

A solid red square is positioned to the left of the main title box.

**Caractérisation des performances d'un gazéifieur
pilote pour la production de chaleur
et
Analyse économique et financière d'un projet
d'utilisation chez un artisan en Afrique de l'Ouest.**

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU
MASTER EN INGENIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT

OPTION : ENERGIE / génie énergétique

Présenté et soutenu publiquement le 02/10/2014

Par

Yempabou Yaya Yannick THANOU

Travaux dirigés par : **Dr François PINTA**

Enseignant Chercheur
2iE - CIRAD

Ing Emmanuel N'DJAKOU

Ingénieur de recherche
LBEB

Jury d'évaluation du stage :

Président : Dr. Edem N'TSOUKPOE

Membres et correcteurs : Dr. François PINTA
Ing. Aristide DEJEAN

Promotion [2013/2014]

REMERCIEMENTS

Au terme de mon mémoire, je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à toutes les personnes physiques et morales qui ont contribué à sa réalisation.

Mes remerciements s'adressent à :

- Dr. **Joël BLIN**, responsable du Laboratoire Biomasse Energie et Biocarburant (LBEB), pour m'avoir accueilli dans son laboratoire et permis de réaliser les travaux pour mon mémoire ;
- Mes encadreurs Dr. **François PINTA** et l'ingénieur **Emmanuel N'DJAKOU**, pour m'avoir soutenu tout au long de mon mémoire et qui m'ont inculqué l'investigation de soi au travail ;
- Dr. **Marie SAWADOGO** et Mr **Frédéric TRAORE** qui ont accepté de me recevoir et ont apporté leur contributions en m'éclaircissant sur, respectivement, la logistique de la matière première et l'étude économique.
- Dr. **Yohan RICHARDSON** pour ses conseils persuasifs pendant le déroulement de mes travaux en Laboratoire.

J'exprime ma profonde gratitude à tout le personnel du **LBEB** pour l'assistance qu'ils m'ont apporté durant mes travaux. Merci !!!

Je remercie particulièrement l'ensemble des enseignants chercheurs et ingénieurs de l'UTER GEI du 2iE, pour tout le savoir et l'expérience qu'ils m'ont transmis durant ces cinq laborieuses années d'études.

Je remercie tous ceux que je n'ai pu citer, mais qui ont contribué d'une manière ou d'une autre, de près ou de loin à l'achèvement de ce mémoire.

Je remercie le président du jury et l'ensemble des membres du jury pour avoir accepté de juger ce travail.

DEDICACE

A vous tous qui m'êtes chers, vous que je ne peux jamais remercier :

*En premier lieu à Allah, le tout puissant,
Le miséricordieux, ma source d'inspiration*

*Mes géniteurs, THANOU Ousséini et feu THANOU Fatimata née IDANI,
eux qui depuis les premiers instants de mon existence se sont attelés à mon
éducation au prix de nombreux sacrifices.*

*Mes oncles THANOU Nouhoun et IDANI Seydou qui à divers moments m'ont soutenu
ou continuent de me soutenir d'une manière ou d'une autre*

Mes frères THANOU Harouna, Kamil et Mariam, seule l'union fait la force.

RESUME

La production de chaleur par gazéification de biomasse présente des perspectives intéressantes. La chaleur produite peut être utilisée dans les processus de séchage agricole et agroalimentaire.

L'objectif de ces travaux est de caractériser les performances physiques et énergétiques d'un réacteur pilote d'une capacité maximale de 70 à 100 kW thermique selon la biomasse utilisée : balles de riz ou coques de karité. L'instrumentation du gazéifieur par des sondes de mesure et d'échantillonnage a été effectuée dans le but d'enregistrer en continu les températures, les pressions et la composition des gaz produits. Des bilans précis de matières et d'énergie ont été réalisés pour valider les performances du réacteur et la pertinence des expérimentations. Pour analyser les résultats d'expérimentation, des profils de températures et de compositions de gaz sont présentés et discutés.

Enfin pour mettre les résultats de ces travaux en exergue, deux études technico-économiques ont été réalisées pour évaluer la faisabilité de substituer du Gaz de pétrole liquide (GPL) ou du bois par du Syngaz. La première traite du cas d'une unité de séchage de mangues, la seconde est une unité d'étuvage de riz à l'échelle artisanale au Burkina Faso.

Mots clés : gazéification, caractérisation, pilote, lit fixe co-courant, chaleur, étude microéconomique, produit agroalimentaire, balles de riz, coques de karité.

ABSTRACT

Heat production through biomass gasification has interesting perspectives. The heat produced can be used in the drying process of agricultural products, or food products.

The objective of this work is to characterize the physical and energy performances of a 80 to 100 thermal kilowatt capacity pilot reactor depending of the biomass: rice husks our shea nuts. The instrumentation of the gasifier by probes and sampling was carried out in order to continuously record temperatures, pressures and syngas composition. Accurate assessments of mass and energy balances carried out to validate the performance of the reactor and the relevance of experiments. In order to analyze the experimental results, temperature profiles and gas composition are presented and discussed.

Finally, to highlight the results of these studies, two technical and economical case studies were carried out. First to analyse the substitution of liquid petroleum gas (or of fuel wood) in small (mango drying units, and the second case to substitute fuel wood for rice steaming.

Keywords: gasification, characterization, pilot, downdraft fixed bed, heat, microeconomics analysis, food product, rice husk, shea nut.

LISTE DES ABRÉVIATIONS

2iE : Institut international d'ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

AFD : Agence Française pour le Développement

BAD : Banque Africaine du Développement

CIRAD: Centre de coopération international en Recherche Agronomique pour le développement

GPL : Gaz de pétrole liquide

ISOMET : Innovation dans le SOLaire et METallurgie

LBEB : Laboratoire Biomasse Energie et Biocarburant

LCOE : Coût moyen actualisé de l'électricité

PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur

SONABEL : Société Nationale d'électricité du Burkina

SNV : Organisation néerlandaise de développement

SYNGAZ : Synthétic Gaz

TRI : Taux de rentabilité Interne

VAN : Valeur Actuelle Nette

TEE : Test d'Ebullition d'Eau

UTER GEI : Unité Thématique d'Enseignement et de Recherche Génie Energétique et Industriel

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	0
DEDICACE	1
RESUME	2
ABSTRACT.....	2
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	3
TABLE DES MATIERES	4
LISTE DES TABLEAUX.....	6
LISTE DES FIGURES.....	6
I. Introduction.....	7
I.1. Contexte et enjeux	7
I.2. Problématique	8
II. Objectifs et contenu	9
II.1. Objectifs de l'étude.....	9
II.2. Contenu.....	9
III. Méthodologie	10
III.1. Méthodologie pour l'Etude bibliographique	10
III.2. Méthodologie de caractérisation expérimentale des performances du gazéifieur	10
III.2.1. Matériels et méthodes de caractérisation du gazéifieur.....	10
III.2.2. Méthodologie d'évaluation du bilan matière et énergie.....	12
III.2.3. Bilan énergie.....	14
III.3. Méthodologie d'analyse économique	14
IV. Etude bibliographique	15
IV.1.1. Quelques rappels sur la gazéification	15
IV.1.2. Résultats bibliographiques d'expérimentation de gazéifieur à petite échelle	17
IV.1.3. Quelques réacteurs de gazéification à biomasse existants à travers le monde	18
IV.1.4. Humidité de la biomasse	19
IV.1.5. Composition et température de l'agent gazéifiant.....	19
V. Résultats - Discussions	21
V.1. Caractérisation de la biomasse.....	21
V.2. Pouvoir calorifique	22
V.2.1. Biomasse et résidus carbonés	22
V.2.2. Syngaz	23
V.2.3. Profil des températures	24

V.3. Bilan matière – Bilan énergie	25
V.3.1. Balle de riz.....	25
V.3.2. Coques de karité	27
V.4. Difficultés rencontrées et Propositions de solutions.....	29
VI. Analyse économique et financière	30
VI.1. Etude de cas n°1 : substitution du GPL pour 24 séchoirs ATESTA	31
VI.1.1. Situation de référence	31
VI.1.2. Equipements nécessaires et couts d'investissement.....	32
VI.1.3. Facteur de production et couts de fonctionnement.....	33
VI.1.4. Analyse économique du cout de substitution	35
VI.2. Etude de cas n°2 : substitution du bois pour l'étuvage de riz.....	38
VI.2.1. Situation de référence	38
VI.2.2. Equipements nécessaires et cout d'investissement	39
VI.2.3. Facteur de production et cout de fonctionnement	39
VI.2.4. Analyse économique du cout de substitution	40
VII. Conclusions et perspectives	43
BIBLIOGRAPHIE.....	45
WEBOGRAPHIE.....	46
ANNEXE	47
Annexe 1 : Résultats de caractérisation du gazéifieur alimenté par des balles de riz	47
Annexe 2 : Résultats de caractérisation du gazéifieur alimenté par des coques de karité.....	48
Annexe 3: Fiche récapitulative des données exploitables lors ds manipulations du gazéifieur	49
Annexe 4 : Etude technico- économique détaillée de la substitution du GPL par le Syngaz d'une unité de séchage de mangues (en KFCFA)	51
Annexe 5 : Etude technico- économique détaillée de la substitution du GPL par le Syngaz d'une unité de séchage de mangues (en KFCFA) : Tableau récapitulatif des TRI, VAN obtenus pour les trois scénarios, évalués sur 5 ans	53
Annexe 6 : Etude technico- économique de la substitution du bois de chauffe par le Syngaz (en KFCFA)	54
Annexe 7 : Etude technico- économique détaillée de la substitution du bois de chauffe par le Syngaz d'une unité d'étuvage de riz (en KFCFA) : Tableau récapitulatif des TRI, VAN obtenus pour les trois scénarios, évalués sur 5 ans	56

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Accès à l'électricité dans le monde	7
Tableau 2 : Différentes Réactions de gazéification et leurs enthalpies. (Breault Ronald W., 2010).	16
Tableau 3: Liste exhaustive de gazéifieurs à biomasse installés dans le monde (2000- 2009) (Mongal P, et al., 2011) et (Gérard ANTONINI, et al., 2004).....	18
Tableau 4: Résultats de caractérisation des performances du gazéifieur à la balle de riz	26
Tableau 5: Résultats de caractérisation des performances du gazéifieur à la coque de karité.....	27
Tableau 6: Résumé des difficultés rencontrées et solutions	29
Tableau 7: cout de production de l'énergie nécessaire au séchage par le gaz butane (Sans Consigne)	31
Tableau 8: Récapitulatif des charges fixes.....	33
Tableau 9: Récapitulatif des charges mensuelles de fonctionnement/ séchage	34
Tableau 10: Récapitulatif de l'étude économique (en FCFA) de la substitution du GPL par le Syngaz dans 24 séchoirs ATESTA	37
Tableau 11: Cout de production de l'énergie nécessaire à l'étuvage d'1 t de riz paddy par le bois de chauffe.....	39
Tableau 12: Récapitulatif des charges mensuelles de fonctionnement / étuvage	40
Tableau 13 : Etude économique (en FCFA) de la substitution du bois de chauffe par le Syngaz pour l'étuvage d'1t de riz paddy.....	41

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Gazéifieur pilote et ses points d'instrumentation (source : LIMAN SEYDOU 2013)	11
Figure 2:Algorithme pour la détermination de la masse des résidus carbonés.....	12
Figure 3: Différentes étapes de gazéification (Groupement d'expert Séniors en energie, 2011).....	15
Figure 4: Différentes réactions dans un processus de gazéification. (Bourgeois F. /Xylowatt SA, 2013)	16
Figure 5:Résultats d'analyse immédiate de la balle de riz et de la coque de karité.....	21
Figure 6: Répartition du PCI anhydre des biomasses utilisées et des résidus carbonés issus du processus	22
Figure 7 : Composition chimique du Syngaz.....	23
Figure 8 : Evolution du PCI du Syngaz issu de la gazéification de la balle de riz en fonction du temps	24
Figure 9: profil de température en fonction du temps aux points d'instrumentation du gazéifieur...	25
Figure 10:Séchoir à gaz ATESTA	31
Figure 11 : Schéma synoptique de l'installation du système de séchage des mangues.....	32
Figure 12: Demi-fut métallique pour l'étuvage du paddy (d'après FAO)	38

I. Introduction

I.1. Contexte et enjeux

Ces dernières décennies ont été marquées par l'augmentation spectaculaire des besoins énergétiques et cela est dû à l'accroissement démographique de la population mondiale et des activités économiques.

Plus de 80% de cette demande sont couverts par des énergies fossiles (EIA, 2008). L'utilisation des énergies fossiles est responsable des changements climatiques et face à leur raréfaction et aux coûts élevés de ces énergies, de nouvelles énergies d'origine renouvelable doivent être promues pour satisfaire la demande.

En effet, l'office des statistiques énergétiques du gouvernement américain estimait, en 2011, que la demande énergétique mondiale devrait augmenter de 47% d'ici 2035 (COGITERRA, 2011) et selon les statistiques de (AFD et BAD, 2009), environ 77 % de la population en Afrique subsaharienne n'a pas accès à l'électricité dont 85% en zones rurales.

Le tableau 1 présente l'accès à l'électricité dans le monde

Tableau 1 : Accès à l'électricité en Afrique (*Alliance for rural electrification, 2008*)

	Population sans électricité (en millions)					Taux d'électrification en milieu urbain					Taux d'électrification en milieu rural				
	2002	2005	2008	progression		2002	2005	2008	Progression		2002	2005	2008	Progression	
				2002-2005	2005-2008				2002-2005	2005-2008				2002-2005	2005-2008
Afrique	535	554	589	19	35	62.4	67.9	66.8	5.5	-1	19	19	22.7	0	3.7
Afrique du nord	9	7	2	-2	-5	98.7	98.7	99.6	0	0.9	87.9	91.8	98.2	3.9	6.4
Afrique subsaharienne	526	547	587	21	40	51.5	58.3	57.5	6.8	-1	8.4	8	11.9	0	3.9

Ainsi, l'accès aux services énergétiques par les populations en milieu rural est un défi majeur à relever.

Les populations rurales ont pour principale source d'énergie la biomasse et principalement le bois énergie et le charbon qu'elles utilisent pour satisfaire les besoins domestiques.

L'utilisation de ce type de biomasse a pour conséquence la déforestation d'où la participation à l'avancée du désert en Afrique Subsaharienne. De nouvelles matières premières, présentes en milieu rural, doivent être valorisées pour la production d'énergie.

Dans ce contexte la production de bioénergie par des procédés de conversion modernes, efficaces et adaptés aux déchets de biomasse tels que les résidus agricoles est à encourager.

Toutefois, cette alternative de production d'énergie reste aujourd'hui conditionnée par l'émergence de solutions technologiques permettant de transformer cette biomasse en plusieurs formes d'énergies finales telles que l'électricité, la chaleur ou les carburants, tout en offrant une certaine flexibilité d'échelle de production pour tenir compte de la disponibilité variable de la ressource, comme l'a indiqué (LIMAN A. SAIDOU, 2013). Le défi est aussi et surtout de répondre aux différentes demandes dont la variation du besoin au cours de la journée, et au cours de la saison de production peut aller de 25% à 100% de la capacité installée; comme c'est le cas pour: l'étuvage de riz, le séchage de mangues, le traitement à la vapeur et le séchage des noix de cajoux par exemple.

I.2. Problématique

Une des voies prometteuses de valorisation de la biomasse, de façon décentralisée et efficace, est la gazéification. En effet, de nombreuses technologies ont vu le jour dans le but de valoriser de la biomasse ligno-cellulosique mais ces technologies en Afrique sont en phase de recherche-développement.

Dans le souci de répondre au besoin des populations des milieux ruraux, dans une vision de développement durable, le 2iE et le CIRAD en collaboration au sein de LBEB avec leurs partenaires SNV et ISOMET travaillent à la mise au point d'un gazéifieur pilote pour la production de chaleur. De précédentes études ont été menées sur le gazéifieur pilote dans le but de caractériser ses performances et d'optimiser son rendement en plein régime. Ces expérimentations s'effectuaient sur courte durée de fonctionnement.

Notre présent travail porte sur trois (03) volets :

- Quelles peuvent être ces performances en fonctionnement sur longue période (fonctionnement quasi-continu durant 4 h d'affilées) ?
- Quelles mesures pouvons-nous proposer pour améliorer les performances du gazéifieur ?
- Quelle est l'économie du projet dans un scénario de remplacement du bois-énergie ou du GPL par du Syngaz chez un artisan réalisant du séchage agroalimentaire en Afrique de l'Ouest ?

II. Objectifs et contenu

II.1. Objectifs de l'étude

L'objectif de mes travaux se décompose en deux volets principaux:

- caractériser le fonctionnement du gazéifieur sur période longue au cours de la journée (jusqu'à 8h de manipulation) par la réalisation des tests de performances de l'installation pilote de gazéification de la plateforme thermochimique du LBEB ;
- Proposer les perspectives d'améliorations des performances du gazéifieur pilote ;
- puis de réaliser une étude technico-économique pour déterminer l'intérêt économique et financier de la gazéification de biomasse dans deux cas d'application artisanale en Afrique de l'Ouest.

II.2. Contenu

Le contenu du présent rapport se décompose comme suit :

Après l'introduction et la présentation de la méthodologie utilisée, l'étude bibliographique réalisée sur les expérimentations de systèmes de gazéification de biomasse à petite échelle est présentée.

Le rapport présente ensuite les résultats et discussions de la partie expérimentale réalisée sur la plateforme thermochimique pour caractériser les performances du gazéifieur pilote en régime continu. Des tests de fonctionnement sur longue période de fonctionnement (3 à 8 heures d'affilées) ont été effectués avec deux (02) biomasses différentes : la balle de riz et la coque de karité.

Le soutien des ingénieurs et techniciens de LBEB a été capital dans la réalisation de ces expérimentations et des mesures de caractérisation au laboratoire des échantillons de biomasse et de résidus carbonés issus des gazéifications.

Les résultats recueillis lors de nos expérimentations ont été traités et analysés ; et confrontés aux précédents résultats d'expérimentation effectués sur d'autres gazéifieurs, énumérés dans la revue bibliographique. Les caractéristiques physiques et les performances énergétiques du gazéifieur sont déterminées. Le profil des températures dans le réacteur en fonction du temps est tracé, afin d'analyser les phénomènes prioritaires mis en jeu dans le gazéifieur co-courant. Le profil d'évolution du PCI dans le temps nous permet de discuter de la stabilité de la production du Syngaz.

La dernière partie présente les résultats d'études économiques et financières; les options techniques retenues, les facteurs de production, et les coûts liés ; puis est présentée la partie conclusion et perspectives de l'ensemble du rapport.

III. Méthodologie

III.1. Méthodologie pour l'Etude bibliographique

Une étude bibliographique a été effectuée sur des articles parus récemment (5 dernières années) portant sur des expérimentations de gazéifieur à petite échelle (de l'ordre de 100 à 1000 kWth). Les mots clés utilisés tels que : Expérimentation, Gazéification (Gasification), petite échelle (small scale), balle de riz (rice husk), Analyse et biomasse ont été croisés dans les moteurs de recherche scientifiques comme Elsevier, Science direct ou Google Scholar.

Ces articles ont ensuite été lus et synthétisés en fonction de la pertinence des informations présentées.

III.2. Méthodologie de caractérisation expérimentale des performances du gazéifieur

III.2.1. Matériels et méthodes de caractérisation du gazéifieur

III.2.1.1. Réacteur de gazéification

Le gazéifieur à une forme cylindrique, constitué d'un bâti en acier inoxydable réfractaire de 40 cm de diamètre intérieur est 50 cm de diamètre extérieur et de 120 cm de hauteur. Il est constitué d'une double paroi permettant à l'air de jouer le rôle d'isolation. Il comporte des piquages disposés à des endroits stratégiques permettant le prélèvement des gaz et les mesures de température et de pression. La chambre de combustion est constituée de trois bouches d'allumage permettant d'amorcer le processus.

L'alimentation en biomasse se fait manuellement (de l'ordre de 30 kg/h) par le haut du réacteur. En bas du réacteur, il existe un sas ou zone morte recevant les résidus carbonés issus de la gazéification. Ce dispositif de decendrage est actionné manuellement et permet, grâce à une pelle racleuse permettant l'extraction des résidus de la gazéification.

A la sortie du réacteur, le Syngaz passe par une conduite de prélèvement où il est dépourvu des particules solides, à travers un bocal de décantation, avant d'être envoyés pour analyse.

A l'aval de cette conduite, est fixé un bruleur, qui permet de caractériser les performances de combustion de ce gaz à travers un TEE.

Le gazéifieur est instrumenté par deux (02) souffleurs d'air centrifuges dont l'un est responsable de l'approvisionnement du réacteur en air. L'air est soufflé à l'intérieur de la double paroi du réacteur où il se préchauffe avant d'être injecté dans le cylindre intérieur du réacteur contenant la biomasse et l'autre souffleur envoi de l'air dans l'enveloppe de la zone de réaction ou il se chauffe et à sa sortie est acheminé vers le bruleur afin d'améliorer ses performances.

III.2.1.2. Points de mesures et système d'acquisition de données

L'instrumentation est un élément essentiel du réacteur. La conduite du réacteur et la compréhension des phénomènes mis en jeu font appel à une instrumentation précise en ce qui concerne les températures, les pressions, la composition des gaz et les propriétés du solide (Van de Steene L., et al., 2009). Pour nos expérimentations, nous avons instrumenté le gazéifieur par un système d'acquisition de données (ALMEMO), des sondes thermocouples pour la mesure des températures, un tube de Pitot pour la mesure de pressions et une ligne de prélèvement pour l'échantillonnage des gaz.

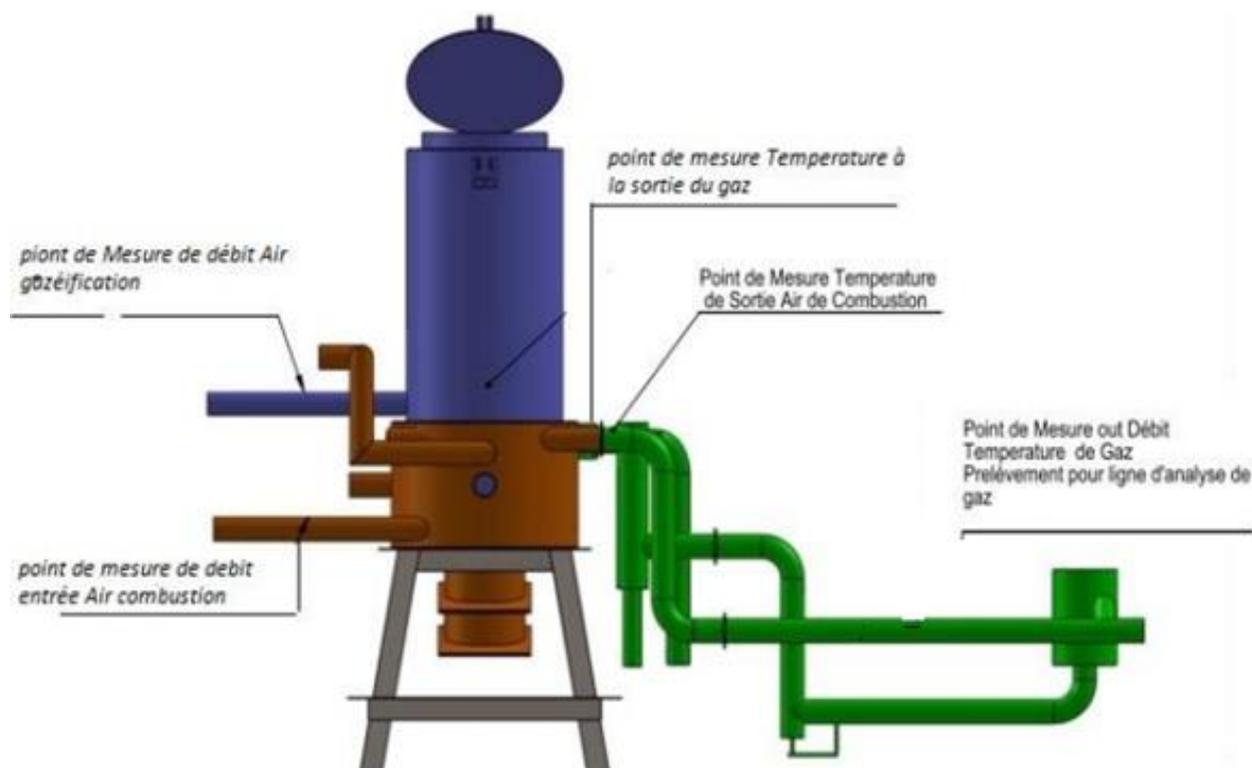


Figure 1: Gazéifieur pilote et ses points d'instrumentation (source : LIMAN SEYDOU 2013)

III.2.1.3. Instrumentation pour la caractérisation des performances et analyse du Syngaz

- Le tube de Pitot et les thermocouples

Le tube de Pitot utilisé permet de déterminer la pression résiduelle (ΔP en bar) dans les différentes conduites, ce qui nous permet de déterminer les différents débits (d'air et du Syngaz) transitant dans les différents conduits. Des sondes thermocouples (de 1mm, de type K) associées aux tubes d'échantillonnages en acier réfractaire de 4 mm de diamètre intérieur ont servi d'instrumentation au gazéifieur. Notamment au niveau de la sortie du Syngaz du gazéifieur, à l'amont du point de

prélèvement de la conduite de prélèvement et aussi sur la conduite d'air de combustion afin de déterminer les différents profils axiaux de température qui y résident.

- Instrumentation pour l'analyse du Syngaz et Principe d'échantillonnage

Toute une instrumentation a été mise en place pour l'échantillonnage du Syngaz ainsi que son traitement. Les matériels utilisés sont mentionnés à la page 42 du rapport de (LIMAN A. SAIDOU, 2013). Les Gaz de Synthèse sont dans un premier temps refroidis à température proche de zéro dans 4 bulleurs contenant 250 ml d'isopropanol dans lesquels les condensables sont séparés. Les gaz secs traversent successivement un filtre, un piège à eau et sont enfin injectés dans un analyseur de gaz (Micro GC) pour analyse via le logiciel Galaxie.

III.2.2. Méthodologie d'évaluation du bilan matière et énergie

III.2.2.1. Bilan matière

Il s'agit de déterminer toutes les caractéristiques physiques, concernant le traitement de la biomasse, qui permettent d'évaluer les performances physiques du gazéifieur co-courant à étudier.

Ces paramètres ont été cités par (LIMAN A. SAIDOU, 2013) (voir page 46).

Pour être plus précis et fournir le maximum d'informations, nous avons été plus explicites et complémentaire quant à la détermination de certains paramètres. Il s'agit de :

- La masse totale de résidus carbonés (en kg) issus de la gazéification :

Elle correspond à la masse totale de résidus carbonés issus des différents tests d'expérimentation.

La figure 2 présente la méthodologie de détermination de ce paramètre :

Démarrage de gazéification	100% de M_{c0} dans la zone morte + M1	Batch 1
Fin de gazéification	$M_{c1} = M_{c0} + M_c B1$	Batch 1
Démarrage de gazéification	$M_{c_{i+1}} (= M_{c1} - M_{c1'}) + M2$	Batch 2
Fin de gazéification	$M_{c2} = M_{c_{i+1}} + M_c B2$	Batch 2
Démarrage de gazéification	$M_{c_{i+2}} (= M_{c2} - M_{c2'}) + M3$	Batch 3
Fin de gazéification	$M_{c3} = M_{c_{i+2}} + M_c B3$	Batch 3
Démarrage de gazéification	$M_{c_{i+3}} (= M_{c3} - M_{c3'}) + M4$	Batch 4
	• • • •	
Démarrage de gazéification	$M_{c_{i+n-1}} (= M_{cn} - M_{cn'}) + M_n$	Batch n
Fin de gazéification	$M_{cn} = M_{c_{i+n-1}} + M_c Bn$	Batch n

Figure 2: Algorithme pour la détermination de la masse des résidus carbonés

La Masse des résidus carbonés est obtenue par les formules ci-dessous :

$$M_{res} = M_{cj} - M_i \text{ si } j = 1 \text{ et } M_{res} = M_{cj} - M_i + \sum_{j=2}^n M_{c'j} - 1 \text{ si } j \geq 2$$

M_{res} : la masse totale de résidus carbonés issu du processus de gazéification ;

M_{cj} : la masse de cendre en fin de gazéification de l'étape j ;

M_i : la masse initiale de cendre introduite dans le gazéifieur ;

M_{c'j-1} : la masse de cendre retirée à chaque fin de gazéification ;

- La définition de la durée de gazéification

C'est le temps écoulé entre l'amorçage du bruleur et le moment où le gaz produit n'est plus inflammable. Pour déterminer cette durée (en min), nous sommes les différentes durées de gazéification des différents chargements (ou batch).

- Le taux de conversion des résidus carbonés (en %) :

Il quantifie le pourcentage de cendres présentes dans les résidus carbonés. Il permet de connaître les performances de conversion du gazéifieur, (MERMOUD, 2006).

$$\chi = \frac{1 - \frac{C_{cendre}^{balle\ de\ riz}}{C_{cendre}^{résidus}}}{1 - C_{cendre}^{balle\ de\ riz}}$$

Avec $C_{cendre}^{balle\ de\ riz}$ le taux de cendre dans la biomasse et $C_{cendre}^{résidus}$ le taux de cendre dans les résidus carbonés.

- Le débit du Syngaz (en Nm³/h) au point de prélèvement :

Correspond au volume de Syngaz en sortie du procédé par unité de temps. Il peut être évalué par la formule ci-dessus, mais aussi par la méthode du traceur, qui consiste à le déterminer à partir d'un composé qui ne réagit pas ou qui se conserve dans les procédés. Par exemple, l'azote étant inerte vis-à-vis des réactions mises en jeu, il est possible de déterminer le débit total de gaz de synthèse en sortie du procédé (ou à l'endroit où est placée la micro-GC) par la corrélation suivante selon (MERMOUD, 2006).

$$Q_{air} * \chi_{N_2}^{air} = Q_{syngaz} * \chi_{N_2}^{Syngaz}$$

Avec Q_{air} le débit d'air de gazéification en Nm³/min, Q_{Syngaz} le débit du Syngaz en Nm³/min, $\chi_{N_2}^{air}$ la fraction d'azote dans l'air (entre 78 et 79%) et $\chi_{N_2}^{Syngaz}$ la fraction d'azote dans le Syngaz (donnée par l'analyse chromatographique).

III.2.3. Bilan énergie

Pour analyser les performances énergétiques du gazéifieur, un bilan énergie a été effectué grâce aux données recueillies lors des expérimentations. Ceux-ci traités, nous permettent de déterminer les paramètres énergétiques du gazéifieur.

Ces différents paramètres ont déjà été décrits par (LIMAN A. SAIDOU, 2013), page 46.

III.3. Méthodologie d'analyse économique

La méthodologie adoptée pour effectuer l'étude technico-économique est la suivante :

Après avoir défini les caractéristiques techniques des différents équipements des systèmes techniques à comparer, nous avons défini nos hypothèses pour les facteurs de productions, les ratios techniques, ainsi que les coûts de mise en œuvre (par exemple, quel est le coût du kilo de coques de karité, la quantité moyenne contenue dans un sac, la distance d'approvisionnement, le coût du transport, etc.).

Les couts d'investissements des différents scénarios (référence et substitution) ont ensuite été déterminés, ainsi que les charges de fonctionnement pour chacun des différents scénarios.

Nous avons construit un tableau de calcul économique permettant de déterminer les cash-flows générés mensuellement et annuellement. Nous avons alors appliqué le calcul d'actualisation, et déterminé les cash-flows actualisés au taux d'actualisation de 12% ; taux recommandé pour des projets de durée moyenne (5 ans) au Burkina.

Puis en sommant ces cash-flows actualisés nous avons déterminés la valeur actuelle nette (VAN) des scénarios de substitution.

Le cash-flow cumulé mensuel des différents scénarios nous permet de déterminer le seuil de rentabilité (quand le cash-flow devient positif). Enfin, le Taux interne de rentabilité des différents scénarios, a été déterminé.

IV. Etude bibliographique

IV.1.1. Quelques rappels sur la gazéification

La gazéification est un processus thermochimique dans lequel la matière carbonée (biomasse sèche) réagit avec des réactifs gazeux oxygénés (oxygène, air, vapeur d'eau) pour la production d'un gaz combustible communément appelé gaz de synthèse ou Syngaz.

L'agent gazéifiant est choisi et son ratio d'équivalence est ajusté pour que les réactions chimiques désirées, responsable de la composition du Syngaz, s'opèrent et permet aussi d'obtenir un rendement de gazéification efficace (Mongal P, et al., 2011).

Le Syngaz est constitué essentiellement de CO, CO₂, H₂ et d'hydrocarbures légers CH₄, C₂H₄ et C₂H₆. Ce processus s'opère grâce à plusieurs réactions chimiques qui s'effectuent successivement sous l'influence de la température.

En pratique la gazéification peut convertir 60 à 90% de l'énergie de la biomasse en énergie dans le Syngaz (Reed Thomas B, et al., 2006).

Le processus de gazéification s'effectue en différentes étapes qui sont toutes liées les unes des autres par des réactions. Le déroulement, la configuration spatiale et temporelle de ces étapes peuvent différer selon le mode d'introduction de la biomasse, l'agent gazéifiant et le type de gazogène (LIMAN A. SAIDOU, 2013).

Les principales étapes sont : Séchage, pyrolyse, oxydation et réduction. Les étapes et réactions de gazéification s'illustrent par les figures 3 et 4.

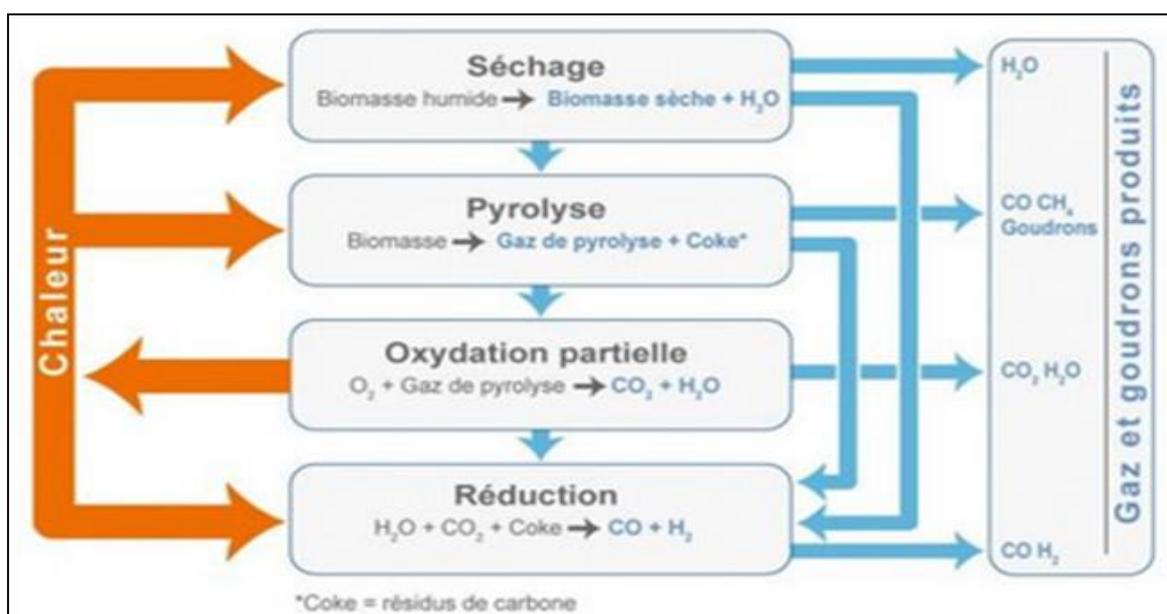


Figure 3: Différentes étapes de gazéification (Groupement d'expert Séniors en energie, 2011)

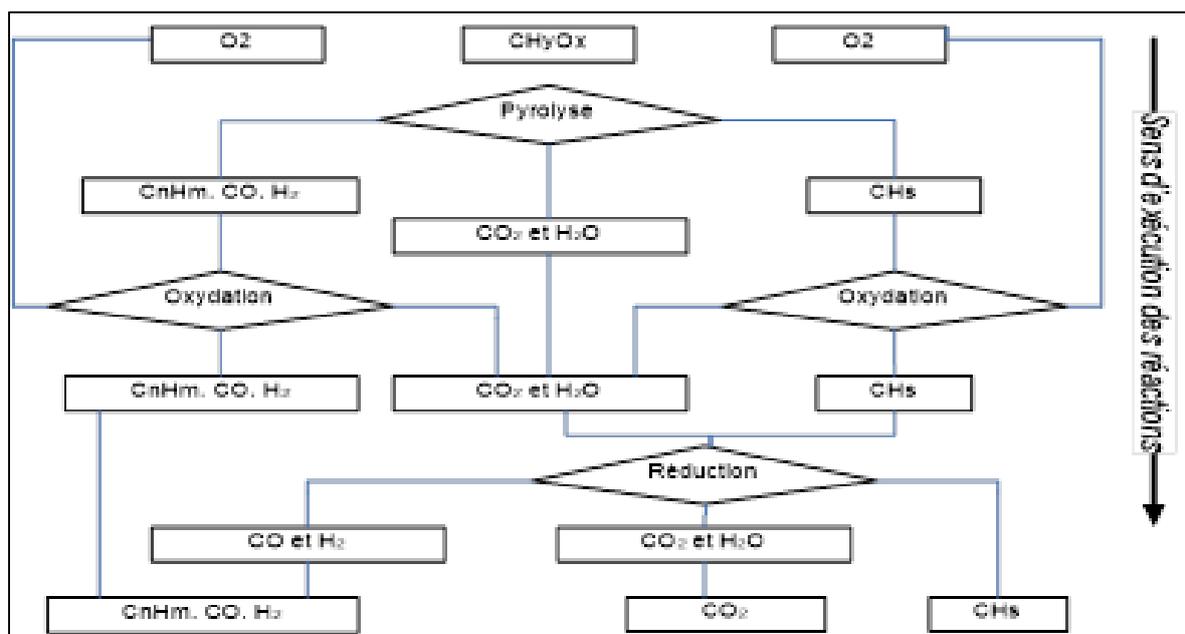


Figure 4: Différentes réactions dans un processus de gazéification. (Bourgeois F. /Xylowatt SA, 2013)

Les réactions de gazéification sont soit endothermiques ou exothermiques. Les principales réactions sont celle de : la gazéification à l'oxygène, la combustion à l'oxygène, la gazéification au dioxyde de carbone (ou réaction de BOUDOUARD), la gazéification à la vapeur d'eau. En mineures proportions, sont associées la gazéification à l'hydrogène, la réaction shift et la réaction de formation de méthane (Mongal P, et al., 2011). Le tableau ci-dessous présente les différentes réactions et leurs enthalpies de réalisation :

Tableau 2 : Différentes Réactions de gazéification et leurs enthalpies. (Breault Ronald W., 2010)

Equation	Nom de la réaction	Enthalpie dégagée ou absorbée
$C + \frac{1}{2} O_2 \longrightarrow CO$	Gazéification à l'oxygène	$\Delta H_{298}^{\circ} = -110.5 \text{ kJ/mol}$
$C + O_2 \longrightarrow CO_2$	Combustion à l'oxygène	$\Delta H_{298}^{\circ} = -393 \text{ kJ/mol}$
$C + CO_2 \longrightarrow 2CO$	Gazéification au dioxyde de carbone ou réaction de Boudouard	$\Delta H_{298}^{\circ} = +172 \text{ kJ/mol}$
$C + H_2O \longrightarrow CO + H_2$	Gazéification à la vapeur d'eau	$\Delta H_{298}^{\circ} = +131.4 \text{ kJ/mol}$
$C + 2 H_2 \longrightarrow CH_4$	Gazéification à l'hydrogène	$\Delta H_{298}^{\circ} = -74.8 \text{ kJ/mol}$
$CO + H_2O \longrightarrow CO_2 + H_2$	Reaction Shift	$\Delta H_{298}^{\circ} = -40.9 \text{ kJ/mol}$
$CO + 3H_2O \longrightarrow CH_4 + H_2O$	Réaction de méthanisation	$\Delta H_{298}^{\circ} = -205 \text{ kJ/mol}$

IV.1.2. Résultats bibliographiques d'expérimentation de gazéifieur à petite échelle

Différentes études expérimentales sur des petites échelles de gazéification ont été effectuées à travers le monde. Cette partie résume les résultats et conclusion de différentes études effectués ayant pour ayant approximativement le même objectif général. Celui-ci se rapprochant le plus du notre.

Différentes méthodologie sont utilisées pour caractériser les performances d'un gazéifieur.

L'une d'elles consiste à modéliser les réactions s'effectuant dans le réacteur via des équations mathématiques et l'autre de le caractériser expérimentalement via l'utilisation de matériels adéquats.

Pour caractériser les performances d'un gazéifieur de façon expérimentale (Van de Steene L., et al., 2009) ont analysé en continu les températures, les pressions et la concentration des gaz produits. Des bilans de matières et d'énergie ont été réalisés pour valider les performances du réacteur et la pertinence des expérimentations. Par ailleurs, la fiabilité du réacteur et des méthodes d'analyse proposées a été confirmé par des bilans de matières et d'énergie très satisfaisants. Ces résultats ont montré qu'une conversion du charbon de 92 % a été atteinte et 80% de la biomasse avait été converti. Suivant la même méthodologie d'expérimentation (LIMAN A. SAIDOU, 2013) a convertit 90% de coques de karité.

De façon similaire que (Van de Steene L., et al., 2009), (Jhon Jairo, et al., 2014) avaient procédé par enregistrement en continu des températures par des thermocouples connectés à un système d'acquisition des données et mesures de pression mesurés à partir de manomètres à tube en U afin de vérifier le régime de fonctionnement. En Etablissant un bilan matière et énergie, dans les conditions (à ratio d'équivalence de 0,24 et une vitesse $0,19 \text{ Nm}^3 / \text{s}$) optimales, les faibles valeurs du PCI du Syngaz et la puissance de gaz ont été obtenus, respectivement $3,78 \text{ MJ/Nm}^3$ et $73,82 \text{ kW}$. Les travaux de (LIMAN A. SAIDOU, 2013) présentaient un PCI du Syngaz de l'ordre de $3.8 - 4.9 \text{ MJ/Nm}^3$ et la puissance de gaz 71.48 kW .

Le programme de test du système de gazéification, présenté par (Jhon Jairo, et al., 2014) a été obtenu à partir de la méthodologie de surface de réponse (RSM) à l'aide du logiciel Statistica 6.0.

Pour s'assurer que la méthodologie de caractérisation citée ci-dessus est applicable, (Yang Weihong, et al., 2006) ont mis en place des équations mathématiques régissant les différentes phases de transformation de la biomasse en gaz et ceux-ci ont été simulé et comparé aux résultats expérimentaux.

Ceux-ci ont présenté quelques légères différences. La confrontation des résultats a permis aux chercheurs de conclure que l'augmentation de la température du gaz d'alimentation entraine une augmentation du taux de gazéification, du taux de front d'allumage, et des fractions molaires de gaz

combustibles (CO , H_2 et C_nH_m), donc un pouvoir calorifique plus élevé est obtenu. Le char est totalement converti lorsque la température augmente entre $800\text{ }^\circ\text{C}$ et $900\text{ }^\circ\text{C}$.

Le plus grand pourcentage en H_2 (51.02 mol%) et le meilleur rendement de production de Syngaz a été obtenu à une température de $900\text{ }^\circ\text{C}$. Les résultats d'expérimentations de (Niladri Sekhar, et al., 2002) ont montré qu'il existe une température critique au-delà de laquelle le préchauffage de l'air n'est plus efficace si le but est de maximiser le rendement en produit gazeux.

IV.1.3. Quelques réacteurs de gazéification à biomasse existants à travers le monde

Un recensement des gazéifieurs co-courant existants a été effectué. Malheureusement il n'existe aucune base de données sur des installations récentes de ces équipements.

Nous avons retrouvé quelques-uns et ceux-ci sont récapitulés dans le tableau 3 en fonction du pays d'origine, de leurs années d'implantation et de la biomasse utilisée.

Tableau 3: Liste exhaustive de gazéifieurs à biomasse installés dans le monde (2000- 2009) (Mongal P, et al., 2011) et (Gérard ANTONINI, et al., 2004).

Pays	Année	Nom du site	Matières premières	Agent gazéifiant	Applications
Allemagne	2000	GNS-AHT, Halle Saale-Lochau	Bois de démolition, bois	Air	Turbine à gaz Electricité
	2000	BEV-Domsland Domsland, Eckenforde			
	2001	Elbe-Elster Holzkraft AG 04910 Elsterwerda	Bois propre, bois de démolition, déchets de bois, morceau de bois	Air	Electricité + Chauffage
	2001	Elbe-Elster Holzkraft AG 04910 Elsterwerda	Résidus agricoles, charbon de bois, bois propre, bois de démolition, collectes herbacées, Balle de riz, Paille, déchets de bois, morceaux de bois	Air	Electricité + Chauffage
Danemark	2001	Ansager Ansager (Central Jutland)	Résidus agricoles	Air	
Brésil	2003	Brazilian BIGCC plant	Biomasse	Air	électricité

USA	2003	Calla GCC plant	Biomasse	Air	électricité
	2004	-	Biomasse	Air	électricité
Canada	2000	MSW plant	Biomasse	Air	Electricité
Inde	2003	-	Résidus agricoles	Air - vapeur	chauffage
Australie	2001	Harald Feichter reibacherstrasse 14, Lanskron	Ecorce, bois propre, paille, déchets de bois, morceaux de bois	Air - Vapeur	Electricité + Chauffage
	2001	Nahwärmeverband ,Pischeldorf			
Pays bas	2000	AMER Power Station;Geertruidenberg	Bois de démolition, Ecorces, Résidus agricoles, pailles	Air - Vapeur	Electricité + Chauffage
	2002	Bioelettrica Cascina (near Pisa,Italy)	Bois de démolition, Ecorces, Résidus agricoles, pailles	Air - Vapeur	Electricité + Chauffage
Suède	2008- 2009	CHRISGAS Project	Biomasse	Air - vapeur	H 2
France	2008	Gazéificateur Plateforme biomasse énergie du Cirad	Bois et Résidus agricoles	Air	chauffage

IV.1.4. Humidité de la biomasse

Une teneur en eau maximale de 25% est recommandée pour les gazéifieurs de type co-courant. Rappelons que la quantité d'eau présente dans la biomasse doit réagir dans la réaction de la vapeur d'eau. Nous utiliserons des biomasses ayant une teneur de l'ordre de 10% qui correspond à l'état d'humidité de la biomasse stockée au magasin du LBEB.

IV.1.5. Composition et température de l'agent gazéifiant

En gazéification, différents agents oxydants (air, eau, oxygène ou dioxygène) peuvent être utilisés. Le phénomène de gazéification est efficace pour des agents gazéifiant ayant un pourcentage d'O₂ élevé. Certaines réactions de gazéification auront plus ou moins lieu suivant la nature de l'agent gazéifiant utilisé et de son débit, ce qui influencera la composition du Syngaz (Gérard ANTONINI, et al., 2004). Dans notre étude, nous allons gazéifier à l'air qui est le plus facile à mettre en œuvre.

L'utilisation d'agents gazéifiant à haute température (air / vapeur) lors du processus de gazéification a été prouvée plus intéressante car elle présente de nombreuses caractéristiques supérieures à celles de la gazéification conventionnelle à basse température (Yang Weihong, et al., 2006). Dans les processus d'optimisation des réactions de gazéification, préchauffer l'air de gazéification conduit à de meilleurs résultats si le but de la gazéification est de maximiser le rendement en produits gazeux mais les expériences de (Niladri Sekhar, et al., 2002) ont montré qu'il existe un seuil au-dessus duquel, le préchauffage de l'air n'est plus efficace (900°C). Il s'agit de la température de l'air critique T_r . Cette température est commune dans les différents étages de gazéification.

Pour cette étude, la température de gazéification est la température ambiante, variant de 25 à 40°C.

V. Résultats - Discussions

V.1. Caractérisation de la biomasse

Pour cette étude, deux biomasses ont été utilisées : la balle de riz et les coques de karité. Pour la caractérisation de chaque biomasse, trois échantillons ont été prélevés et analysés dans le but de vérifier la répétabilité des résultats. Les pourcentages des matières volatiles, des matières minérales et le taux de carbone fixe ont été déterminés sur la masse sèche de la biomasse.

- Balle de riz et coques de karité

L'analyse immédiate de la biomasse étudiée a été effectuée au LBEB. La teneur en eau de la balle de riz et de la coque de karité est respectivement 8.5% et 4.1%. Les autres constituants de ces biomasses ont été déterminés sur masse sèche et les résultats sont résumés dans les figures ci-dessous :

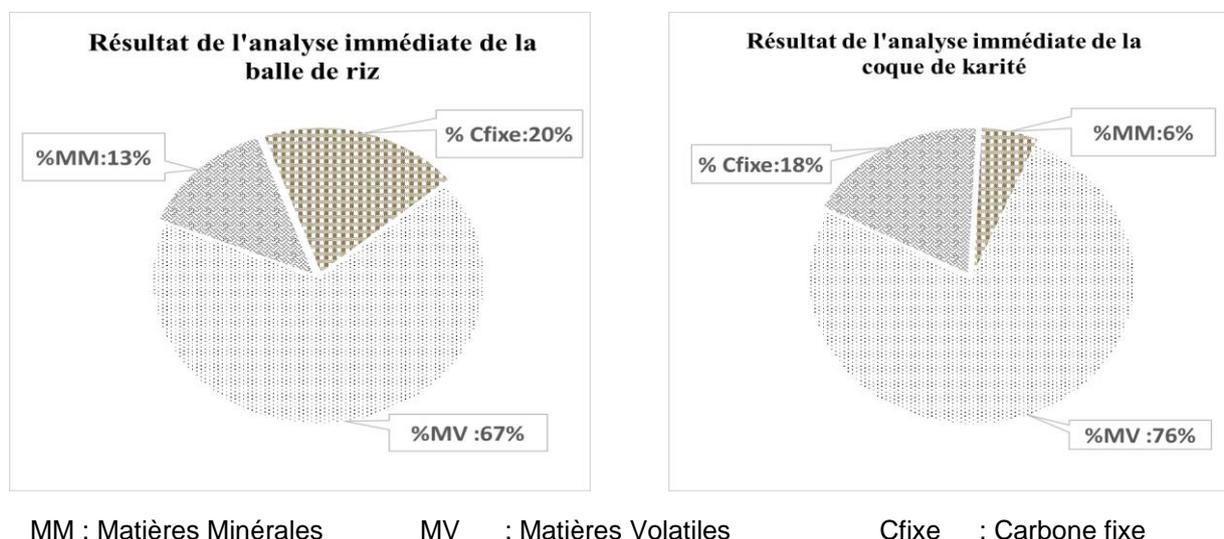


Figure 5: Résultats d'analyse immédiate de la balle de riz et de la coque de karité

Ces résultats d'expérimentations montrent que la balle de riz est assez sèche et présente un taux de carbone fixe et de matières volatiles intéressants. Cette faible teneur en eau (8.5%) nous indique que la réaction de gazéification à la vapeur d'eau et de shift n'influence pas de façon significative la composition du Syngaz.

Le taux élevé en matière volatile (67.3%) est favorable au gazéifieur co-courant, les composants étant responsables de la réaction de formation d'hydrocarbures, qui est exothermique, contribue à améliorer l'auto-combustion de la biomasse donc accroît le rendement physique du gazéifieur. La balle de riz est donc favorable au processus de gazéification downdraft (co-courant) mais la teneur élevée en matière minérales (ici 13%, mais parfois jusque 20%) réduit le pouvoir énergétique des balles de riz.

Concernant les coques de karité, les résultats de l'analyse immédiate présentent une faible teneur en eau de 4.1%. Elles présentent des proportions en matière volatile élevée de 76,2%, un taux en matière minérale assez faible de 5.6% ; et un taux de carbone fixe de 18.2%.

Comme la balle de riz, cette biomasse est favorable à la gazéification en lit fixe co-courant, mais présente des performances supérieures à travers son taux de matières volatiles et taux de carbone fixe plus élevés. Le faible taux de matière minérale nous indique qu'en pratique la biomasse devrait être très bien convertie. Ce qui nous permet de déduire que les coques de karité devraient présenter des meilleures performances en gazéification que les balles de riz.

V.2. Pouvoir calorifique

V.2.1. Biomasse et résidus carbonés

Le pouvoir calorifique permet de déterminer le potentiel énergétique disponible dans la biomasse. Il correspond à la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète, sous pression atmosphérique, d'une unité de masse de combustible.

Les résultats des mesures réalisées au laboratoire sur des échantillons issus de nos expérimentations sont présentés dans la figure 6 :

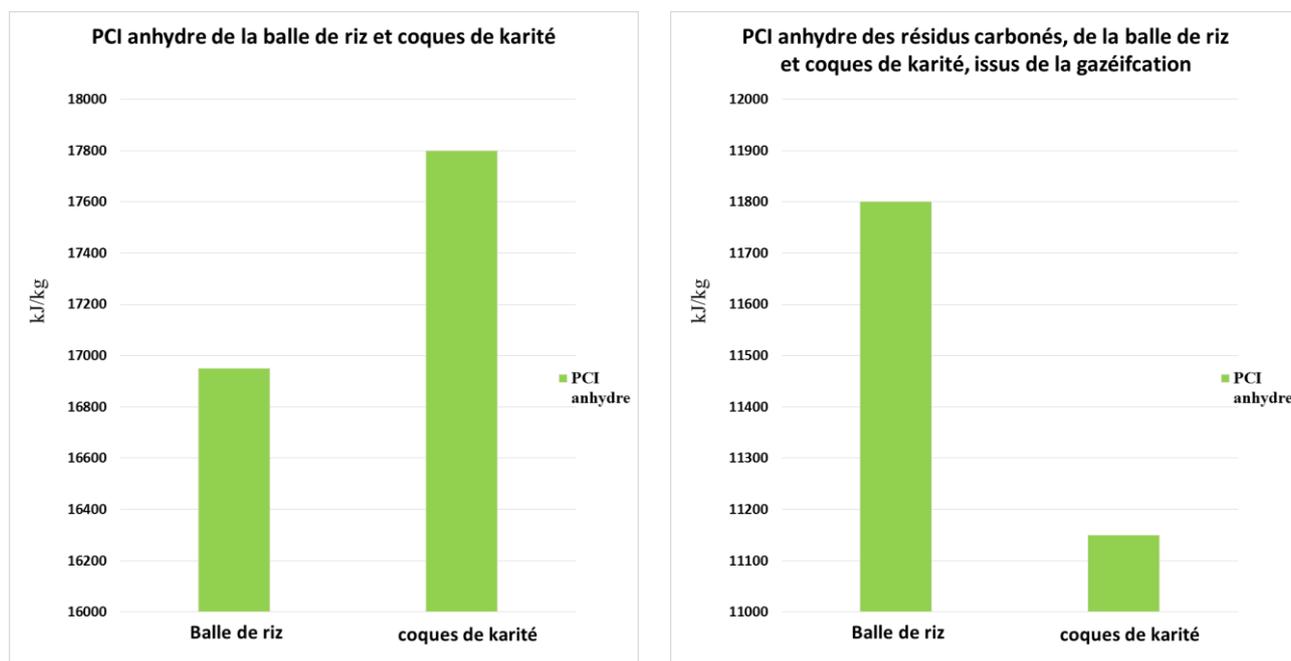


Figure 6: Répartition du PCI anhydre des biomasses utilisées et des résidus carbonés issus du processus

- PCI de la balle de riz et des coques de karité

Les résultats de la détermination du pouvoir calorifique présentent un PCI anhydre de 17Mj/kg pour la balle de riz. Elle présente un PCI élevé par rapport à celle utilisée par les prédécesseurs, son PCI brut (à l'état humide) est de l'ordre de 16MJ/kg contre 14MJ/kg pour les travaux de Liman en 2013,

cela s'explique par le temps de séchage plus important du stock de biomasse et la teneur inférieure en matières minérales trouvée.

Quant aux coques de karité, les résultats de la détermination du pouvoir calorifique présentent un PCI anhydre de 18MJ/kg conforme à ce qui avait été trouvé par Liman, 2013.

- Résidus carbonés des balles de riz et Coques de karité

La détermination du PCI des échantillons de résidus carbonés (matières minérales et carbone non converti) de balle de riz (12MJ/kg) et de la coque de karité (11MJ/kg) nous indique qu'il existe encore un potentiel énergétique. Vu la quantité d'énergie encore disponible dans la biomasse gazéifiée, on pourrait donc dire que le processus de gazéification convertit partiellement la biomasse en Syngaz. Le taux de conversion des résidus carbonés nous en dira plus sur les performances de conversion du gazéifieur.

V.2.2. Syngaz

Le PCI du Syngaz est fonction des proportions de ses composants chimiques. La figure ci-dessous présente l'allure des proportions des composants chimiques du Syngaz dans le temps. La discontinuité des courbes de composition chimique du Syngaz (fig.7) et du PCI (Fig.8) s'explique par le fait que le gazéifieur fonctionne en discontinu

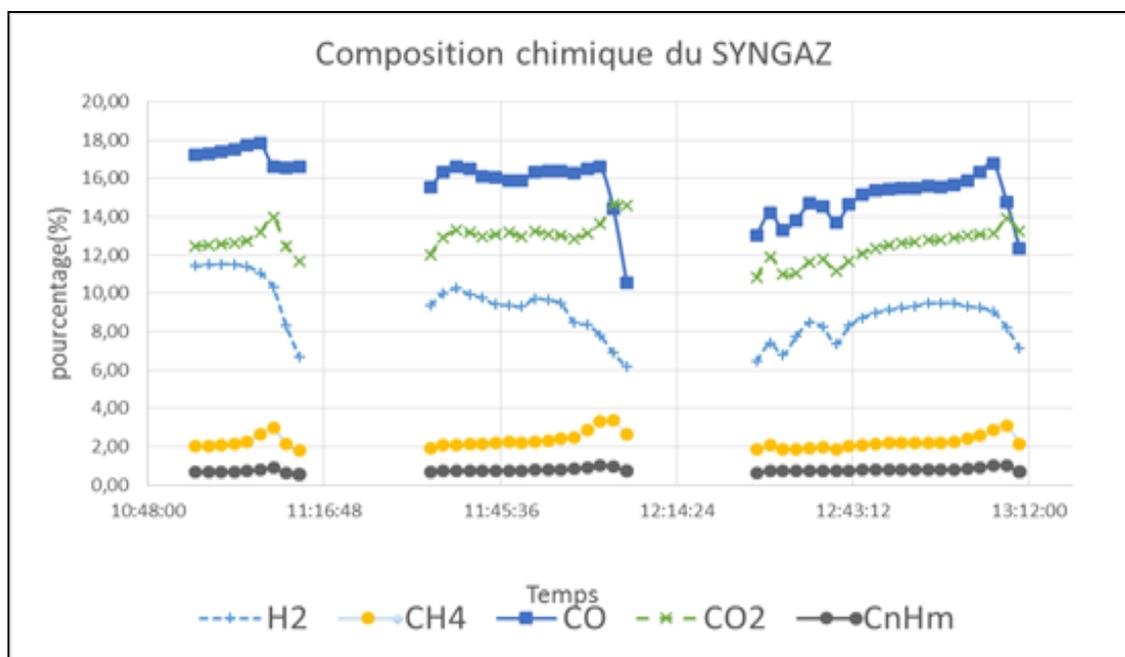


Figure 7 : Composition chimique du Syngaz

On constate ici que la teneur en H₂ est inférieure à la normale (15%). On pourrait donc dire que le fonctionnement lors de nos expérimentations a altéré la production du H₂. Ce qui nous indique que certaine réaction n'ont pas eu lieu de façon significative (notamment la réaction de vapo-gazéification et de shift).

Pour remédier à cela, une des solutions serait de déterminer dans quelles conditions optimales les réactions citées ci-dessus ont elle lieu et l'autre de changer la nature de l'agent gazéifiant. En effet, les études de (Gérard ANTONINI, et al., 2004), ont démontré que suivant la nature de l'agent de gazéification utilisé et de son débit, certaines des réactions prendront plus ou moins d'importance et pourront influencer la composition du gaz produit.

. Le Syngaz produit a un PCI volumique moyen de 4.3MJ/Nm³ce qui le classe parmi les gaz pauvres (4<PCI<7 en MJ/m³) (TAGUTCHOU, 2001) Ce faible PCI s'explique par la présence en faible quantité des composants les plus énergétiques (CO et H₂). La figure 8 présente l'évolution du PCI du Syngaz issus de la gazéification de la balle de riz dans le temps.

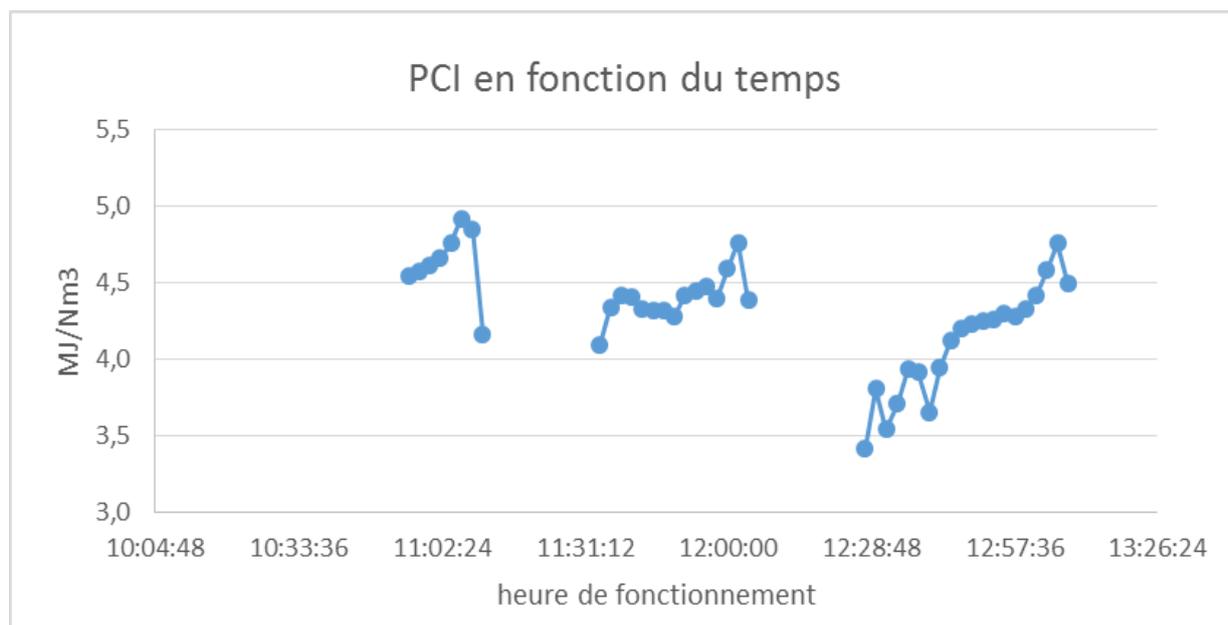


Figure 8 : Evolution du PCI du Syngaz issu de la gazéification de la balle de riz en fonction du temps

V.2.3. Profil des températures

La température du réacteur a une influence significative sur les compositions du Syngaz. Selon les études de (Yu Feng, et al., 2011) pour une température qui augmente de 700 °C à 900 °C, le contenu H₂ augmente de façon significative de 23,35% à 51,02% et le CO₂ passe de 20,96 % à 27,35% (hors teneur en azote de l'air).

Le profil des températures indique une température moyenne à la sortie du réacteur de l'ordre de 430°C. L'air d'appoint de combustion circulant entre les deux enveloppes, jouant le rôle d'isolant thermique, s'échauffe jusqu'à 110°C. Cet air préchauffé pourrait servir d'appoint ou de substitution à l'agent gazéifiant afin de soutenir le processus à franchir efficacement ces différentes étapes. La température moyenne du Syngaz produit à l'entrée du bruleur est de 220°C.

La figure 9 présente le profil des différentes températures prises aux points d'instrumentations du gazéifieur en fonction du temps :

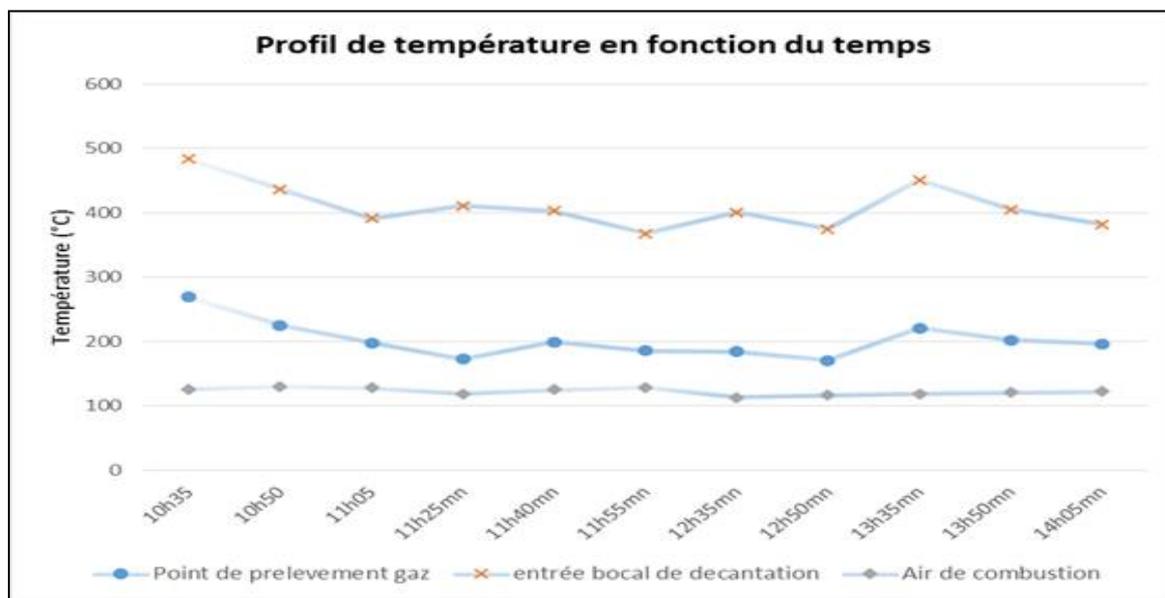


Figure 9: profil de température en fonction du temps aux points d'instrumentation du gazéifieur

- Coques de karité

Le retour d'expériences des résultats fournis par les études faites antérieurement sur le pilote de gazéification nous indique que les performances du Syngaz ne sont pas significativement différentes. En effet, les tests menés par (LIMAN A. SAIDOU, 2013) montrent un pouvoir calorifique de gaz sec variant entre 4.3 MJ/kg et 5.7MJ/kg pour un débit du Syngaz variant entre 1.37 Nm³/min (opercule souffleur fermé) et 1.47Nm³/min (opercule souffleur ouvert). En définitive, nous avons confirmé les résultats obtenus précédemment par le LBEB et par Liman 2013.

Pour la suite, nous allons plus nous focaliser sur les performances énergétiques du gazéifieur et proposer des solutions pour augmenter le pouvoir énergétique du Syngaz produit à partir des deux biomasses étudiées.

V.3. Bilan matière – Bilan énergie

V.3.1. Balle de riz

Lors des expérimentations, cinq (05) tests de caractérisation du gazéifieur, en longue période de fonctionnement ont été effectués. Pour des raisons techniques, résumés dans "les difficultés rencontrées" certains n'ont pas été significatifs. Les valeurs moyennes de ces résultats sont récapitulées dans le tableau 4 :

Tableau 4: Résultats de caractérisation des performances du gazéifieur à la balle de riz⁷

Balle de riz	Valeur moyenne		Ecart-type
Masse de la biomasse	kg	70	-
Masse des résidus carbonés	kg	15.25	-
Débit volumique d'air de gazéification	Nm ³ /min	1.10	0.05
Durée de la Gazéification	min	212	-
Débit de la biomasse	kg/h	20	0.54
Energie de la biomasse	MJ	1200	-
Energie du charbon (résidus cendreux)	MJ	247	-
Energie nette consommée	MJ	952	-
PCI du Syngaz	MJ/Nm ³	4,2	2.61
Débit volumique du Syngaz	Nm ³ /min	0.61	-
Energie du Syngaz	MJ	538	-
puissance en entrée (combustible solide)	kW	94	4.71
puissance en sortie (combustible gazeux)	kW	42	0.50
Taux de conversion de la biomasse	%	78	2.21
Taux de conversion des résidus carbonés	%	73	2.21
rendement brut de gazéification	%	45	1.00
rendement net de gazéification	%	62	3.56
consommation spécifique en biomasse du gazéifieur	kg/kWh	0,47	0.01

La masse totale de balle de riz utilisée lors des expérimentations est de 70kg et son potentiel énergétique est de 1200MJ. En fin des expérimentations, une masse totale des résidus charbonnés de 15.25 kg, possédant une énergie de 247MJ, a été récoltée.

Le Syngaz issu de la gazéification transite dans la conduite de prélèvement à un débit volumique de 0.61 Nm³/min et offre une énergie de 538MJ. On note un débit de la biomasse dans le gazéifieur de 20 kg/h pour une consommation spécifique de 0.47 kg/kWh.

Les résultats d'expérimentation présentent un rendement net de gazéification du pilote, en fonctionnement ponctuel de 62%. Ce rendement baisse de 16% lorsqu'il est utilisé continuellement (46%). En plein régime, les performances physiques du gazéifieur baissent. En effet dans ces conditions le débit de la biomasse est de 20Kg/h contre 32kg/h en fonctionnement ponctuel. Le faible débit de conversion de la biomasse pourrait s'expliquer par la faible vitesse d'exécution des réactions. En effet, selon les études de (Gérard ANTONINI, et al., 2004), pour les réactions où le carbone intervient, deux phénomènes supplémentaires peuvent modifier les constantes de vitesse des réactions, l'un lié à la température, l'autre à la nature et la quantité des impuretés.

Les impuretés présentes dans la balle de riz, causées par l'amasement de la poussière sur le temps, ont contribué à réduire cette vitesse de réaction. Le profil des températures présenté dans la figure 9, nous indique une température moyenne de 430°C en sortie dans la zone de réaction. La température dans un processus de gazéification normal étant de l'ordre de 600° à 1000°C, connaître la température dans la zone de réaction pourrait nous permettre de déterminer le niveau atteint pour ce paramètre fondamental influençant les constantes de vitesse des différentes réactions de gazéification.

V.3.2. Coques de karité

Deux tests d'expérimentation à base de coques de karité ont été effectués. Ces résultats présentent une reproductibilité, ce qui nous indique qu'ils sont significatifs.

Le tableau 5 expose ces résultats d'expérimentation du gazéifieur aux coques de karité. Dans la littérature, le PCI du Syngaz issu de la gazéification est de l'ordre de 4.5 MJ/Nm³.

Tableau 5: Résultats de caractérisation des performances du gazéifieur à la coque de karité

Coques de Karité	Valeur moyenne		Ecartype
Masse de la biomasse	kg	123	-
Masse des résidus carbonés	kg	13	-
Débit volumique d'air de gazéification	Nm ³ /min	1,75	0.172
Durée de la Gazéification	min	245	-
Débit de la biomasse	kg/h	30	1.636
Energie de la biomasse	MJ	1928	-
Energie du charbon (résidus cendreux)	MJ	160	-
Energie nette consommée	MJ	1770	-
PCI du Syngaz	MJ/Nm ³	4,5	-
Débit volumique du Syngaz	Nm ³ /min	1,16	-
Energie du Gaz	MJ	1270	-
Puissance en entrée (combustible solide)	kW	131	7.131
Puissance en sortie (combustible gazeux)	kW	86	0.527
Taux de conversion de la biomasse	%	90	2.970
Taux de conversion des résidus carbonés	%		-
Rendement brut de gazéification	%	66	3.417
Rendement net de gazéification	%	79	2.326
Consommation spécifique en biomasse du gazéifieur	kg/kWh	0,35	0.017

La masse totale de coques de karité utilisée lors des expérimentations est de 123kg et son potentiel énergétique est de 1928MJ. En fin des expérimentations, une masse totale des résidus carbonés de 13kg a été récoltée. L'énergie PCI correspondante est de 160MJ.

Le Syngaz issu de la gazéification transite dans la conduite de prélèvement à un débit volumique de 1.16 Nm³/min et offre une énergie de 1270MJ. On note un débit de la biomasse dans le gazéifieur de 30 kg/h pour une consommation spécifique de 0.35 kg/kWh.

Les résultats d'expérimentation présentent un rendement brut de gazéification du pilote de 66%. Les résultats présentés sont plus intéressants que la gazéification à la balle de riz. On peut donc conclure que la gazéification à la coque de karité telle que nous l'avons réalisée est plus adaptée à ce pilote que la gazéification de la balle de riz dans les conditions de nos expérimentations.

V.4. Difficultés rencontrées et Propositions de solutions

Lors des différentes expérimentations, nous avons été confrontés à différentes difficultés. Celles-ci sont résumées dans le tableau ci-dessous et des solutions sont proposées pour y remédier.

Tableau 6: Résumé des difficultés rencontrées et solutions

Difficultés rencontrés	Solutions proposées
Ebullition des ballons contenant le Syngaz : cause probable de chargement en goudrons	Régler la température du bac de condensation à la baisse ou chercher un autre type de fluide condensable dont la température d'ébullition est élevée
Bouchage permanente de la canne de prélèvement	Effectuer une maintenance après chaque manipulation afin de garantir la bonne marche des prochaines manipulations
Problème récurrent pour la mise à feu et l'amorçage de la gazéification	Instrumenter le gazéifieur avec un chalumeau afin de faciliter son amorçage
On constate que le Syngaz n'arrive pas dans la Micro GC pour être analysé cela est sûrement dû au bouchage des tuyauteries et pores par les goudrons	Trouver un moyen de nettoyage du gaz avant les analyses, en utilisant par exemple de la dolomite qui est le plus couramment utilisé
Présence de fumées pendant les expérimentations entraînant des problèmes respiratoires	Orienter les fumées par l'ajout d'une cheminée au système et trouver des masques à gaz pour le personnel effectuant des expérimentations
Décharges, à chaud, compliquées des résidus carbonés	Modifier la zone morte de telle sorte que les cendres puissent quitter la zone morte de façon verticale en manipulant son ouverture par une manivelle
Difficultés de réalisations des expérimentations	Trouver d'autres stagiaires pour aider le stagiaire titulaire responsable des expérimentations
Arrêt fréquent de la flamme du brûleur lors des manipulations	Ouvrir un orifice d'amorçage pendant 40s pour apporter plus d'air et augmenter l'activité de pyrolyse

VI. Analyse économique et financière

La transformation agroalimentaire se caractérise par de nombreuses opérations unitaires réputées énergivores. L'une d'elles, le séchage est une voie de préservation et de valorisation des produits très appréciée mais nécessitant une grande quantité d'énergie. L'accès à l'énergie nécessaire au séchage reste un blocage pour l'émergence des filières agroalimentaires en Afrique de l'ouest.

Sachant que la gazéification est efficace, à de faibles émissions CO₂ et un LCOE compétitif par rapport à la combustion (Breault Ronald W., 2010) , nous étudierons et analyserons les avantages économiques qu'offrent un gazéifieur.

Le gazéifieur étudié a été créé pour répondre au principe de développement durable. Pour mettre en valeur ces principes, une étude technico-économique doit être effectuée afin de déterminer le retour sur investissement de l'utilisation de ce type de gazéifieur.

Pour cette étude, deux cas d'utilisation seront pris en compte :

- gazéification pour remplacer du GPL dans un atelier de séchage de mangue comprenant 24 séchoirs type ATESTA ;
- gazéification pour remplacer du bois dans la production de vapeur chez un atelier artisanal : Etuvage de riz ;

Un gazéifieur doit permettre de maintenir ou de renforcer les capacités de productions de l'unité où il est installé. Pour cette étude, nous évaluerons initialement à 100% des besoins nécessaire au séchage fournis par la gazéification.

Plusieurs scénarios seront analysés pour déterminer la situation la plus économiquement favorable.

Les hypothèses de départ concernant le fonctionnement du gazéifieur sont :

- Energie primaire : balle de riz
- Durée de fonctionnement : 22/24h
- Puissance moyenne : 50 kW_{th}
- Rendement de gazéification : 70%

VI.1. Etude de cas n°1 : substitution du GPL pour 24 séchoirs ATESTA

VI.1.1. Situation de référence

L'unité comporte 24 séchoirs ayant les caractéristiques suivantes :



- Energie : gaz butane
- Durée d'un cycle de séchage : 18 à 20h
- Puissance moyenne : 6 kW_{th}
- durée annuelle de fonctionnement est de 6 à 8 mois.
- Rendement thermique de conversion au bruleur : 90%

Figure 10: Séchoir à gaz ATESTA

Nous considérons que l'installation fonctionne en moyenne 20h/j, 24j/mois et pendant 6 mois correspondant à la période de récolte de mangues dans la région d'Orodara (sud-ouest du Burkina). Chaque séchoir ATESTA, en fonctionnement, consomme une quantité d'énergie journalière nécessaire au séchage de $E = 430\text{MJ}$, en tenant compte du rendement thermique de conversion $E = 480\text{MJ}$. Pour 24 Séchoirs ATESTA identiques, le besoin en énergie sera de 11520MJ.

Pour répondre à ce besoin, le PCI du butane étant de 46MJ/kg, la masse de butane nécessaire est de : 250kg. Nous utiliserons, pour cette étude, des bouteilles de gaz de 12.5kg (Contenant réellement 5kg de gaz butane). L'énergie fournit par une bouteille est de 230 MJ soit la nécessité d'avoir 2 bouteilles de gaz par séchoir.

Le retour d'expérience, des distributeurs de gaz au Burkina Faso, indique que la consigne pour une bouteille de gaz de 12.5kg est de 25.000 FCFA et le remplissage 5.000FCFA.

A raison de deux (02) bouteilles de gaz par séchoir, pour satisfaire le besoin en énergie, l'installation a besoin de 48 bouteilles de gaz. Enfin pour assurer la continuité de service, une réserve de 24 bouteilles sera prise en compte.

Le cout de la consigne des 72 bouteilles s'élève à 1.800.000FCFA.

Tableau 7: cout de production de l'énergie nécessaire au séchage par le gaz butane (Sans Consigne)

	Cout de production de l'énergie nécessaire au séchage(en FCFA) par le gaz butane					
	pour 1 séchoir			pour 24 séchoirs		
	jour	mois	an	jour	mois	an
Energie (En MJ)	480	11520	69120	11520	276480	1658880
Prix en FCFA	10.000	240.000	1.440.000	240.000	5.760.000	34.560.000

Tableau 8: Récapitulatif des charges fixes

Equipements	Qtité	Prix unitaire (FCFA)	Prix totale (FCFA)
Système de gazéification	3	6.000.000	18.000.000
chaudières	3	1.300.000	3.900.000
Echangeurs thermiques à serpentins	24	300.000	7.200.000
Circulateur	3	150.000	450.000
Ventilo-convecteur	24	80.000	1.920.000
Accessoires supplémentaires et main d'œuvre	24	50.000	1.200.000
Local de stockage	1	2.000.000	2.000.000

L'investissement total pour l'adaptation d'un système de gazéification en substitution du GPL est évalué à 34.670.000FCFA.

On considère une durée de vie de l'ensemble des équipements de (05) ans, ça sera donc la durée d'amortissement retenue (Sauf 3 ans pour le parc de batterie d'accumulateur : Scénario 2).

VI.1.3. Facteur de production et couts de fonctionnement

VI.1.3.1. Quantité de balles de riz nécessaire et couts d'approvisionnement

La masse de balle de riz équivalente au besoin en énergie, en substitution de 250kg de gaz butane, est de 720kg (pour un PCI de la balle de riz de 16MJ/kg). En tenant compte du rendement de gazéification et de conversion thermique, la masse réelle totale de balle de riz nécessaire au séchage est de 1200 kg. Soit une quantité mensuelle de 28800kg ou 28.8 t de balle de riz.

Sur le plan national, en moyenne, le prix du kilogramme de balle de riz est de 5FCFA. Pour fournir le volume maximal de chargement, les balles de riz seront empilées dans des sacs modèle100, dont le cout d'achat est de 300 l'unité, à raison de 100FCFA/sac.

D'après l'expérience, au LBEB, un sac modèle100 peut contenir 15kg de balle de riz en moyenne. Une des contraintes majeures de la balle de riz est sa faible densité massique. Le nombre de sac nécessaire mensuellement au remplissage de la balle de riz est de 2000. Pour assurer la continuité d'approvisionnement de la balle de riz, 4000 sacs seront prévus.

En estimant qu'un camion modèle 15 t peut contenir 200 sacs, il transportera à chaque voyage environ 3 t. La quantité mensuelle de biomasse à transporter étant de 29 t, 10 voyages seront nécessaires chaque mois. Compte tenu du tonnage du camion, pour raison économique, un consensus pourrait être arrêté avec son propriétaire afin qu'il loue les 15 t du camion pour 10 t.

En moyenne, au Burkina Faso, le cout du transport s'élève à 50FCFA/T/km. En supposant un point de collecte de la biomasse situé à 150Km de l'usine, le cout du transport s'élève à 500.000FCFA.

VI.1.3.2. Besoin en personnel, Entretien et maintenance des équipements

On suppose que chaque gazéifieur aura un technicien responsable de son fonctionnement et de sa maintenance. Chacun des techniciens a un salaire mensuel de 150.000FCFA.

On considère le cout annuel des entretiens et maintenance annuels équivalent à 6% du montant des investissements initiaux. Ce montant correspondant à 2.080.200FCFA.

VI.1.3.1. Electricité

Les circulateurs placés entre chaque chaudière et chaque point de distribution vers les séchoirs ont une puissance de 700W chacun. Leur fonctionnement requiert une énergie de 42 kWh par jour.

Les Ventilateurs convecteurs intégrés à chaque séchoir ont une puissance unitaire de 100W. Leur fonctionnement requiert une énergie de 48kWh par jour. L'alimentation en air de chaque gazéifieur est assurée par deux souffleurs de 250 W chacun. Les deux souffleurs, par gazéifieur, requièrent une énergie de 10 kWh par jour. Ils seront alimentés soit :

- Scénario 1 : par le réseau SONABEL dont le prix du kWh est de 106FCFA ;
- Scénario 2 : par un système photovoltaïque délivrant l'énergie nécessaire coutant environ 5.800.000FCFA et 10000FCFA/mois pour la maintenance des équipements ;
- Scénario 3 : par un groupe électrogène de 350.000FCFA, fonctionnant à l'essence 750F/l, ayant une consommation spécifique de 0.2l/kWh.

Tableau 9: Récapitulatif des charges mensuelles de fonctionnement/ séchage

Charges	unité	Quantité	Prix unitaire (FCFA)	Prix totale (FCFA)	
Technicien	-	3	150.000	450.000	
Balle de riz	kg	28.800	5	144.000	
Achat des sacs ⁽¹⁾	-	4000	250	1.000.000	
conditionnement	sac	2000	100	200.000	
Entretien et maintenance	-	1	346.700	346.700	
Location véhicule de transport	-	10	500.000	5.000.000	
Electricité	Réseau	kWh	2880	106	306.000
	P.V ⁽²⁾			-	5.800.000
	G.E			150	432.000
Cout du groupe électrogène	-	1	1.200.000	1.200.000	

(1) juste le premier mois.

(2) Plus d'investissement après le premier mois, seulement 10.000FCFA pour la maintenance.

VI.1.4. Analyse économique du cout de substitution

❖ Situation de référence : S_R

- Investissement initial I_R : 72 bouteilles de gaz. Montant total de 1.800.000FCFA
- Charges de fonctionnement mensuel S_R :
 - ✓ Achat de gaz butane : 5.760.000FCFA
 - ✓ Cout du transport pour réapprovisionnement : 576.000FCFA

Soit un montant total de 6.336.000FCFA.

❖ Scénario 1: S_1

Investissement initial S_1 (IS_1)

- ✓ 3 systèmes de gazéification : 18.000.000FCFA
- ✓ 3 chaudières : 3.900.000FCFA
- ✓ 3 circulateurs : 450.000FCFA
- ✓ 24 échangeurs thermiques : 7.200.000FCFA
- ✓ 24 ventilo-convecteurs : 1.920.000FCFA
- ✓ 24 accessoires supplémentaires : 1.200.000FCFA
- ✓ 1 local de stockage : 2.000.000 FCFA

Soit un montant total de 34.670.000FCFA

Charges mensuelle de fonctionnement S_1

- ✓ Balle de riz : 144.000FCFA
- ✓ Logistique d'approvisionnement: 500.000FCFA
- ✓ Entretien et maintenance : 346.700 FCFA
- ✓ Salaire des agents : 450.000FCFA
- ✓ 4000 Sac modèle100 : 1.000.000FCFA
- ✓ Conditionnement : 200.000 FCFA
- ✓ Electricité : 306.000FCFA

Soit un montant total de 2.946.700 FCFA

❖ Scénario 2 : S_2

Investissement initial S_2 (IS_2)

- ✓ 3 systèmes de gazéification:18.000.000FCFA
- ✓ 3 chaudières:3.900.000FCFA
- ✓ 3 circulateurs:450.000FCFA
- ✓ 24 échangeurs thermiques:7.200.000FCFA
- ✓ 24 ventilo-convecteurs:1.920.000FCFA
- ✓ 24 accessoires supplémentaires:1.200.000FCFA
- ✓ 1 local de stockage:2.000.000 FCFA
- ✓ Système photovoltaïque pour l'électricité:5.800.000FCFA

Soit un montant total de 40.470.000FCFA.

Charges mensuelles de fonctionnement : S_2

- ✓ Balle de riz : 144.000FCFA
- ✓ Logistique d'approvisionnement: 500.000FCFA
- ✓ Entretien et maintenance : 346.700 FCFA
- ✓ Salaire des agents : 450.000FCFA
- ✓ 4000 Sac modèle100 : 1.000.000FCFA
- ✓ Conditionnement 200.000 FCFA
- ✓ Maintenance système photovoltaïque : 60.000FCFA.

Soit un montant total de 2.700.700FCFA.

❖ Scénario 3 : S₃

Investissement initial S₃ (IS₃) :

- ✓ 3 systèmes de gazéification : 18.000.000FCFA
- ✓ 3 chaudières : 3.900.000FCFA
- ✓ 3 circulateurs : 450.000FCFA
- ✓ 24 échangeurs thermiques : 7.200.000FCFA
- ✓ 24 ventilo-convecteurs : 1.920.000FCFA
- ✓ 24 accessoires supplémentaires :
1.200.000FCFA
- ✓ 1 local de stockage : 2.000.000 FCFA
- ✓ Groupe électrogène GE : 1.200.000FCFA

Soit un montant total de 35.870.000FCFA

Charges mensuelles de fonctionnement S₃ :

- ✓ Balle de riz : 144.000FCFA
- ✓ Logistique d'approvisionnement:
500.000FCFA
- ✓ Entretien et maintenance : 346.700 FCFA
- ✓ Salaire des agents : 450.000FCFA
- ✓ 4000 Sac modèle100 : 1.000.000FCFA
- ✓ Conditionnement : 200.000 FCFA
- ✓ Carburant et maintenance GE : 342.000FCFA.

Soit un montant total de 2.982.700FCFA.

L'étude économique ci-dessous a pour objectif de faire ressortir certaines grandeurs économiques et certains indicateurs indispensables à l'évaluation d'un projet. Il s'agit des Cash-flows, la VAN, le TRI et le seuil de rentabilité (voir étude détaillée en Annexe 5&6).

Pour atteindre ces objectifs, nous avons évalué les investissements initiaux et les charges de fonctionnement (fixes et variables). Ensuite, en fonction de la durée du projet (05) ans, nous avons évalué les valeurs résiduelles des équipements de l'installation (reste d'amortissement).

Ainsi, les différents cash-flows mensuels générés ont été déterminés. A partir d'un taux d'actualisation de 12%, Nous avons enfin déterminé les valeurs des coefficients d'actualisation $(1+i)^{-k+1}$ ou k étant l'année d'étude : d'où l'obtention de la valeur actuelle nette.

Le TRI étant le taux d'actualisation pour lequel la VAN est nulle, nous l'avons déterminé à partir des cash-flows mensuels générés.

Le tableau 11 présente les résultats de l'analyse économique de la substitution du GPL par le Syngaz dans une usine 24 séchoirs ATESTA.

Tableau 10: Récapitulatif de l'étude économique (en FCFA) de la substitution du GPL par le Syngaz dans 24 séchoirs ATESTA

Scénario	Investissement initial (FCFA)	Charges annuelles (FCFA)	Seuil de rentabilité	TRI (%)	VAN (KFCFA)
Systeme de gazéification de 50kw _{th} + électricité par SONABEL	34 670	2 946	10 mois	21%	49.233
Systeme de gazéification de 50kw _{th} + électricité par modules photovoltaïque	40 470	2 701	10 mois	16%	48.892
Systeme de gazéification de 50kw _{th} + électricité par Groupe électrogène essence	35 870	2 983	11 mois	19%	47.161

Pour comparer les différents scénarios, nous comparons la VAN générée, le TRI et les seuils de rentabilité des différents investissements. Ainsi nous pourrions déduire lequel de ces scénarios propose de meilleures performances économiques.

La rentabilité économique de la substitution du GPL par le Syngaz varie en fonction des différents scénarios d'alimentation électrique des souffleurs. Le cout d'alimentation en électricité des souffleurs est la variante qui influence le plus ce calcul économique.

Ce calcul économique nous indique un seuil de rentabilité atteint la 2^{ème} année de production pour les différents scénarios. L'investissement des scenarios 1, 2 est amortit le 4^{ème} mois de la 2^{ème} année de production avec une VAN et un TRI de, respectivement, 49.232.729 FCFA et 48.891.916 FCFA et 21% et 16% observée en fin d'année du projet.

Objectivement, ces deux scénarios sont rentables puisque leur TRI est supérieur au taux d'actualisation choisit (12%). Vue du coté économique, le scénario 1 présente de meilleures performances car présente une VAN plus importante pour un TRI intéressant.

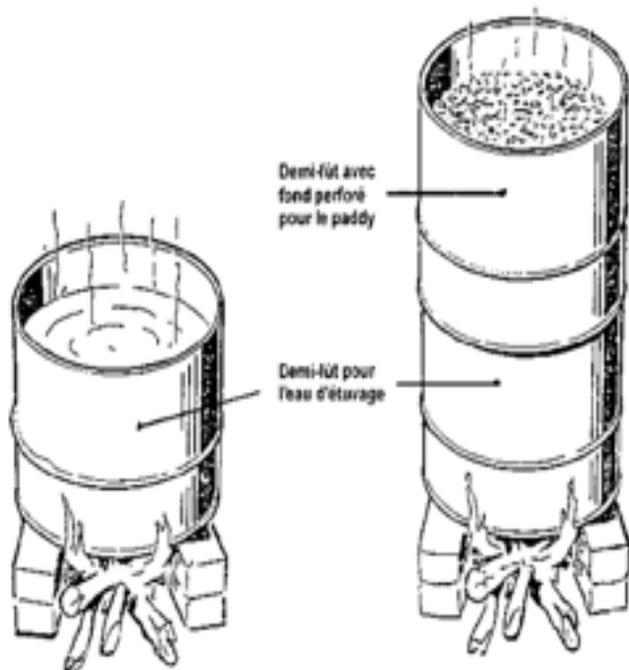
Comparativement au scénario 1, le scénario 3 présente un TRI presque similaire pour une VAN faible. La recherche de profit étant l'objectif principale d'une entreprise, le scénario 1 reste la solution la plus économiquement rentable.

Sur la durée du projet, le calcul économique nous indique que les scenarios les plus favorables sont dans l'ordre le N° 1, N°3 et N°2 car le choix d'une installation photovoltaïque engendre plus de charges de fonctionnement.

VI.2. Etude de cas n°2 : substitution du bois pour l'étuvage de riz

VI.2.1. Situation de référence

La grande majorité du riz consommé dans le monde est du riz « blanc » poli, c'est-à-dire du riz dont on a enlevé l'enveloppe de son. Le riz peut être davantage raffiné grâce au procédé de l'étuvage.



Cette méthode consiste à tremper le riz sous une pression de vapeur d'eau avant de le décortiquer. Dans la plupart des cas, les étuveuses ne disposent pas de véritables foyers et placent simplement les fûts sur trois pierres entre lesquelles elles font brûler progressivement des bûches de bois. Cette pratique conduit à une forte déperdition de chaleur et à une consommation excessive de bois. Afin de réduire les besoins, de nouvelles technologies moins énergivores et répondant au principe de développement durable doivent être développées.

Figure 12: Demi-fut métallique pour l'étuvage du paddy (d'après FAO)

Pour faire face à cette énorme dépense en bois et à ses déperditions énergétiques occasionnées, nous proposerons d'utiliser le gazéifieur pour étuver le riz. Ainsi cette filière pourrait permettre, en boucle fermée, d'être une activité génératrice de revenus en milieu rural.

Nous considérons que l'unité d'étuvage de riz fonctionne en moyenne 20h/j, 20j/mois, 6mois l'année. Nous considérerons une masse de 1 t (tonne) de riz paddy à étuver par jour.

Les études, sur l'étuvage de riz, menées par (Uniterra, Octobre 2013) dévoilent que pour étuver 1 T de riz paddy via les foyers traditionnel, le besoin en bois de chauffe s'élève à $0.43m^3$.

La masse volumique du bois dur, à une teneur en eau de 10%, est de $610kg/m^3$, soit une masse totale de bois égale à 293 kg. Le rendement du foyer traditionnel étant de l'ordre de 15% alors la quantité de bois réellement utilisée est de 1952kg ou 2 t.

La quantité d'énergie nécessaire donc à l'étuvage d'1t de riz paddy par le bois de chauffe (PCI = 18MJ/kg) est donc de 35136 MJ.

.Notons qu'au Burkina Faso, le Kg de bois coute en moyenne 60FCFA. Soit un montant total de 326.540 FCFA par jour.

Tableau 11: Cout de production de l'énergie nécessaire à l'étuvage d'1 t de riz paddy par le bois de chauffe

	Cout de production de l'énergie nécessaire à l'étuvage d'1 T de riz paddy (en FCFA) par le bois de chauffe		
	jour	mois	an
Energie (En MJ)	35136	702.720	4.216.320
Prix en FCFA	117.120	2.342.400	14.540.400

VI.2.2. Equipements nécessaires et cout d'investissement

VI.2.2.1. Description de l'ensemble

Le gazéifieur utilisé a les mêmes caractéristiques que celui présenté dans l'étude précédente. Pour fournir le besoin réel en énergie de 5270 MJ en 20h à partir d'un gazéifieur de 50kW, un seul (01) gazéifieur est nécessaire. Le foyer du gazéifieur sera en contact direct avec le système d'étuvage (demi -fut métallique ou marmite à étuve).

VI.2.2.2. Investissements nécessaires

Pour un tel système, l'investissement principal reste le cout du système de gazéification évalué à 6.000.000FCFA. En évaluant la main d'œuvre et divers à 10% du prix du système de gazéification, on compte un montant de 600.000FCFA pour l'adaptation du système à l'étuvage de riz paddy.

VI.2.3. Facteur de production et cout de fonctionnement

VI.2.3.1. Quantité de balle de riz nécessaire

La masse de balle de riz nécessaire pour substituer l'utilisation de 293kg de bois de chauffe est de 310 kg. Le rendement du foyer étant de 90% alors la masse réelle nécessaire de balle de riz est de 344kg.

Selon (LIMAN A. SAIDOU, 2013), la balle de riz représente 20% de la masse du riz paddy, soit une masse de 200kg de balle de riz issus du processus d'étuvage. Pour pallier au manque de balle de riz, fournit par le processus, nécessaire à l'étuvage, une quantité de 150 kg de balle de riz devrait être prévu. Le prix de la balle de riz et le cout de son transport sont évalués à 3000 FCFA.

VI.2.3.2. Besoin en personnel, Entretien et maintenance des équipements

Le salaire mensuel des responsables au fonctionnement du gazéifieur est de 25.000FCFA. Il est prévu quatre (04) responsables qui travailleront en temps partiel sur des tranches de 5 heures chacun. On considère le cout des entretiens et maintenance annuelle à 2% des couts des investissements initiaux soit 120.000FCFA.

VI.2.3.3. Electricité

Dans cette étude économique proposée, nous nous focaliserons sur les zones rurales où le réseau SONABEL est toujours absent : Cas du village de Téoulé dans la Vallée du SOUROU. Par conséquent l'énergie nécessaire pour alimenter les souffleurs du système de gazéification provient soit d'un système PV, soit d'un groupe électrogène.

- Scénario 1 : un groupe électrogène dont le prix d'achat est 120.000FCFA fonctionnant à l'essence à raison de 750F/l et une consommation spécifique de 0.21 l/kWh.
- Scénario 2 : un système photovoltaïque dont le coût est évalué à 1.800.000 FCFA et 10.000FCFA/mois pour la maintenance ;

La quantité d'énergie nécessaire à l'alimentation des souffleurs est de 10kWh par jour. En tenant compte d'un coefficient de sécurité de 1.2, l'énergie mensuelle nécessaire aux souffleurs est de 960kWh.

Tableau 12: Récapitulatif des charges mensuelles de fonctionnement / étuvage

Charges		Unité	Quantité	Prix unitaire (FCFA)	Prix total (FCFA)
Technicien		-	4	25.000	100.000
Balle de riz supplémentaire et transport balle de riz suppl.		-	-	-	3.000
Entretien et maintenance		-	1	120.000	120.000
Electricité	PV	kWh	960	-	1.800.000
	GE			150	144.000
Groupe électrogène		-	-	120.000	120.000

VI.2.4. Analyse économique du coût de substitution

❖ Situation de référence : S_R

- Investissement initial : 0 FCFA (juste 3 pierres)
- Charge mensuelle de fonctionnement : 39.040 kg de bois. Soit un montant total de 2.342.400 FCFA

❖ Scénario 1 : S_1

- Investissement initial S_1 : 4 Systèmes de gazéification : 6.000.000FCFA
Groupe électrogène : 420.000 FCFA

Soit un montant total de 6.420.000FCFA.

- Charges mensuelles de fonctionnement S_2

- ✓ Salaire des agents : 100.000FCFA
- ✓ Balle de riz supplémentaire et sa logistique : 3.000 FCFA
- ✓ Entretien et maintenance : 120.000FCFA
- ✓ Electricité : 144.000FCFA

Soit un montant total de 367.000FCFA.

❖ Scénario 2 : S₂

- Investissement initial S₁: 4 Systèmes de gazéification : 6.000.000FCFA
Electricité : Système PV : 1.800.000 FCFA

Soit un montant total de 7.800.000FCFA

- Charges mensuelle de fonctionnement S₁
 - ✓ Salaire des agents : 100.000FCFA
 - ✓ Balle de riz supplémentaire et sa logistique : 3.000 FCFA
 - ✓ Entretien et maintenance : 120.000 FCFA

Soit un montant total de 223.000 FCFA

Le taux d'actualisation est de 12% et la durée du cycle du projet 5 ans.

Tableau 13 : Etude économique (en FCFA) de la substitution du bois de chauffe par le Syngaz pour l'étuvage d'1t de riz paddy

Scénario	Investissement initial (KFCFA)	Charges annuelles (KFCFA)	Seuil de rentabilité	TRI (%)	VAN (KFCFA)
Système de gazéification de 50kw _{th} + électricité par modules photovoltaïque	6.420	367	4 mois	30%	41.732
Système de gazéification de 50kw _{th} + électricité par Groupe électrogène + essence	7.800	223	3 mois	43%	43.180

Ce calcul économique nous indique que le seuil de rentabilité est vite atteint. En effet, dès le 4^{ème} et 3^{ème} mois de la 1^{ère} année de production, le seuil de rentabilité des scénarios 1 et 2, respectivement, sont atteints. Les scénarios 1, 2 présentent une VAN et un TRI, respectivement, de 41.732.300 FCFA et 43.180.600 FCFA et 30% et 43% observée en fin d'année du projet.

Objectivement, ces deux scénarios sont rentables puisque leur TRI est supérieur au taux d'actualisation choisit (12%). Vue du coté économique, le scénario 2 présente de meilleurs performances car présente une VAN plus importante pour un TRI intéressant.

Sur la durée du projet, le calcul économique nous indique que les scénarii les plus favorables sont respectivement le scénario 2, 1.

Pour des petites unités d'étuvage, l'utilisation du photovoltaïque comme source d'énergie primaire nous permet très vite d'atteindre la rentabilité et présente moins de risque pour des investissements. L'utilisation de l'électricité SONABEL reste le scénario le plus compétitif et pourrait être promu dans les zones couvertes par le réseau. Néanmoins restons objectif, pour le scénario 1, il serait intéressant d'associer une autre source d'énergie. Ainsi en cas de délestage cette source pourrait prendre le relais car la discontinuité de fonctionnement du système pourrait altérer la qualité des mangues séchées.

VII. Conclusions et perspectives

Le but de cette étude est de caractériser les performances du gazéifieur et nous avons réalisés des expérimentations en mode semi-continu car l'alimentation du gazéifieur se fait en système batch. Nos résultats ont montré que, le Syngaz produit présente un PCI pauvre du même ordre qu'en fonctionnement ponctuel (entre 4. à 5.7 MJ/Nm³). Ce qui indique que seuls les paramètres physiques du Gazéifieur varient. Le gazéifieur co-courant étudié présente des propriétés physiques intéressantes en longue période de fonctionnement mais certains aspects sont à optimiser afin d'améliorer sa productivité. Son rendement énergétique, en longue période de fonctionnement, est de 64% contre 71% en fonctionnement ponctuel.

En fonctionnement continu, le gazéifieur n'est pas assez performant. La gazéification de la biomasse paraît être intéressante ; L'optimisation de la productivité de la technologie de conversion de la biomasse reste une clé de réussite pour la filière biomasse.

Des projets de recherche développement de processus de gazéification devraient être promus pour permettre à la filière d'accroître sa productivité et de favoriser ainsi la conversion efficace de la chaleur produite en électricité afin de sortir les pays du sud, ayant un fort potentiel en biomasse, de l'obscurité.

Comme perspectives d'amélioration des performances du gazéifieur, nous proposons de :

- ✦ Alimenter le gazéifieur en Air chaud en faisant un piquage de la conduite de combustion vers la conduite de gazéification
- ✦ Déterminer, vérifier et ajuster le ratio d'équivalence
- ✦ Renforcer l'isolation thermique de la surface latérale du réacteur afin de limiter les déperditions

En ce qui concerne l'étude économique, les investissements de rationalisation (à travers des innovations compétitives) proposées sont tous rentables. Et compte tenu du fait de la raréfaction des énergies fossiles et de leurs effets sur notre écosystème, Promouvoir des systèmes de gazéification décentralisés permettra de répondre à un besoin non satisfait tout en préservant l'environnement.

L'utilisation du gazéifieur en substitution du GPL dans une industrie de séchage de mangues présente un seuil de rentabilité atteint la 2^{ème} année de production avec un TRI moyen de 19%, une VAN de l'ordre de 40 millions de FCFA atteinte en fin de cycle de vie du projet étudié.

Quant à l'utilisation de la technologie de gazéification pour l'étuvage de riz, cela suscite un intérêt particulier car le système pouvant s'effectuer en boucle fermée en utilisant la balle de riz issus de l'étuvage comme matière première dans le gazéifieur.

Les revenus apportés par l'étuvage de riz paddy via un système de gazéification présentent de belles perspectives. Le calcul économique nous indique un seuil de rentabilité atteint le 4^{ème} mois de la 1^{ère} année de production avec un TRI de 30% et une VAN de l'ordre de 42.000.000FCFA pour notre cas d'étude.

BIBLIOGRAPHIE

- AFD et BAD. 2009.** *Afrique – Énergie – 2050*. Etats Unis : EIA, 2009. 260 p.
- ANTONINI Gérard et HAZI, Mourad. 2004.** *pyrolyse – gazéification de déchets solides*. G.I.E PROCEDIS. Verneuil en Halatte : parc technologique ALATA, 2004. p. 131.
- Breault Ronald W. 2010.** Gasification Processes Old and New: A Basic Review of the Major Technologies. *energies*. 2010, pp. 216-240.
- EIA, E.I.A. 2008.** « *International Energy outlook 2008* » in *secondary« International Energy outlook 2008* ». Official Energy statistics from U.S. Government. Washington DC (USA) : s.n., 2008. p. P.260.
- Frederic bourgeois/Xylowatt SA. 2013.** Gazéification de la biomasse. 2013, p. 7.
- Jhon Jairo et Ramirez Behainne, Jua, Daniel Martinez. 2014.** Performance analysis of an air-blown pilot fluidized bed gasifier for rice husk. *Energy for sustainable Development*. 2014, pp. 75-82.
- LIMAN A. SAIDOU. 2013.** *Caractérisation des performances d'une unité pilote de gazéification-Analyse de faisabilité technique, économique et environnementale pour une utilisation chez un artisan d'une filière agro-alimentaire au Burkina Faso*. Ouagadougou : 2iE, 2013. p. 87, Mémoire de fin d'étude-M2.
- MERMOUD, Floriane. 2006.** *Gazéification de charbon de bois à la vapeur d'eau : de la particule isolée au lit fixe continu*. Montpellier : CIRAD, 2006. p. 256, thèse doctorale.
- Mongal P, Dang, G. S. et Garg, M. O. 2011.** Syngas Production through Gasification and Cleanup for Downstream Applications — Recent Developments. *Fuel Processing Technology* 92, no. 8. 2011, p. P.2.
- Niladri Sekhar et Sudip Ghosh, and Sudipta Barman,. 2002.** “Gasification of Biomass in a Fixed Bed Downdraft Gasifier – A Realistic Model Including Tar.”. *Bioresource Technology* 107, no. 0. 2002, pp. 505-511.
- Reed Thomas B et Agua, Das. 2006.** *Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems*. [éd.] U.S. Department of Energy: Solar Energy Research Institute. 2006. p. P.9.
- TAGUTCHOU, Jean philippe. 2001.** *Electrification rurale et motorisation villageoise de la biomasse dans les centres isolés sous forêt : cas de la province du centre au cameroun*. Yaoundé (Cameroun) : Université de yaoundé 1, 2001. p. 80 + annexes, Mémoire de DEA (Master of science).
- Uniterra. Octobre 2013.** *Renforcement du pouvoir économique des femmes : cas de la filière karité et étuvage de riz*. Ouagadougou : bureau ceci et eumc au burkina faso , Octobre 2013.
- Van de Steene L., E, Martin et Salvador, Commandré JM. 2009.** *Fixed bed gasification: characterization of a new experimental set-up*. CIRAD, RAPSODEE, 2iE. s.l. : Sud Science & Technologies, 2009.
- Yang Weihong et Anna Ponzio, Carlos Lucas, and Wlodzimierz Blasiak. 2006.** Performance Analysis of a Fixed-Bed Biomass Gasifier Using High-Temperature Air. *Fuel Processing Technology* 87, no. 3. 2006, pp. P.235-245.
- Yu Feng et Bo Xiao, Klaus Goerner, Gong Cheng, Jingbo Wang. 2011.** Influence of Catalyst and Temperature on Gasification Performance by Externally Heated Gasifier. *Smart Grid and Renewable Energy*. 2011, pp. 177-183.

WEBOGRAPHIE

Alliance for rural electrification. 2008. ACCÈS À L'ÉNERGIE DANS LE MONDE : FAITS ET SCÉNARIOS. [En ligne] 2008. [Citation : 08 Mai 2014.] http://www.ruralelec.org/energy_access_in_the.0.html?&L=1.

COGITERRA, CNIL N°845317-. 2011. Agence internationale de l'énergie : l'avenir énergétique du monde est incertain. [En ligne] EIA, 2011. [Citation : 08 Mai 2014.] <http://www.actu-environnement.com/ae/news/avenir-energetique-mondial-13875.php4>.

Groupement d'expert Séniors en energie. 2011. le fil info energie. *Connaissance des energies.* [En ligne] FONDATION D'ENTREPRISE ALCEN POUR LA CONNAISSANCE DES ÉNERGIES, 2011. <http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/gazeification>.

ANNEXES

Annexe 1 : Résultats de caractérisation du gazéifieur alimenté par des balles de riz

Balle de riz							
Résultats du Test		Test 1	Test 4	Test 5	Test 7	valeur moyenne	Ecart-type
Masse de la biomasse	kg	53	58	92	77	70	-
Masse des résidus carbonés	kg	10	12	21	18	15,25	-
Débit volumique d'air de gazéification	Nm ³ /min	1,05	1,17	1,12	1,06	1,1	0,056
Durée de la Gazéification	min	161	180	268	236	211,25	-
débit de la biomasse	kg/h	20	19	21	20	20	0,549
Energie de la biomasse	MJ	908	994	1576	1319	1199	-
Energie du charbon (résidus cendreux)	MJ	115	206	360	308	247	-
Energie nette consommée	MJ	793	788	1216	1011	952	-
PCI du Syngaz	MJ/Nm ³	4,2	4,1	4,2	4,2	4,175	-
Débit volumique du Syngaz	Nm ³ /min	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	-
Energie du Gaz	MJ	412	450	687	605	538	-
puissance brute de gazéification	Kw	94	92	98	93	94	2,613
puissance nette de gazéification	Kw	82	73	76	71	76	4,719
puissance délivrée par le gaz	Kw	43	42	43	43	42	0,508
rendement massique	%	20	22	24	25	22,75	2,217
Taux de conversion de la biomasse	%	80	78	76	75	77,25	2,217
Taux de conversion des résidus carbonés	%	-	-	-	-	73	-
rendement brute de gazéification	%	45	45	43	45	45,03	1,006
rendement nette de gazéification	%	57	62	62	65	61,99	3,560
consommation spécifique en biomasse du gazéifieur	kg/kWh	0,46	0,46	0,48	0,46	0,47	0,011

Annexe 2 : Résultats de caractérisation du gazéifieur alimenté par des coques de karité

coques de karité		Test	Test	Test	Test	Test	valeur	Ecart-
Résultats du Test		1	2	3	4	5	moyenne	type
Masse de la biomasse	kg	110	135	113	108	147	122,53	-
Masse des résidus carbonés	kg	7,66	14,13	10,47	9,54	24,86	13,33	-
Débit volumique d'air de gazéification	Nm3/min	2,01	1,57	1,68	1,83	1,68	1,75	0,172
Durée de la Gazéification	min	240	263	226	216	277	244,40	-
débit de la biomasse	kg/h	28	31	30	30	32	30,01	1,636
Energie de la biomasse	MJ	1727	2124	1779	1700	2314	1928	-
Energie du charbon (résidus cendreux)	MJ	92	169	125	114	297	160	-
Energie nette consommée	MJ	1635	1957	1654	1586	2017	1770	-
PCI du Syngaz	MJ/Nm3	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	-
Débit volumique du Syngaz	Nm3/min	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	-
Energie du Gaz	MJ	1234	1368	1180	1128	1441	1270	-
puissance brute de gazéification	Kw	120	135	131	131	139	131,23	7,131
puissance nette de gazéification	Kw	114	124	122	122	121	120,65	4,074
puissance délivrée par le gaz	Kw	85,71	86,68	87,00	87,00	86,68	86,61	0,527
rendement massique	%	7	14	8	12	12	10,60	2,970
Taux de conversion de la biomasse	%	93	86	92	88	88	89,40	2,970
Taux de conversion des résidus carbonés	%	-	-	-	-	-	82	-
rendement brute de gazéification	%	71	64	66	66	62	66,15	3,417
rendement nette de gazéification	%	83	77	78	78	79	79,03	2,326
consommation spécifique en biomasse du gazéifieur	kg/kWh	0,32	0,36	0,34	0,34	0,37	0,35	0,017

Annexe 3: Fiche récapitulative des données exploitables lors des manipulations du gazéifieur – p.1/2

Fiche récapitulative des données exploitables lors des manipulations du Gazéifieur

Date :	12/03/2014	Biomasse :	Balle de riz	N° Test :	1
---------------	------------	-------------------	--------------	------------------	---

Objetif	Débits et analyse des gaz (Opércules fermés)	Activités :	
----------------	---	--------------------	--

Informations de mise en marche du gazéifieur						
Chargement	Début amorçage	Réussite amorçage	Début allumage du bruleur	Réussite allumage bruleur	Fin gazéification	Observations
1	10h02mn	10h08 mn	10h18mn	10h28mn	11h11mn	
2		11h21	11h22mn	11h24mn	12h07	
3		12h16mn	12h27mn	12h34mn	13h11mn	
4		13h20	13h16mn	13h31mn	14h09mn	

Bilan des Masses			
Masse biomasse	Masse cendre initiale	Masse cendre finale	observations
16.47			
12.16	4.54	14.41	
12.45			
12.13			

Annexe 3: Fiche récapitulative des données exploitables lors ds manipulations du gazéifieur
 – p.1/2

Récapitulatif des données									
	Heure	Evènement	Observations	Température (°C)			ΔP (Pa)		
				air de combustion	Point de prélèvement gaz	Sortie gazo	Air de combustion	Air de gazéification	Point de prélèvement gaz
Chargement 1	10h35	On considère les données d'analyse des gaz à partir de 10h37mn	Fuite des gaz observés au niveau de plusieurs points.				20	2.1	6.4
	10h50	-	-				20.3	4.5	5.5
	11h05	-	-				20.0	5.6	4.5
Chargement 2	11h25mn	-	-				19.8	2.3	5.9
	11h40mn	-	-				19.5	2.4	5.4
	11h55mn						20.4	2.6	2.7
Chargement 3	12h35mn						20.2	3.4	5.5
	12h50mn						21.8	2.4	6.3
Chargement 4	13h35mn		Ebullition des ballons contenant le Syngaz : cause probable de chargement en goudrons à				15.8	4	13.5
	13h50mn						16.4	3	5.7
	14h05mn						14.6	6.1	3.2

Caractérisation des performances d'un gazéifieur pilote pour la production de chaleur à partir de résidus agricoles et analyse technico-économique de projets chez un artisan en Afrique de l'Ouest

Annexe 4 : Etude technico- économique détaillée de la substitution du GPL par le Syngaz d'une unité de séchage de mangues (en KFCFA) – p.1/2

		Scénario	Année 1						Année 2					
			Mois 1	Mois 2	Mois 3	Mois 4	Mois 5	Mois 6	Mois 7	Mois 8	Mois 9	Mois 10	Mois 11	Mois 12
Investissement	GPL	Référence	1800	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Gazéification	1	34670	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		2	36170	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		3	35870	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Charges de fonctionnement	GPL	Référence	6336	6336	6336	6336	6336	6336	6336	6336	6336	6336	6336	6336
	Gazéification	1	2947	2947	2947	2947	2947	2947	2947	2947	2947	2947	2947	2947
		2	2700	2700	2700	2700	2700	2700	2700	2700	2700	2700	2700	2700
		3	2983	2983	2983	2983	2983	2983	2983	2983	2983	2983	2983	2983
Δ Investissement		1	-3287	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Δ charges de fonctionnement			3390	3390	3390	3390	3390	3390	3390	3390	3390	3390	3390	3390
Δ Investissement		2	-34370	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Δ charges de fonctionnement			3635	3635	3635	3635	3635	3635	3635	3635	3635	3635	3635	3635
Δ Investissement		3	-34070	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Δ charges de fonctionnement			3353	3353	3353	3353	3353	3353	3353	3353	3353	3353	3353	3353
Cash-flow		1	-29481	3390	3390	3390	3390	3390	3390	3390	3390	3390	3390	3390
		2	-30735	3635	3635	3635	3635	3635	3635	3635	3635	3635	3635	3635
		3	-30717	3353	3353	3353	3353	3353	3353	3353	3353	3353	3353	3353
Cash-flow cumulé		1	-29481	-26091	-22702	-19313	-15924	-12534	-9145	-5756	-2366	1023	4412	7802
		2	-30735	-27099	-23464	-19829	-16194	-12558	-8923	-5288	-1652	1983	5618	9254
		3	-30735	-27381	-24028	-20675	-17322	-13968	-10615	-7262	-3908	-555	2798	6152
Valeur Coef d'actualisation			1,00						0,89					
Cash-flow actualisé		1	-29481	3389	3389	3389	3389	3389	3026	3026	3026	3026	3026	3026
		2	-30735	3635	3635	3635	3635	3635	3246	3246	3246	3246	3246	3246
		3	-30717	3353	3353	3353	3353	3353	2994	2994	2994	2994	2994	2994

Caractérisation des performances d'un gazéifieur pilote pour la production de chaleur à partir de résidus agricoles et analyse technico-économique de projets chez un artisan en Afrique de l'Ouest

Annexe 4 : Etude technico- économique détaillée de la substitution du GPL par le Syngaz d'une unité de séchage de mangues (en KFCFA) – p.2/2

Année 3						Année 4						Année 5					
Mois 7	Mois 8	Mois 9	Mois 10	Mois 11	Mois 12	Mois 13	Mois 14	Mois 15	Mois 16	Mois 17	Mois 18	Mois 19	Mois 20	Mois 21	Mois 22	Mois 23	Mois 24
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6336	6336	6336	6336	6336	6336	6336	6336	6336	6336	6336	6336	6336	6336	6336	6336	6336	6336
2947	2947	2947	2947	2947	2947	2947	2947	2947	2947	2947	2947	2947	2947	2947	2947	2947	2947
2701	2701	2701	2701	2701	2701	2701	2701	2701	2701	2701	2701	2701	2701	2701	2701	2701	2701
2983	2983	2983	2983	2983	2983	2983	2983	2983	2983	2983	2983	2983	2983	2983	2983	2983	2983
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3389	3389	3389	3389	3389	3389	3389	3389	3389	3389	3389	3389	3389	3389	3389	3389	3389	3389
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3635	3635	3635	3635	3635	3635	3635	3635	3635	3635	3635	3635	3635	3635	3635	3635	3635	3635
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3353	3353	3353	3353	3353	3353	3353	3353	3353	3353	3353	3353	3353	3353	3353	3353	3353	3353
3389	3389	3389	3389	3389	3389	3389	3389	3389	3389	3389	3389	3389	3389	3389	3389	3389	3389
3635	3635	3635	3635	3635	3635	3635	3635	3635	3635	3635	3635	3635	3635	3635	3635	3635	3635
3353	3353	3353	3353	3353	3353	3353	3353	3353	3353	3353	3353	3353	3353	3353	3353	3353	3353
11190	14580	17969	21359	24748	28137	31527	34916	38305	41695	45084	48473	51863	55252	58641	62030	65420	68809
12889	16524	20160	23795	27430	31065	34700	38336	41971	45607	49242	52877	56513	60148	63783	67418	71054	74689
95050	12858	16211	19565	22918	26271	29625	32978	36331	39685	43038	46391	49744	53098	56451	59804	63158	66511
0,80						0,71						0,64					
2702	2702	2702	2702	2702	2702	2412	2412	2412	2412	2412	2412	2154	2154	2154	2154	2154	2154
2898	2898	2898	2898	2898	2898	2588	2588	2588	2588	2588	2588	2310	2310	2310	2310	2310	2310

Caractérisation des performances d'un gazéifieur pilote pour la production de chaleur à partir de résidus agricoles et analyse technico-économique de projets chez un artisan en Afrique de l'Ouest

2673	2673	2673	2673	2673	2673	2387	2387	2387	2387	2387	2387	2131	2131	2131	2131	2131	2131
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Annexe 5 : Etude technico- économique détaillée de la substitution du GPL par le Syngaz d'une unité de séchage de mangues (en KFCFA) : Tableau récapitulatif des TRI, VAN obtenus pour les trois scénarios, évalués sur 5 ans

	Année	ΔInvestissement	ΔCharges	Valeurs Résiduelles	Cash-flow	Valeur Coef d'actualisation à 12%	Cash-flow actualisé	TRI
Scénario 1	1	-32.870.000	20.335.800	0	-12.534.200	1	-12.534.200	20.50 %
	2	0	20.335.800	0	20.335.800	0,89285	18.156.964	
	3	0	20.335.800	0	20.335.800	0,79719	16.211.575	
	4	0	20.335.800	0	20.335.800	0,71178	14.474.621	
	5	0	20.335.800	0	20.335.800	0,63551	12.923.769	
	Valeur Actuelle nette (VAN)							
Scénario 2	1	-38.670.000	21.811.800	0	-16858200	1	-16.858.200	15.68 %
	2	0	21.811.800	0	21.811.800	0,89285	19.474.821	
	3	0	21.811.800	0	21.811.800	0,79719	17.388.233	
	4	-1.000.000	21.811.800	0	21.811.800	0,71178	14.813.428	
	5	0	21.811.800	333.333	22.145.133	0,63551	14.073.633	
	Valeur Actuelle nette (VAN)							
Scénario 3	1	-34.070.000	20.119.800	0	-13.950.200	1	-13.950.200	19.43 %
	2	0	20.119.800	0	20.119.800	0,89285	17.964.107	
	3	0	20.119.800	0	20.119.800	0,79719	16.039.381	
	4	0	20.119.800	0	20.119.800	0,71178	14.320.876	
	5	0	20.119.800	0	20.119.800	0,63551	12.786.497	
	Valeur Actuelle nette (VAN)							

Caractérisation des performances d'un gazéifieur pilote pour la production de chaleur à partir de résidus agricoles et analyse technico-économique de projets chez un artisan en Afrique de l'Ouest

Annexe 6 : Etude technico- économique de la substitution du bois de chauffe par le Syngaz (en KFCFA) – p.1/2

		Scénari o	Année 1						Année 2					
			Mois 1	Mois 2	Mois 3	Mois 4	Mois 5	Mois 6	Mois 7	Mois 8	Mois 9	Mois 10	Mois 11	Mois 12
Investissement	Bois de chauffe	Référen ce	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Gazéificatio n	1	7800	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		2	6520	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Charges de fonctionnement	Bois de chauffe	Référen ce	2342	2342	2342	2342	2342	2342	2342	2342	2342	2342	2342	2342
	Gazéificatio n	1	223	649	649	649	649	649	649	649	649	649	649	649
		o 2	367	367	367	367	367	367	367	367	367	367	367	367
Δ Investissement		1	-7800	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Δ charges de fonctionnement			2119	1693	1693	1693	1693	1693	1693	1693	1693	1693	1693	1693
Δ Investissement		2	-6520	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Δ charges de fonctionnement			1975	1975	1975	1975	1975	1975	1975	1975	1975	1975	1975	1975
Cash-flow		1	-5681	1693	1693	1693	1693	1693	1693	1693	1693	1693	1693	1693
		2	-4545	1975	1975	1975	1975	1975	1975	1975	1975	1975	1975	1975
Cash-flow cumulé		1	-5681	-3988	-2295	-602	1091	2784	4477	6170	7863	9556	11249	12942
		2	-4545	-2570	-595	1380	3355	5330	7305	9280	11255	13230	15205	17180
Valeur Coef d'actualisation			1						0.89					
Cash-flow actualisé		1	-5681	1693	1693	1693	1693	1693	1512	1512	1512	1512	1512	1512
		2	-4545	1975	1975	1975	1975	1975	1763	1763	1763	1763	1763	1763

Caractérisation des performances d'un gazéifieur pilote pour la production de chaleur à partir de résidus agricoles et analyse technico-économique de projets chez un artisan en Afrique de l'Ouest

Annexe 6 Etude technico- économique de la substitution du bois de chauffe par le Syngaz (en KFCFA) – p.2/2

Année 3						Année 4						Année 5					
Mois 7	Mois 8	Mois 9	Mois 10	Mois 11	Mois 12	Mois 13	Mois 14	Mois 15	Mois 16	Mois 17	Mois 18	Mois 19	Mois 20	Mois 21	Mois 22	Mois 23	Mois 24
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2342	2342	2342	2342	2342	2342	2342	2342	2342	2342	2342	2342	2342	2342	2342	2342	2342	2342
649	649	649	649	649	649	649	649	649	649	649	649	649	649	649	649	649	649
367	367	367	367	367	367	367	367	367	367	367	367	367	367	367	367	367	367
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1693	1693	1693	1693	1693	1693	1693	1693	1693	1693	1693	1693	1693	1693	1693	1693	1693	1693
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1975	1975	1975	1975	1975	1975	1975	1975	1975	1975	1975	1975	1975	1975	1975	1975	1975	1975
1693	1693	1693	1693	1693	1693	1693	1693	1693	1693	1693	1693	1693	1693	1693	1693	1693	1693
1975	1975	1975	1975	1975	1975	1975	1975	1975	1975	1975	1975	1975	1975	1975	1975	1975	1975
1463	1632	1802	1971	2140	2310	2479	2648	2817	2987	3156	3325	3495	3664	3833	4003	4172	4341
5	8	1	4	7	0	3	6	9	2	5	8	1	4	7	0	3	6
1915	2113	2310	2508	2705	2903	3100	3298	3495	3693	3890	4088	4285	4483	4680	4878	5075	5273
5	0	5	0	5	0	5	0	5	0	5	0	5	0	5	0	5	0
0,80						0,71						0,64					
1350	1350	1350	1350	1350	1350	1205	1205	1205	1205	1205	1205	1076	1076	1076	1076	1076	1076
1574	1574	1574	1574	1574	1574	1406	1406	1406	1406	1406	1406	1255	1255	1255	1255	1255	1255

Caractérisation des performances d'un gazéifieur pilote pour la production de chaleur à partir de résidus agricoles et analyse technico-économique de projets chez un artisan en Afrique de l'Ouest

Annexe 7 : Etude technico- économique détaillée de la substitution du bois de chauffe par le Syngaz d'une unité d'étuvage de riz (en KFCFA) : Tableau récapitulatif des TRI, VAN obtenus pour les trois scénarios, évalués sur 5 ans

	Année	ΔInvestissement	ΔCharges	Valeurs résiduelles	Cash-flow	Valeur Coef d'actualisation à 12%	Cash-flow actualisé	TRI
Système de Gazéification et alimentation des souffleurs par un groupe électrogène	1	- 6 120 000	11 852 400	-	5 732 400	1	5 732 400	30%
	2	-	11 852 400	-	11 852 400	0,89285	10 582 500	
	3	-	11 852 400	-	11 852 400	0,79719	9 448 661	
	4	-	11 852 400	-	11 852 400	0,71178	8 436 304	
	5	-	11 852 400	-	11 852 400	0,63551	7 532 414	
	Valeur Actuelle nette (VAN)							
Système de Gazéification et alimentation des souffleurs par des modules PV	1	- 7 800 000	12 716 400	-	4 916 400	1	4 916 400	43%
	2	-	12 716 400	-	12 716 400	0,89285	11 353 929	
	3	-	12 716 400	-	12 716 400	0,79719	10 137 436	
	4	- 720 000	12 716 400	-	11 996 400	0,71178	8 538 801	
	5	-	12 716 400	240 000	12 956 400	0,63551	8 234 026	
	Valeur Actuelle nette (VAN)							