire, visites exploratoires des sites d'implantation des gazogènes, benchmarking, enquêtes par questionnaire et focus groupes à l'aide de guide d'entretien.
Groupes cibles:
 collecteurs, transporteurs, transformateurs de la biomasse et utilisateurs finaux de l'énergie thermique.

Méthodes d'analyse
 1. Analyse de la rentabilité économique et des dynamiques entre les acteurs par l'approche Value Chain Analysis for Development (VCA4D).
 2. Analyse des facteurs de blocage vis-à-vis de la technologie de gazéification de la biomasse
 • Attributs des innovations : avantage relatif, compatibilité, complexité, possibilité d'essai et caractère observable pour comprendre les causes de leur échec.
 • Sociologie de la traduction ou théorie de l'acteur-réseau consistant à mettre en lumière la complexité en reliant les personnes, les objets, les institutions et les organisations (Mahil and Tremblay, 2018).
 3. Analyse de la durabilité sociale de la filière de gazéification de biomasse

Objectifs et champ d'étude

- Caractériser les indicateurs (Formation, santé, sécurité du travail, emplois, etc.) et évaluer les impacts sociaux.
- Publics concernés: agriculteurs directs des gazogènes, autorités locales et administratives.
- Changements d'impacts: Bien-être individuel, consommation, acceptation sociale, etc.

Instrumentation des données

- Collecte des données: données de consommation et d'émission.
- Source des données: Recueil sur-site, experts, recherche bibliographique et base de données des entreprises.

Évaluation d'impacts

- Réduire les consommations et les émissions en impacts sociaux.
- Méthodes des capacités ou capacités.

Adapté à l'extrait de la norme ISO 14040:2006





CONDITIONS DE DÉVELOPPEMENT DURABLE D'UNE FILIÈRE DE GAZÉIFICATION DE LA BIOMASSE AGRICOLE: CAS DU BURKINA FASO

Faata BARRY^{1,2}, MariemTOMORE¹, Malimoua BOLOGOITRAORE¹, Igor OUBERAGO¹, Thomas DOGOT³
1 Laboratoire d'Énergie Renouvelable et d'Effizienz Énergétique (LABRE3), Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (I2E2), Burkina Faso.
 2 Département de l'Économie et Développement Rural, Centre de Bio-Énergie, Université de Liège, Belgium.
 3 *Correspondence: faata.barry@i2e2.org, faata.barry@i2e2.org, fbarry01@gmail.com

Introduction

Au Burkina Faso, faible contexte d'accès à l'électricité des populations rurales, impactant le développement de la transformation des produits agricoles chez les semi industriels traditionnels.
 > Processus de la gazéification: comme solution



> Sa vulgarisation se heurte à plusieurs contraintes dans des pays comme l'Inde, la Chine et surtout des pays africains où elle est encore immature. D'où le questionnement comment assurer la durabilité de la filière dans le cas du Burkina Faso?

Méthodologie

> Techniques de collecte des données: focus groupes à l'aide de guide d'entretien auprès des responsables d'ONG, d'huilleries, des transformateurs/trices de l'ancarde et de riz paddy.
 > Méthodes d'analyse
 • facteurs clés de blocage de la technologie de gazéification de la biomasse par le processus d'hierarchisation analytique (AHP) ;



> rentabilité économique de la gazéification de résidus agricoles.

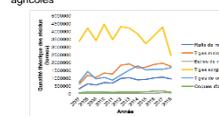
> Analyse de la durabilité sociale de la filière de gazéification de biomasse par la méthode d'analyse des capacités.

Résultats

1) Facteurs clés d'adoption de la gazéification



2) Evolution du potentiel théorique de résidus agricoles



3) Répartition spatiale des résidus agricoles par province



Conclusion

Les barrières clés de l'adoption de la gazéification au Burkina Faso ainsi que les conditions de sa durabilité (la taille des gisements des résidus agricoles économiquement gazéifiables et autres indicateurs sociaux de durabilité) sont connus.



Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement - Rue de la Science - 01 BP 514 - Ouagadougou 01 - BURKINA FASO
 Tel. : +226 50 49 28 00 - Fax : +226 50 49 28 01 - Mail : 2i@i2e2.org - www.i2e2.org

Articles publiés

Article
Key Barriers to the Adoption of Biomass Gasification in Burkina Faso

Fanta Barry ^{1,2}, Marie Seneadiga ³, Mathiasa Thouré/Bolego ⁴, Igor W.K. Ouedraogo ⁵ and Thomas Digoel ⁶

¹ Laboratory of Renewable Energy and Energy Efficiency (LRE3E), International Institute of Water and Environmental Engineering (I2E), Ouagadougou 01 BP 964, Burkina Faso; marie.seneadiga@i2e.uva.es (M.S.); mathiasa.thoure@i2e.uva.es (M.T.B.); igor.w.k.ouedraogo@i2e.uva.es (I.W.K.O.)

² Department of Economic and Rural Development, Conditions Agric. Res. Inst., University of Ulgel, 20222, Cankar, Belgium; thomas.digoel@ugel.be

³ Department of Urban, Social and Territorial Systems (DUST), International Institute of Water and Environmental Engineering (I2E), Ouagadougou 01 BP 964, Burkina Faso; mathiasa.thoure@i2e.uva.es

⁴ Correspondence: thour@i2e.uva.es or mathiasa.thoure@i2e.uva.es (M.T.B.); igor.w.k.ouedraogo@i2e.uva.es (I.W.K.O.)

Abstract: The industrial sector in Burkina Faso faces two significant energy challenges: access to efficient energy resources that are also sustainable. Pyrolysis and gasification are emerging as conversion processes that exploit available agricultural and industrial biomass. Pyrolysis has been adopted successfully, whereas gasification failed without getting beyond the experimental stage. This article assesses potential barriers to the adoption of gasification based on interviews with the stakeholders of the energy sector (owners, NGOs, policy makers). The two pyrolysis are a benchmark to proceed with the barriers to adoption. The hierarchical analysis process (HAHP) method was applied to identify the most significant barriers to the adoption of gasification. Twenty-seven barriers were identified and positioned in two dimensions and five categories: “technical”, “economic and financial”, “social-cultural and organizational”, “political, governmental and institutional”, and “ecological and geographical” barriers. The category of social-cultural and organizational barriers emerged as the most critical in the adoption of gasification. This category deserves special consideration to get past the pilot installation stage and adopting this technology.

Keywords: socio-cultural factors; Analytical Hierarchical Process (AHP); adoption barriers; biomass gasification; Burkina Faso

1. Introduction
1.1. Biomass as a Source of Energy for Agro-Industry in Developing Countries

Biomass fuels are with the world's most widely used energy sources, accounting for more than 60% of primary energy consumption [1]. However, they are sources that are large emitters of CO₂, emissions that have environmental impacts on issues of global warming [2]. With growing concerns about greenhouse gas emissions and climate change associated with the growing scarcity of fossil fuels, renewable energy sources are becoming essential for the world's energy production [3,4]. Biomass is widely used in traditional and modern rural households in most developing countries [5]. Various kinds of biomass are available and their conversion pathways can be improved. Biogas from biomass is available for three-dimensional recovery: the organic fraction of mechanical-solid waste is usually treated by composting or anaerobic digestion [6]. In Africa, the main source of biomass is wood, and in 2010 the total forest stock was 77.93 billion tons, but the associated sustainable wood-pulp extraction is increasing the risk of deforestation in forests [7]. Forest areas are increasingly decreasing due to rising anthropogenic pressure. Forest cover in the Sahelian region decreased from 3.24 million hectares in 2014 to 0.9 million hectares in 2017, i.e., an average decrease of about 60% [8]. Given the sustainability constraints associated with

Received: 15 May 2021
Accepted: 20 June 2021
Published: 30 June 2021

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional issues in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

<https://doi.org/10.3390/su13122216> <https://www.mdpi.com/journal/sustainability>

Energy Conversion and Management: X 1 (2021) 100044

Contents lists available at ScienceDirect
Energy Conversion and Management: X
 Journal homepage: www.elsevier.com/locate/energy-conversion-x

Geographical and economic assessment of feedstock availability for biomass gasification in Burkina Faso

Fanta Barry ^{1,2}, Marie Seneadiga ³, Igor W.K. Ouedraogo ⁴, Mathiasa Thouré/Bolego ⁵, Thomas Digoel ⁶

¹ Laboratory Renewable Energy and Energy Efficiency (LRE3E), International Institute of Water and Environmental Engineering (I2E), Ouagadougou 01 BP 964, Burkina Faso; fanta.barry@i2e.uva.es (F.B.); igor.w.k.ouedraogo@i2e.uva.es (I.W.K.O.)

² Department of Economic and Rural Development, Conditions Agric. Res. Inst., University of Ulgel, 20222, Cankar, Belgium; thomas.digoel@ugel.be

³ Department of Urban, Social and Territorial Systems (DUST), International Institute of Water and Environmental Engineering (I2E), Ouagadougou 01 BP 964, Burkina Faso; mathiasa.thoure@i2e.uva.es

⁴ Correspondence: thour@i2e.uva.es or mathiasa.thoure@i2e.uva.es (M.T.B.); igor.w.k.ouedraogo@i2e.uva.es (I.W.K.O.)

Abstract: The energy production of Burkina Faso generates large amounts of residues that can be used for energy production. In the high crop production areas, people have less access to energy for household use and productive activities. Due to the ecological inefficiency production and use of traditional energy sources, technologies as gasification have been implemented in test areas for productive activities. One of the issues of implementing production in the country is the scarcity of biomass supply. This paper aims at assessing the availability of residues that could be used for gasification. Three levels of generative plant and agro-industrial residues are estimated based on plant, residue rates and crop production. The results show that the theoretical agricultural residue yield is about 8 million tonnes. Sustainable reserves have been estimated in product and facility, human and animal consumption. Only maize cobs and rice hulls are renewable at 70% and 20%, the maximum potential for biomass is 720,289 tonnes of maize cobs and 6497 tonnes of rice hulls. These residues have an energy potential of 84,628 GJ and 202 GJ, respectively. The agricultural residues can therefore contribute substantially to satisfy the biomass needs of the country's agricultural sector.

1. Introduction

Burkina Faso has a low rate of access to energy. This rate is less 1.21% in rural areas in 2017 compared to 9% in urban areas due to the high cost of fuel (about 11). Biomass is degraded locally on household and climate. This income shortage prevents people to a practical decrease of biomass [2]. The forest has been reduced from 11.4 million hectares in 2010 to 0.9 million hectares in 2017, an average reduction of about 60% [2]. Thus, alternative solutions must be found for energy production.

Energy-related CO₂ emissions increased by 6% from 22 Gt in 2015 to 23.15 Gt in 2020 according to current and planned policies [9]. Biomass must decrease to 8.7 Gt in 2050 to be compatible with the 2°C target objective of the Paris Agreement. The share of renewable energy in the total primary energy supply would increase from 14% in 2015 to 67% in 2050 [10]. Sustainable renewable energy sources do not include the traditional use of biomass for cooking and heating, which impact forest health and the environment [1]. The use of modern solid biomass increases by an average of about 3% per year through 2050. In industry, where demand reaches 20 EJ in 2050, solid biomass provides high temperatures heat and can be coupled with agricultural residues in residue conversion. Theoretically, agricultural residues conversion will require new technologies. Biomass gasification is being recognized as a promising technology for the sustainable use of biomass [7,11]. This energy conversion process involves a chain of complex chemical reactions in which large organic molecules are transformed into carbon monoxide, methane and hydrogen, and other flammable gases [12].

Gasification technologies have been used in Burkina Faso to produce heat and electricity, but they have failed [13]. Several studies have analyzed the reasons for the failure of these technologies [11,14]. The

ARTICLE INFO

Keywords: Agricultural residues; Biomass potential; Biomass; Burkina Faso

ABSTRACT

1. Introduction

1.1. Biomass as a Source of Energy for Agro-Industry in Developing Countries

Received: 15 May 2021
Accepted: 20 June 2021
Published: 30 June 2021

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional issues in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

<https://doi.org/10.3390/su13122216> <https://www.mdpi.com/journal/energy-conversion-x>