



REPUBLIQUE DU NIGER
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR,
DE LA RECHERCHE ET DE L'INNOVATION
UNIVERSITÉ DAN DICKO DANKOULO DO DE
MARADI



Faculté des Sciences et Techniques

DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ COMME EXIGENCE PARTIELLE POUR L'OBTENTION DE MASTER
**Spécialité : Système Énergétique Durable pour Société en Développement
(2SED)**

**Thème : Evaluation du potentiel énergétique des résidus agricoles
au Niger et Essai préliminaire de gazéification**

Présenté par

M. TCHIFFA GUIMBARO Mahamadou

Encadré par
Dr Ibrahim HAROUNA GADO

Supervisé par
Dr Laouali DUNGALL

Soutenu publiquement le 14/10/2020 devant le jury composé de :

Monsieur Makinta BOUKAR, Professeur Titulaire à l'Université Abdou Moumouni de Niamey (UAM/Niger), Président ;

Monsieur Dungall LAOUALI, Professeur Titulaire à l'Université Abdou Moumouni de Niamey (UAM/Niger), Superviseur ;

Monsieur Ibrahim HAROUNA GADO, Maître-Assistant, Université Dan Dicko Dankoulodo de Maradi (UDDM/Niger), Encadreur.

Année académique 2019-2020

Dédicace

Je dédie ce travail à mon père et ma mère
Tchiffa Guimbaro et Salamatou Gamadadi,
dans l'espoir que ce travail, fruit de vos multiples sacrifices,
soit utile à la nation, conformément à vos vœux.

Remerciements

Louanges au Maître absolu de la science et la sagesse, par essence et par excellence.

De prime abord, le devoir moral m'incombe d'exprimer toute ma reconnaissance et gratitude à la personne de Dr Ibrahim HAROUNA GADO, pour m'avoir confié ce thème et l'encadrement minutieux qu'il a assuré dans le déroulement de ce travail ; en plus des moyens et le temps investi ; vos multiples conseils ainsi que la rigueur dans le travail ont marqué mon cursus, depuis ma première année jusqu'à ce jour.

Mes remerciements sont également adressés au Pr. Dungall LAOUALI pour avoir accepté de superviser ce travail, et pour l'intérêt qu'ils ont accordé à la présente soutenance.

Je tiens aussi à remercier chaleureusement le président du jury Pr. Boukar MAKINTA pour avoir accepté d'évaluer et d'enrichir ce travail.

C'est aussi le lieu d'exprimer mes sincères remerciements à l'endroit de tous les enseignants du département de physique de l'Université Dan Dicko Dankoulodo de Maradi en particulier, ainsi que tous les enseignants qui ont assuré notre formation.

Je tiens à remercier la direction de l'Institut Universitaire de Technologie, et particulièrement le département de Génie Mécanique, pour les facilitations offertes dans la réalisation des expérimentations, et le laboratoire Lasta par le truchement de Dr Issoufou Amadou.

Je ne terminerai pas sans remercier mon tuteur M. Hamza Adamou ; le directeur de l'usine riz du Niger de Kirkissoye (Niamey) ; M. Djibo Mahamadou étudiant en chaudronnerie au département de Génie Mécanique ; le projet CowpeaSquare, et tous ceux qui de prêt ou de loin ont amené leurs contributions dans la réalisation de ce travail

Enfin, mes remerciements vont à l'endroit de tous mes promotionnaires de Master Système Énergétique Durable pour Société en développement (2SED).

Sommaire

DEDICACE	I
REMERCIEMENTS	II
LISTE DES TABLEAUX	V
LISTE DES FIGURES	VI
LISTE D'ORGANIGRAMMES	VI
SIGLES ET ABREVIATIONS	VII
RESUME	VIII
ABSTRACT	IX
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	3
INTRODUCTION	3
I.1 BIOMASSE COMME SOURCE D'ENERGIE.....	3
I.2 PROPRIETES DE LA BIOMASSE	4
I.3 METHODE D'ÉVALUATION DU POTENTIEL DE LA BIOMASSE.....	5
I.4 SYNTHESE SUR LES RESIDUS DE LA BIOMASSE AGRICOLES DISPONIBLES AU NIGER.....	6
I.4.1 Élément sur les cultures pluviales	6
I.4.2 Ressource en riz	8
I.4.3 Ressource en <i>Balanites aegyptiaca</i> (dattier du désert)	9
I.4.4 Ressource en <i>hyphaene thebaica</i> (palmier doum).....	10
I.5 LES METHODES UTILISEES POUR LA GAZEIFICATION DE LA BIOMASSE.....	10
I.5.1 Différentes filières de conversion énergétique de la biomasse.....	10
I.5.2 Les quatre étapes de la gazéification	12
I.5.3 Outils d'évaluation de la performance d'un gazogène.....	13
CONCLUSION	14
CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODE	16
INTRODUCTION	16
II.1 METHODE D'ÉVALUATION DE LA RESSOURCE EN BIOMASSE ET DE LEURS POTENTIELS ENERGETIQUES	16
II.1.1 Ressource en résidus agricoles	16
II.1.2 Potentiel des résidus des produits forestiers	19
II.1.3 Choix de la biomasse	20
II.1.4 Calcul du potentiel énergétique.....	21
II.2. MATERIELS ET METHODES DES ESSAIS PRELIMINAIRES DE GAZEIFICATION	21
II.2.1 Matériels.....	21
II.2.2 Méthodes.....	22
II.3 ANALYSE IMMEDIATE DES BIOMASSES ET DU POUVOIR CALORIFIQUE	23
CONCLUSION	24
CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS	25
INTRODUCTION	25
III.1 ÉVALUATION DE LA RESSOURCE EN RESIDUS DE CULTURE	25
III.1.1 Estimation du potentiel total brut	25
III.1.2 Estimation des résidus potentiellement disponibles pour la bioénergie	28
III.1.3 Choix de la biomasse	29
III.1.4 Estimation des résidus potentiellement mobilisables.....	30
III.2 ÉVALUATION DE LA RESSOURCE EN RESIDUS D'ESPECES FORESTIERES.....	32
III.3 POTENTIEL ENERGETIQUE DES RESIDUS DE CULTURE ET SOUS-PRODUITS D'AGROFORESTERIE	35

III.4 ESSAIS DE GAZEIFICATION	38
III.5 RESULTATS DE L'ANALYSE IMMEDIATE	43
CONCLUSION.....	45
CONCLUSION GENERALE	46
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	48
ANNEXE 1.....	A
ANNEXE 2.....	B
ANNEXE 3.....	C
ANNEXE 4.....	D
ANNEXE 5.....	E

Liste des Tableaux

<i>Tableau I.1 : Composition en cellulose, hémicellulose et lignine pour quelques résidus de biomasse</i>	4
<i>Tableau I.2 : Différentes formes d'utilisation traditionnelles des résidus agricoles au Niger, (en %), (Karimou et Atikou, 1998)</i>	7
<i>Tableau I.3: Quelques cultures génératrices de résidus agricoles au Niger</i>	7
<i>Tableau I.4: Répartition de l'énergie pour un gazogène Imbert de laboratoire</i>	14
<i>Tableau II.1: Ratio déchet/produit et contenu énergétique des déchets agricoles</i>	19
<i>Tableau III.1: productions cérésières et industrielles en tonnes</i>	25
<i>Tableau III.2: Quantités brutes de déchets générés par les cultures cérésières en millier de tonne</i>	26
<i>Tableau III.3: Quantité des déchets générés par les cultures de rente, en millier de tonne</i>	26
<i>Tableau III.4: Quantité de résidus des cultures cérésières (A1), potentiellement disponible pour la bioénergie</i>	28
<i>Tableau III.5: Quantité de résidus de culture de rente (A1), potentiellement disponible pour la bioénergie</i>	28
<i>Tableau III.6: Rendement en production de résidus disponibles pour la bioénergie</i>	30
<i>Tableau III.7: Quantités des résidus (A2) mobilisables (en millier de tonne)</i>	31
<i>Tableau III.8: Estimation du potentiel de <i>Hyphaene thebaica</i> (palmier doum)</i>	33
<i>Tableau III.9: Estimation du potentiel de <i>Balanites aegyptiaca</i></i>	34
<i>Tableau III.10: Quantités brutes de résidus de fruit générées par les espèces forestières (F1), en millier de tonne</i>	34
<i>Tableau III.11: Quantités de résidus de fruit d'espèces forestières, potentiellement mobilisables, en millier de tonnes</i>	35
<i>Tableau III.12: Evaluation du potentiel énergétique des résidus agricoles</i>	35
<i>Tableau III.13: Évaluation du potentiel énergétique des résidus de fruit des espèces forestières</i>	36
<i>Tableau III.14: Récapitulatif des tests de gazéification</i>	42
<i>Tableau III.15: Analyse immédiate des échantillons gazéifiés</i>	43

Liste des Figures

<i>Figure I.1: Processus de la gazéification (Zhu et Venderbosch, 2005)</i>	12
<i>Figure II.2 : Gazogène de l'étude (Gado et al, 2019)</i>	22
<i>Figure III.3: Évolution des quantités brutes de résidus de mil et sorgho sur le plan national, de 2008 à 2017</i>	27
<i>Figure III.4: Évolution des quantités brutes de résidus d'autres cultures, générés sur le plan national, de 2008 à 2017</i>	27
<i>Figure III.5: Répartition des résidus agricoles par région</i>	31
<i>Figure III.6: Présence des espèces forestières : Balanites aegyptiaca et Hyphaene thebaica</i>	32
<i>Figure III. 7: Comparaison par région du potentiel énergétique des résidus agricoles et la consommation électrique</i>	37
<i>Figure III.8: Potentiel en électricité et en chaleur des résidus agricoles mobilisables par an</i>	38
<i>Figure III.9: Profils de températures du réacteur</i>	39
<i>Figure III.10: (a) échantillon de la balle de riz, (b) résidus de cendre après gazéification</i>	42
<i>Figure III.11: (a) échantillon de coque de Balanites aegyptiaca, (b) cendre et charbon résiduel (imbrulés) après gazéification ; (c) flammes produites lors du test</i>	43
<i>Figure III.12: (a) échantillon de coque de Hyphaene thebaica, (b) résidus de cendre après gazéification ; (c) flammes produites lors du test</i>	43
<i>Figure III.13: (a) résidus de cendre du charbon de bois après gazéification, (b) flamme produite lors de l'essai</i>	43

Liste d'organigrammes

<i>Organigramme II. 1: Méthode d'estimation du potentiel de résidus agricole pour la bioénergie</i>	18
<i>Organigramme II. 2: Méthode d'estimation du potentiel des résidus de fruit des espèces forestières</i>	20

Sigles et Abréviations

AHA	: Aménagement Hydroagricole
ONAHA	: Office National des Aménagements Hydroagricoles
INS	: Institut National de la Statistique
FAO	: Organisation des Nations Unis pour l'Agriculture et l'Alimentation
FONABES	: Gestion des Forêts Naturelles et Approvisionnement Durable en Bois-Énergies des villes du Sahel
IFDD	: Institut de la Francophonie pour le Développement Durable
CEDEAO	: Commission Économique des États de l'Afrique de l'Ouest
BEFS-RA	: Bioenergy and Food Security – Rapid Analyze
RINI	: Riz du Niger
MM	: Matière Minérale (%)
MV	: Matière Volatile (%)
H	: Humidité (%)
CF	: Carbone Fixe (%)
E_e	: Énergie électrique
E_{th}	: Énergie thermique
η_e	: Rendement électrique
η_{th}	: Rendement thermique
ΔH	: enthalpie
PCI	: Pouvoir Calorifique Inferieur (MJ/kg)
PCS	: Pouvoir Calorifique Supérieure (MJ/kg)
\dot{m}	: Débit massique
R_{be}	: Résidus disponibles pour la bioénergie
tep	: Tonne équivalent pétrole
MW	: Mégawatt
GWh	: Gigawattheure
TWh	: Térawattheure

Résumé

L'évaluation du potentiel des résidus agricoles et produits forestiers menée dans cette étude a pour but la valorisation énergétique par gazéification en vue de contribuer à améliorer l'offre et l'accès aux services énergétiques modernes. Des statistiques agricoles et des données des inventaires forestiers, il ressort que l'utilisation de 4,5% du potentiel total brut des résidus de récolte et 12,5% du potentiel total brut des résidus forestiers, permettrait respectivement de mobiliser près d'un demi-million de tonnes de résidus agricoles par an, et plus de 80 kilotonnes de résidus des produit forestiers, soit respectivement un potentiel de plus de 2289,3 GWh, et 422,22GWh en moyenne par an. Le potentiel des résidus agricoles seuls, permettrait de couvrir 50 % de la consommation en électricité au Niger pour l'année 2018. La méthode envisagée pour la conversion de l'énergie chimique de la biomasse en chaleur ou en électricité est la gazéification. Les essais de gazéification ont été conduit dans un gazogène à lit fixe de type co-courant, avec de l'air comme oxydant. Les tests sur 3,95kg de balle de riz ; 17,9kg de coques de Balanites ; 9,5kg de coques d'Hyphaene et 12,2kg de charbon de bois ont permis d'aboutir à une consommation moyenne de 1,83kg/h pour la balle de riz, 7,21kg/h pour la coque de balanites, 4,28kg/h pour les coques d'Hyphaene et 1,7kg/h pour le charbon de bois. Pour la balle de riz, les faibles températures ont limité la production du gaz, du fait de l'absence d'un agitateur du lit de biomasse dans le gazogène. Par contre pour les coques du fruit de Balanites, d'Hyphaene et le charbon de bois, la durée de production du gaz est respectivement de 65mn après 15mn du démarrage du test, 45mn après 12mn d'attente, et 194mn avec une durée d'attente de 59mn. Le taux d'humidité, de cendre, les matières volatiles, le carbone fixe et le pouvoir calorifique supérieur (PCS) des biomasses gazéifiées ont été déterminés dans la présente étude. Les taux de cendre et du PCS obtenu sont respectivement de 21,78% et 15,05 MJ/kg pour la balle de riz ; 3,27% et 16,76 MJ/kg pour la coque du fruit de Balanites ; 13,89% et 17,89 MJ/kg pour la coque du fruit d'Hyphaene.

Mots clés : *potentiel, résidus agricoles, Balanites aegyptiaca, Hyphaene thebaica, gazéification.*

Abstract

The assessment of the potential of agricultural residues and forest products carried out in this study aims at energy recovery by gasification in order to contribute to improving the supply and access to modern energy services. Agricultural statistics and forest inventory data show that the use of 4.5% of the total gross potential of crop residues and 12.5% of the total gross potential of forest residues would enable the mobilization of almost half million tonnes of agricultural residues per year, and more than 80 kilotonnes of forest product residues, representing a potential of more than 2289.3 GWh, respectively, and 422.22 GWh on average per year. The potential of agricultural residues alone, would cover 50% of electricity consumption in Niger in 2018. The method envisaged for the conversion of chemical energy from biomass into heat or electricity is gasification. The gasification tests were conducted in a co-current-type fixed-bed gasifier, with air as an oxidant. Tests on 3.95kg of rice husk; 17.9kg of Balanites hulls; 9.5kg of Hyphaene hulls and 12.2kg of charcoal resulted in an average consumption of 1.83kg/h for rice husk, 7.21kg/h for balanites hull, 4.28 kg/h for hulls of Hyphaene and 1.7 kg/h for charcoal. For the rice husk, low temperatures limited the production of the gas, due to the absence of a biomass bed agitator in the gasifier. On the other hand, for the shells of the fruit of Balanites, Hyphaene and charcoal, the production time of the gas is respectively 65mn after 15mn of the start of the test, 45mn after 12mn of waiting, and 194mn with a waiting time of 59mn. Moisture, ash, volatile matter, fixed carbon and higher heating value (HHV) of gasified biomasses were determined in this study. The ash content and the HHV obtained are respectively 21.78% and 15.05 MJ/kg for the rice husk; 3.27% and 16.76 MJ/kg for the shell of the Balanites fruit; 13.89% and 17.89 MJ/kg for the shell of the Hyphaene fruit.

Key words: *potential, agricultural residues, Balanites aegyptiaca, Hyphaene thebaica, gasification*

Introduction générale

L'énergie est l'une des préoccupations majeures de la communauté internationale, pour deux raisons principales : son caractère de facteur de développement et sa forte implication dans les impacts environnementaux responsables du changement climatique, avec une contribution d'environ 60% des émissions de gaz à effet de serre (ODD7, 2016).

Selon un rapport conjoint de l'Agence International de l'Energie (AIE) et de l'Agence internationale pour les énergies renouvelables (IRENA), 650 millions d'individus seront toujours privés d'électricité en 2030, sachant que 90 % d'entre eux vivront en Afrique subsaharienne (AIE, 2019), ces récentes prévisions devront inciter à redoubler d'effort. On note qu'en Afrique subsaharienne, l'usage de la biomasse demeure principalement pour des besoins en cuisson et en chauffage, avec des techniques jusque-là traditionnelles (Dasappa. S *et al* 2007). De plus, les conséquences de ces techniques provoquent plus de quatre millions de morts prématurées dans le monde en raison de la pollution de l'air intérieur (ODD7, 2016). Les rapports de l'AIE (2018) soulignent qu'au Niger, plus de 95% de la population n'ont pas accès à une source d'énergie propre, pour la cuisson. En effet, l'usage moderne de la biomasse se distingue de l'utilisation traditionnelle, par de meilleurs rendements de conversion. On distingue deux voies de conversion énergétique de la biomasse, à savoir la voie biochimique et la voie thermochimique.

Cependant, Il faut noter que l'insuffisance des statistiques fiables sur la disponibilité et la nature des résidus agricoles, pouvant être valorisés, malgré leur abondance, compromet l'idée de promouvoir leur bioénergie. Pour ces raisons, l'estimation des ressources en biomasse doit être entreprise afin d'évaluer les possibilités de promouvoir la biomasse énergie. En ce sens plusieurs recherches ont été menées à l'échelle sous régionale ou nationale, entre autres les travaux de Dasappa (2011), portant sur l'estimation du potentiel en Afrique subsaharienne, ou ceux de Adamon (2017) et Diedhiou (2017) conduit respectivement au Benin et au Sénégal. C'est dans cet ordre d'idée qu'est née le présent travail, qui consiste à évaluer le potentiel des résidus agricoles suivi des essais de gazéification. La technique de la gazéification est choisie pour la valorisation compte tenu de son efficacité et de la possibilité qu'offre ce procédé de produire à la fois de la chaleur, de la force motrice et de l'électricité.

L'objectif de ce travail est double à savoir d'une part évaluer le potentiel des résidus de la biomasse agricole et d'autre part valoriser ces résidus par une des techniques modernes de conversion énergétique. Le premier chapitre porte sur les généralités, qui présentent une synthèse des résidus agricoles disponibles au Niger, pour ensuite déboucher sur les technologies de conversion de la biomasse, notamment les procédées de gazéification, de même que la

maturité de ses technologies. Le deuxième chapitre présente aussi bien les matériels que les méthodes utilisées dans l'estimation du potentiel des biomasses sélectionnées, et pour la conduite des tests de gazéification. Le troisième chapitre est consacré aux résultats de l'estimation du potentiel de la biomasse suivi des résultats expérimentaux issus des essais de gazéification, ainsi que ceux de la caractérisation des échantillons de la biomasse sélectionnée.

CHAPITRE I : Synthèse bibliographique

Introduction

Face au défi lié à la demande énergétique pressante au niveau national, le souci de proposer des alternatives locales permettant de faciliter l'accès aux services énergétiques modernes nous amène à porter une attention toute particulière à la biomasse énergie, notamment au domaine agricole. La connaissance des différents types de résidus agricoles disponibles ainsi que leurs quantités, permettront d'évaluer le gisement en biomasse ainsi que son potentiel énergétique disponible et ouvrira la voie à l'adoption d'un procédé de valorisation énergétique.

I.1 Biomasse comme source d'énergie

De façon générale, la biomasse est définie comme la fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture (comprenant les substances végétales et animales), de la sylviculture et des industries connexes, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et ménagers.

En parlant d'énergie, la biomasse peut aussi être résumée selon F. Ricoul (2016), comme toute matière issue du monde vivant, qu'il soit végétal ou animal, à partir de laquelle il est possible de produire de l'énergie. Cette énergie est dite renouvelable dans le sens où la vitesse de renouvellement naturel de la biomasse est suffisamment rapide à l'échelle d'une vie humaine pour être considéré comme inépuisable.

La plante utilise la photosynthèse (grâce au gaz carbonique et l'eau) pour convertir les rayons solaires en énergie chimique. Lors de sa décomposition thermique par des microorganismes, cette biomasse redonne du gaz carbonique et de l'eau, en réutilisant l'oxygène généré lors de la photosynthèse. En effet une tonne de matière sèche génère 0,4 tep sous forme de chaleur, c'est à dire autant que 0,5 à 0,6 tonne de charbon, 0,4 tonne de pétrole et 0,33 tonne de gaz. (A. Riedacker, 2005). D'après Khan *et al.* (2009) la biomasse contribue à 10-15% des besoins énergétiques mondiaux. Dans les pays industrialisés, elle représente 9-14% contre 20-25% dans les pays en développement. La valorisation de la biomasse a reçu une attention particulière ces dernières décennies du fait de certains avantages notamment environnementaux. En effet, la biomasse est une source d'énergie « propre », largement rependue à travers le monde. Les prévisions indiquent que d'ici 2050, entre 15 et 30% de l'énergie primaire mondiale sera produite à base de la biomasse, contre 11% en 2010, (Buragohain et al., 2010). La biomasse représente la première ressource d'énergie utilisée dans la majorité des pays africains.

Les biomasses lignocellulosiques valorisables par une technique énergétique sont extrêmement diversifiées, cependant les caractéristiques physicochimiques les plus importantes pour la conversion thermochimique se résument à travers leurs teneurs en cendres, carbone, hydrogène, azote, soufre, oxygène (pour le calcul du pouvoir calorifique), l'humidité relative, le taux de carbone fixe, le taux de matières volatiles, la densité, la masse volumique, la porosité et la granulométrie. Le PCI du combustible demeure le paramètre fondamental recherché.

I.2 Propriétés de la biomasse

a. Composition de la biomasse

Les principaux constituants pris en considération sont généralement la cellulose, les lignines, les hémicelluloses et les extraits aux solvants. La cellulose est le composant dominant dans les résidus de la biomasse, soit environ 40 à 44 % en poids sec. Lors de la gazéification de la biomasse, la cellulose est un contributeur majeur de production d'impureté (goudron) selon Prabir (2013). L'hémicellulose, représente environ 20 à 30 % du poids sec de la biomasse, et lors de sa dégradation thermique elle tend à donner plus de gaz et moins de goudrons que la cellulose. L'hémicellulose et la cellulose caractérisent l'indice de matière volatile de la biomasse (Tagutchou, 2008). D'après ce même auteur, la lignine caractérise l'indice élevé de carbone fixe pendant les tests thermochimiques, d'où un PCI important.

Tableau I.1 : Composition en cellulose, hémicellulose et lignine pour quelques résidus de biomasse

Biomasse	Cellulose (%)	Hémicellulose (%)	Lignine (%)	Source
Bagasse	45,00	36,00	19,00	García <i>et al.</i> (2002)
Balle de riz	36,10	19,74	19,40	Lee (2003)
Coque d'arachide	42,00	31,00	23,00	Richard <i>et al.</i> (2002)
Tige de maïs	40,60	32,40	20,50	Banchorndhevakul (2002)
Tige de mil	41,50	18,00	28,00	Gaur <i>et al.</i> (2001)
Tige de sorgho	36,00	18,00	16,00	Shu-Lai <i>et al.</i> (1992)

Selon Idriss (2007), la cellulose se dégrade à une gamme de température entre 250-400 °C ; l'hémicellulose entre 200-350 °C et la lignine se dégrade à une température de 200-500 °C.

b. Composition élémentaire de la biomasse

L'analyse élémentaire détermine principalement la quantité de carbone, d'hydrogène, d'oxygène, d'azote et de soufre. Quant à l'analyse immédiate, celle-ci permet de déterminer la teneur en humidité, en carbone fixe, en matières volatiles, en cendres d'une biomasse donnée. La matière volatile définit la fraction volatile réellement libérée lors de la conversion thermochimique (Jeanmart et Tchouate, 2005). Il est indiqué dans la littérature que la teneur en cendre a une incidence négative majeure sur le PCI, tandis qu'un taux de carbone fixe élevé favorise le PCI, (Schenkel et Temmerman, 2005).

c. Pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique d'une biomasse quelconque dépend de sa composition chimique élémentaire et de son humidité. Le pouvoir calorifique de la matière organique est un indice énergétique qui permet de quantifier sa contenance énergétique ; il représente la quantité d'énergie contenue dans une unité de masse de combustible. Le pouvoir calorifique peut être présenté en deux classes : le pouvoir calorifique inférieur (PCI) et le pouvoir calorifique supérieur (PCS). Le PCI représente le PCS duquel on a retiré la quantité de chaleur correspondant à la condensation de vapeur d'eau, fournie lors de la combustion. En matière de valorisation énergétique, les biomasses possédant un PCI le plus élevé, sont celles qui ont un taux d'humidité et une teneur en cendres les plus faibles.

d. Taux d'humidité

L'humidité est un paramètre important qui influe sur l'évolution de la température et celle du pouvoir calorifique inférieur (PCI) du combustible, car plus le taux d'humidité est grand plus petit est son PCI. Elle influe également sur le coût de transport des biomasses. Les travaux de Somma *et al.* (2011) illustrent ce fait, avec trois différentes humidités d'une biomasse (à 27,0 %, à 24,4 %, et à 21,8 %), ils ont obtenu des valeurs du PCI respectivement de 13,0 MJ/kg ; 15,4 MJ/kg et 17,8 MJ/kg. Les travaux de Reed et Das (1988) indiquent qu'un taux d'humidité supérieur à 67% produit un gaz trop pauvre pour être brûlé, l'énergie nécessaire à l'évaporation de l'eau réduit en effet significativement la température des gaz.

I.3 Méthode d'évaluation du potentiel de la biomasse

Il existe principalement deux méthodes pour l'évaluation de la ressource en biomasse pour un usage énergétique : il s'agit de la méthode basée sur les données statistique issues d'inventaires et celle basée sur la télédétection et système d'information géographique, (Hui Long *et al.*, 2013)

- La méthode basée sur les données statistiques est couramment utilisée, pour l'estimation du potentiel des résidus agricoles et les sous-produits de cultures. Cette méthode repose sur la connaissance de la production agricole des produits des cultures, qui sont source

de déchets valorisables en biomasse énergie. En général, les statistiques proviennent, soient de la direction de la statistique du ministère de l'agriculture et ou des industries, et des entreprises agricoles, (Oleksandr, 2008 ; Adamon, 2017). Ensuite l'étape suivante se fonde sur l'usage du coefficient de déchets qui représente la quantité de déchets obtenus par unité de récolte, enfin il faudra tenir compte de la part de déchets dont l'usage est impossible pour la production d'énergie, selon Oleksandr (2008), compte tenu de l'impossibilité de récolter certains déchets (inaccessibilité) et l'utilisation d'une partie de déchets à d'autres fins utiles (alimentation de bétails, fertilisations des champs, constructions...).

- Quant à la méthode basée sur la télédétection, elle est le plus souvent couplée à un échantillonnage sur le terrain, utilise les propriétés des ondes électromagnétiques, émises, réfléchies ou diffractées par les différents corps observés et enregistrés à distance grâce à un capteur d'observation spatiale (image satellitaire) ou aérien. Cette technique permet de cartographier le taux de recouvrement du sol par la végétation. La reconnaissance de la végétation se fait à travers la signature spectrale émise des feuillus ou des conifères (l'écorce). En effet dans la partie du visible et de l'infrarouge réfléchi (0,4 μm à 3 μm), la « signature spectrale » est exprimée à l'aide d'une quantité que l'on appelle la réflectance, ou la capacité d'un objet à réfléchir le rayonnement solaire. En outre, des indices de végétation sont également utilisés pour mesurer l'activité photosynthétique et l'indice foliaire pour donner une évaluation approximative du taux de recouvrement du sol par la végétation verte (Baert *et al*, 1991).

I.4 Synthèse sur les résidus de la biomasse agricoles disponibles au Niger

I.4.1 Élément sur les cultures pluviales

Selon une étude menée sous l'égide de la FAO (2014a), portant sur les résidus agricoles et sous-produits agro-industriels en Afrique de l'Ouest, il ressort que la quantité de paille (destinée à l'alimentation du bétail) de céréales (mil, sorgho, maïs et riz) a été estimée à près de 80.000.000 de tonnes dans l'espace UEMOA. En 2017, on note en général, de faibles taux d'électrification et l'utilisation des énergies renouvelables surtout en milieu rural dans l'espace CEDEAO. Les forts taux enregistrés quant à l'utilisation des énergies renouvelables dans certains pays de la région, sont essentiellement dus à l'usage important fait de la biomasse moderne d'une part, puis à l'hydroélectricité, d'autre part (Adamon, 2017). Au Niger en 2000, il a été estimé qu'environ 3 millions de tonnes de bois et résidus agricoles étaient consommées par la population pour ses besoins énergétiques (PANER, 2015). Dans les travaux de Dasappa.

S (2011), il indique qu'en 2011 le Niger a enregistré 2672 millions de tonnes de résidus agricoles et que l'usage de 30% de ces résidus pourrait permettre d'obtenir un potentiel de 100MW. Cependant au Niger, l'usage moderne de la biomasse comme source d'énergie reste à un stade embryonnaire bien que chaque année, d'importantes quantités en résidus de culture sont produites, tels que la paille, balles, bagasse, tiges, coque etc...

Ainsi, Karimou et Atikou (1998) rapportent qu'à la fin des récoltes, les cultures dégagent d'importantes quantités de résidus. Cependant l'utilisation des résidus de récolte demeure un pilier du système culture-élevage. Ces mêmes auteurs indiquent que les tiges de sorgho sont presque intégralement coupées et stockées au village pour servir comme fourrages aux gros bétails, quant aux tiges de mil qui étaient très peu conservés pour l'alimentation du bétail, une grande partie de ces chaumes est désormais coupée et conservée pour l'alimentation du gros bétail et le reste est destinée à d'autres fins (haies, clôture, combustible, etc.) (Tableau I.2). Les tiges qui sont abandonnés au champ sont soit broutées par les animaux, soit enfouies dans le sol, pour l'amender.

Tableau I.2 : Différentes formes d'utilisation traditionnelles des résidus agricoles au Niger, (en %), (Karimou et Atikou, 1998)

Mode d'utilisation	Chaumes		Pailles			Fanes	
	mil	sorgho	maïs	riz	blé	niébé	arachide
Laissé au champ	53,3	19,2	68,0	26,2	71,3	13,7	3,9
Construction	13,6	1,1	0,3	1,5	9,3		
Combustion	2,1	0,1					
Supplémentation	30,0	79,5	30,4	65,1	30,0	86,3	96,1
Autres	1,0	0,1	1,3	7,2	3,1		

En effet, en 2017, la production nationale en céréales (mil, sorgho, riz paddy, maïs, fonio) est voisine de 6 millions de tonnes sur une superficie d'environ 11 million d'hectares, et celle des cultures industrielles (arachide, canne à sucre) est estimée à plus de 700 mille tonnes sur une superficie de plus de 900 mille hectares. (INS, 2018). Toutefois, au Niger, des données précises sur les résidus agricoles sont rares or celle-ci sont d'une importance capitale dans le cadre d'une étude de valorisation. La connaissance des espèces cultivées ainsi que leur production sont des paramètres importants pour une étude d'évaluation. Le tableau I.3 indique les principales cultures céréalières, les types de résidus issus de leurs récoltes ainsi que les superficies cultivées au Niger.

Tableau I.3: Quelques cultures génératrices de résidus agricoles au Niger

Cultures céréalières	Résidus	Superficies culturales (ha)
Mil	Tiges Epis	6 998 776
Sorgho	Tiges Epis	3 819 935
Maïs	Raffles Tiges et feuille	9 567
Cultures industrielles		
Arachide	Coque	921 502
Canne à sucre	Bagasse	6 474

Dans ce qui suit nous allons voir plus en détail les potentialités de certaines cultures céréalières. Outre cela, on constate que dans la ville de Maradi, l'utilisation de certains sous-produits d'agroforesterie constitue une opportunité énergétique pour la population. Partant de ce constat, deux types de résidus d'agroforesterie feront l'objet d'une investigation du fait de leur usage en tant que combustible pour la cuisson ; il s'agit essentiellement de l'épicarpe des fruits du dattier du désert (*Balanites aegyptiaca*) et celle du fruit du palmier doum (*Hyphaene thebaica*). Après transformation, ces derniers sont souvent déversés dans la nature ou collectés et vendus sur place.

I.4.2 Ressource en riz

Selon l'étude menée par Amir (2011), la riziculture est principalement pratiquée dans la vallée du fleuve Niger, dans les régions de Niamey, de Tillabéry et de Dosso. Dans la Région de Diffa, il existe aussi des surfaces exploitées en riz. Il existe actuellement trois grandes formes de riziculture au Niger :

- une riziculture pluviale ou semi-pluviale sous inondation, très dépendante des crues et de la pluie. Les surfaces exploitées sont estimées à 10.000 ha, avec des rendements moyens de l'ordre de 0,7 t/ha.
- une riziculture de bas-fond, avec pompage individuel d'appoint. Les surfaces mises en valeur sont estimées à 1.500 ha, avec des rendements moyens de 3 t/ha.
- une riziculture irriguée : elle est pratiquée sur les périmètres aménagés (AHA) avec maîtrise totale de l'eau (périmètres encadrés par l'ONAHA). Il est aujourd'hui le système dominant. Les surfaces cultivées sont estimées à 7.000 ha dont environ 6.500 ha en double culture par an. Les rendements moyens oscillent entre 4 et 5 tonnes/ha.

Les usines de décorticage de la société RINI sont au nombre de 3 (à Tillabéry, à Kollo et à Kirkissoye-Niamey) ; avec des prévisions d'installation d'une 4ème usine (Stratégie nationale de développement de la filière riz, 2009). Ces usines rejettent dans la nature l'ensemble des balles de riz issues du décorticage ; il faut noter que la balle de riz est riche en cellulose brute (35 %) et en silice (12 %) en ce sens elle est fortement déconseillée pour l'alimentation animale (BioSUD 2013). Par ailleurs le directeur de l'usine de Kirkissoye, affirme que des réflexions sont en cours en vue de mettre en valeur ces résidus au profit de l'usine. Cela se confirme par le lancement mi-septembre 2019 d'un marché public pour l'achat, et installation d'une unité de cogénération d'électricité à base de balle de riz, à l'usine de Kirkissoye.

I.4.3 Ressource en *Balanites aegyptiaca* (dattier du désert)

Le *Balanites aegyptiaca* est une espèce très résistante à la sécheresse et relativement indifférente au type de sol. Elle figure parmi les essences choisies pour la restauration des écosystèmes sahéliens dans le contexte du projet de reforestation panafricaine de la Grande Muraille Verte (GMV). Moustapha *et al* (2014) rapporte qu'actuellement l'espèce est plantée massivement au sein de la Grande Muraille Verte (GMV) long de 7600 km et large de 15km, traversant 11 pays africains, du Sénégal à Djibouti. Au Niger, l'espèce se retrouve dans la quasi-totalité du territoire, mais des peuplements importants ont été localisés dans le nord de Dakoro dans la vallée de Koran Addoua (Centre d'échange d'information sur la biodiversité du Niger). Une autre étude signale la présence de parc à *Balanites aegyptiaca* parmi plusieurs autres espèces, dans la forêt classée de Gadabéji à Dakoro. La superficie de cette forêt est estimée à 76000ha, (Ali Mahamane et M Laoualy, 1999). Dans les travaux de D. Vincent (1993) qui ont porté sur la valorisation de *Balanites aegyptiaca* en zone Sahélienne, dans une localité au Burkina Faso, des peuplements de cette espèce ont été identifiés suivant des classes de densité variant de 2 à 10 pieds à l'hectare et de plus de 30 pieds à l'hectare. De plus, un inventaire réalisé par S. Ousseina *et al* (2015), dans la station expérimentale de Toukounous (Tillabéry), a permis d'obtenir une densité de *Balanites aegyptiaca* de 31 pieds à l'hectare. D'après D. Vincent (1993), la production des fruits se fait en deux saisons distinctes, on note une courte et une plus longue saison, il s'agit respectivement de la période juin-juillet et novembre-mars. Les résultats obtenus par ce même auteur indiquent une production moyenne de 12,8 kg de fruit/arbre pour une densité moyenne de 10 pieds/ha dans la période de juin-juillet, tandis qu'une autre étude mentionne qu'un arbre de *Balanites aegyptiaca* donne en moyenne 100 à 150 kg de fruits par an (Anne *et al*, 2004). De même selon Boittin (2014), un arbre peut donner jusqu'à 125kg de fruits mûrs par an. Le grand écart constaté entre le premier résultat et les deux derniers,

s'explique par le fait que l'étude ayant abouti au premier résultat a été conduite pendant la courte saison de fructification de l'espèce, en juin-juillet. Les caractéristiques du fruit indiquent qu'il présente une forme ovoïde de 3 à 4 cm de longueur, pèse de 10 à 15 g, la peau représente 10 % de ce poids, la pulpe 30 %, la coque du noyau 50 % et l'amande 10%. Le rapport du poids de la coque sur le poids total du fruit étant de 50%.

I.4.4 Ressource en *hyphaene thebaica* (palmier doum)

Au Niger cette espèce se rencontre en peuplement représentatif, dans la région du fleuve, le long de la Komadougou, le long du Goulbi N'kaba, dans la Korama, dans les cuvettes de Manga et les oasis de l'Air. On dénombre plusieurs projets et travaux de recherche qui se sont intéressés en particulier sur le Goulbi N'kaba ; parmi lesquels le projet d'aménagement des forêts naturelles (PAFN) ; En effet le Goulbi N'kaba se trouve dans le département de Mayahi, et localisé sur les longitudes 7° 13' & 7°57' et latitudes 13 ° 46' & 13 °49' ; il couvre une superficie définie par les limites de la vallée estimée à près de 31.500 ha (Peltier *et al*, 2008). Selon les travaux de Duhem (2003), un inventaire forestier a été mené dans le Goulbi N'kaba sur une surface de 21.000 ha. Les résultats de l'inventaire ont permis d'aboutir à une densité moyenne de 8 doums adultes/ha, ce qui donne un total de 160.272 doums adultes. Par ailleurs, les travaux de Laminou *et al* (2016) soulignent que dans les cuvettes oasiennes de Manga au Niger, le peuplement est presque exclusivement composé de *Hyphaene thebaica* avec une contribution spécifique qui varie de 60 à 92,6%. De plus, les individus femelles de cette espèce représentent 60% du peuplement inventorié. La régénération de *Hyphaene thebaica* est importante. Ainsi, les résultats de Seybou (1993) indiquaient en moyenne 1650 rejets par hectare au Dallol-Bosso et 2100 au Goulbi N'Kaba, pour Laminou *et al* (2016) ce nombre est supérieure à 150 rejets/ha dans les cuvettes de Manga, mais demeure menacée par les prélèvements et le broutage. En effet, un arbre adulte de *Hyphaene thebaica* peut produire en moyenne 50 kg de fruits par an (Soromessa, 2011). Le noyau représente 61,35% du fruit, le mésocarpe représente 24,90% et l'épicarpe 12,88% (Reda. A, 2015). La collecte des fruits immatures se fait essentiellement en juillet et août, l'activité ralentie en septembre. L'étude indique que Maradi est surtout un marché de fruit ; tandis que Niamey est approvisionné en fruit par la zone de Say (PAFN, 2004).

I.5 Les méthodes utilisées pour la gazéification de la biomasse

I.5.1 Différentes filières de conversion énergétique de la biomasse

Il s'agit essentiellement de deux voies de conversion de la biomasse

- La voie biochimique ;

- La voie thermochimique.

La voie biochimique est basée sur une dégradation de la matière organique à partir d'une action microbienne et enzymatique, et on distingue, à cet effet, trois procédés : la digestion anaérobie, la fermentation et la transestérification tandis que la voie thermochimique est essentiellement basée sur la décomposition thermique de la biomasse, selon Jeanmart et Tchouate (2005) celle-ci comprend trois procédés principaux à savoir ; la pyrolyse, la combustion et la gazéification, c'est cette dernière qui nous intéresse dans le cadre du présent travail. Car d'après Martin et Assouh (2005) la gazéification constitue jusqu'ici un des procédés les plus efficaces et bien maîtrisé pouvant produire à grande échelle un gaz de synthèse issu des combustibles solide. Cette technique, de par sa flexibilité d'utilisation et la diversité des combustibles utilisables, offre un meilleur rendement de conversion électrique supérieur à 25%, et notamment en chaleur, de plus de 70%. (Martin et Assouh, 2005).

La gazéification est la dégradation thermique de la biomasse en présence d'un agent oxydant (air, oxygène pur, vapeur d'eau, dioxyde de carbone etc...). Elle est basée sur le principe de conversion thermochimique de la biomasse en gaz combustible, qui peut être utilisé par la suite dans un moteur à combustion interne, dans un four ou une turbine à gaz, pour produire de la chaleur et/ou de l'électricité. Dans le processus de la gazéification, la biomasse est soumise à quatre phénomènes thermochimiques complexes qui se succèdent. Ils sont toujours présents mais leur déroulement et leur configuration spatiale et temporelle peuvent différer selon le mode d'introduction de la biomasse, l'agent gazéifiant et le type de gazogène (Deglise et Lede, 1980 ; Reed et Das, 1988).

Les paramètres clés de la gazéification sont les propriétés de la matière première (l'humidité, les cendres, les volatiles), le prétraitement de l'échantillon (séchage, taille des particules, structure, etc.), et les conditions expérimentales. Les réacteurs sont principalement regroupés en différents types : lit fixe, lit fluidisé et lit entraîné. Dans un lit fixe à co-courant la biomasse est introduite dans la partie de l'alimentation (au sommet du réacteur) puis subit un séchage (à une température de 100 °C), ensuite une pyrolyse à une température d'environ de 300 °C en absence d'oxygène et par la suite une phase de réduction à 800 °C avant d'atteindre la phase d'oxydation à 1000 °C. Les gaz générés, généralement du CO et du d'H₂, sont récupérés vers le bas du réacteur. Les gaz produits, peuvent être utilisé dans un moteur adapté, et permettre une production d'électricité grâce à un alternateur couplé au moteur. Par ce système, 1 kg de bois ou de paille pourrait fournir 0,8 kWh (Sourie Jean-Claude, 1980). La gazéification est ainsi représentée sur la figure I.2.

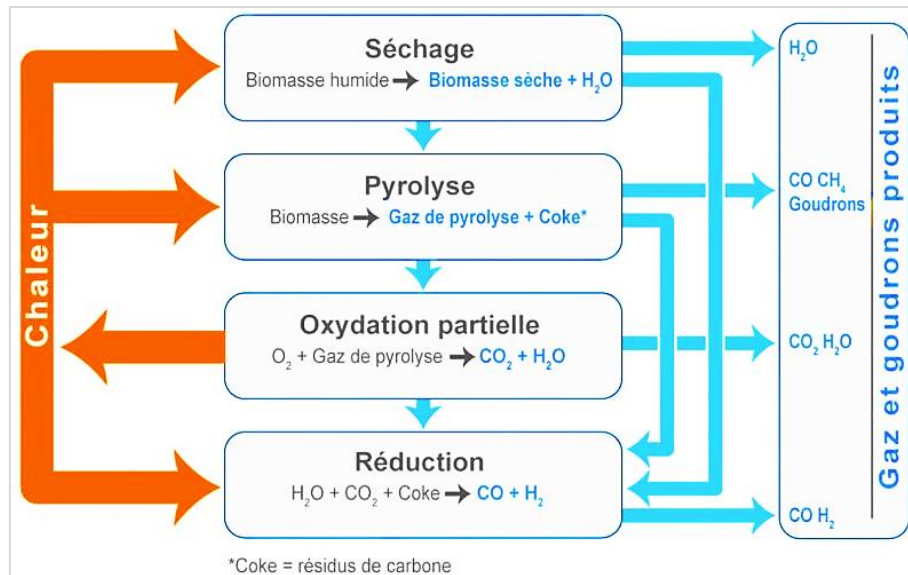


Figure I.1: Processus de la gazéification (Zhu et Venderbosch, 2005)

I.5.2 Les quatre étapes de la gazéification

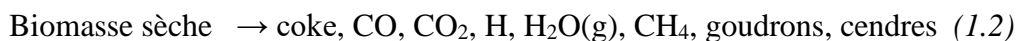
a. Le séchage

Cette première étape consiste à réduire l'humidité contenue dans le combustible sans décomposition chimique. Suivant la technologie de gazéification, un séchage préalable peut être nécessaire si le taux d'humidité est supérieur à 25% (Gerun, 2007). Ce phénomène est très endothermique, il requiert donc beaucoup d'énergie :



b. La pyrolyse

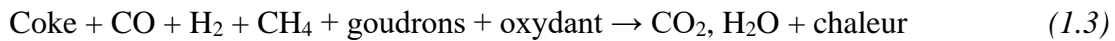
La pyrolyse signifie la décomposition thermique de la matière cellulosique en absence d'oxygène (O₂). Elle se produit à partir de 250°C (Gerun, 2007), et conduit à l'obtention des produits solides, des vapeurs condensables et des gaz incondensables. La pyrolyse est généralement considérée autothermique, c'est-à-dire qu'elle ne consomme ni ne produit d'énergie, en dehors de l'apport de chaleur nécessaire à "la montée en température" de la biomasse.



c. L'oxydation

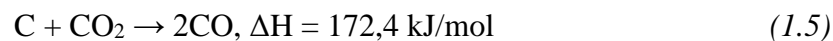
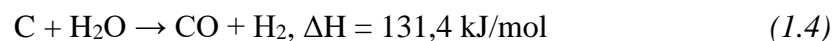
Cette opération se fait en présence d'un oxydant, son choix est fondamental car il gouverne la conception du gazogène et de son choix dépend l'utilisation finale du gaz. C'est essentiellement lui qui fixe le PCI du gaz à la sortie du gazogène. Quatre principaux types d'oxydant sont employés : l'air, l'oxygène pure, la vapeur d'eau et l'hydrogène. En général l'air est de très loin le plus utilisé en pratique, de par sa simplicité d'utilisation, notamment dans le cas des

gazogènes à lit fixe. La vapeur d'eau est parfois employée comme additif pour améliorer le PCI du biogaz mais est peu utilisée comme unique oxydant dans les installations de faible puissance. Le ratio air/combustible est un paramètre crucial dans l'optimisation du gazogène. Il est compris entre 1 :1 et 3 :1 en termes de masse lors de la gazéification du bois à l'air par exemple. Cela correspond à un facteur d'air de 0,15 à 0,5. En résumé :



d. La réduction

Dans la zone de réduction, le coke de pyrolyse est converti en gaz (« gazéification du charbon ») grâce à plusieurs réactions chimiques en compétition. Dans le cas idéal, la totalité des gaz de pyrolyse est convertie en dioxyde de carbone et en vapeur d'eau lors de l'oxydation partielle. Si l'oxygène est absent, alors seulement deux réactions hétérogènes endothermiques peuvent être considérées : Il s'agit de gazéification à la vapeur d'eau ou réaction de vapogazéification (équation 1.4) et gazéification au dioxyde de carbone ou réaction de Boudouard (équation 1.5).



Ces deux réactions sont prépondérantes pour la production du gaz de synthèse et méritent une attention particulière. Par ailleurs, selon Mermoud (2006), la réaction de gazéification du charbon de bois au dioxyde de carbone a une cinétique 2 à 5 fois plus lente que la réaction de gazéification à la vapeur d'eau. La quantité d'air utilisée dans le processus détermine la température dans le réacteur. Elle influe donc fortement sur la nature des gaz produits et le taux de goudrons. La gazéification utilise en pratique un facteur d'air d'environ 0,3 pour une biomasse relativement sèche (15% d'humidité). Il faut donc trouver le bon équilibre entre ces deux critères pour optimiser le PCI et la quantité des gaz produits, tout en maintenant une température élevée et un faible taux de goudrons.

I.5.3 Outils d'évaluation de la performance d'un gazogène

a. Bilan de masse

En effet, dans un gazogène, les réactifs sont le combustible et l'air, les produits obtenus sont le gaz combustible, les cendres ainsi que les suies et particules retenues par le filtre (appelé cyclone) qui constitue la première étape du traitement secondaire. Le bilan de masse de la gazéification est donné par Gerun (2007) à travers l'équation suivante :

$$\dot{m}_{comb} + \dot{m}_{air} = \dot{m}_{gaz} + \dot{m}_{cendres} + \dot{m}_{résidus-filtres} \quad (1.6)$$

b. Bilan énergétique

Dans un gazogène, les pertes du système, correspondent à la chaleur échangée par les parois avec l'extérieur ainsi qu'à l'enthalpie des cendres et des particules piégées dans le cyclone. La chaleur des gaz peut être éventuellement récupérée via un échangeur de chaleur, et servir à préchauffer l'air ou la biomasse avant leur introduction dans le réacteur. Le bilan énergétique (Gerun, 2007), s'écrit :

$$\dot{m}_{comb}h_{comb} + \dot{m}_{air}h_{air} = \dot{m}_{gaz}h_{gaz} + \dot{m}_{cendres}h_{cendres} + \dot{m}_{résidus-filtres}h_{cendre-filtres} + P_{pertes-parois} \quad (1.7)$$

Martin et Pardoën (2002) nous donnent une idée de la répartition de l'énergie pour un petit gazogène expérimental, voir tableau I.4.

Tableau I.4: Répartition de l'énergie pour un gazogène Imbert de laboratoire

Cyclone (filtre)	Cendrier	Pertes Parois	Chaleur gaz	PCI gaz
3%	8%	9%	11%	69%

c. Calcul du rendement de la gazéification

Le rendement d'un processus de gazéification peut être exprimé à partir des PCI des produits gazeux et du PCI du combustible solide utilisé. Ce rendement répond de façon générale à l'expression suivante au rapport du contenu énergétique utile du gaz produit sur le contenu

$$\eta_{gaz} = \frac{aPCI^{CO} + dPCI^{H_2} + cPCI^{CH_4}}{PCI_{CH_xO_y}} \quad (1.8)$$

(Ruhrose, 1992). avec : $PCI_{CO} = 282,4 \text{ MJ.kmol}^{-1}$; $PCI_{H_2} = 241,8 \text{ MJ.kmol}^{-1}$; $PCI_{CH_4} = 802,4 \text{ MJ.kmol}^{-1}$ Les coefficients : a, c et d sont les nombres de moles de CO, de H₂ et de CH₄ produits par gazéification d'une mole de biomasse.

Selon Martin et Assouh (2005), l'efficacité énergétique du gazogène, exprimée en termes de conversion du PCI de la fraction sèche du combustible consommé, en PCI du gaz produit, peut dépasser 75% dans les installations de bonne qualité utilisant un combustible sec et peu cendreuse, mais atteint moins de 60% sur des installations élémentaires. Combinée à l'utilisation du gaz dans des moteurs à gaz performants atteignant aujourd'hui 35 à 40% de rendement sur PCI du gaz, la gazéification en lit fixe à co-courant peut ainsi atteindre un rendement net de l'ordre de 25 à 30% de conversion en électricité de l'énergie des combustibles ligneux.

Conclusion

Ce chapitre nous a permis de comprendre de façon générale, les principales méthodes d'évaluation du potentiel de la biomasse, un aperçu sur les récoltes productrices de résidus

agricole au Niger, suivi d'un état de l'art sur les gazogènes, notamment les verrous technologiques du procédé, et enfin quelques propriétés de la biomasse.

CHAPITRE II : Matériels et Méthode

Introduction

Cette partie décrit l'ensemble des matériels et méthodes utilisés pour mener à bonne fin la présente étude, qui repose sur l'évaluation du potentiel énergétique des résidus agricoles et d'agroforesterie. Cette section permettra d'identifier les zones productrices des résidus et éventuellement les unités de transformations qui rejettent d'importante quantité de ces résidus, et en dernier ressort la détermination du potentiel énergétique en électricité récupérable. Elle traite du montage expérimental utilisé pour effectuer les essais de gazéification, et aborde la méthode de caractérisation des échantillons de biomasses sélectionnées.

II.I Méthode d'évaluation de la ressource en biomasse et de leurs potentiels énergétiques

II.1.1 Ressource en résidus agricoles

La méthode adoptée pour cette étude de potentiel, est celle basée sur les données statistiques et du ratio déchet-produits. L'outil BEFS-RA version 1.0, développé par la FAO a été utilisé. Celui-ci utilise une approche qui permet d'évaluer la disponibilité des matières premières et estimer la part qui pourra être utilisée pour produire la bioénergie à partir des cultures, des résidus agricoles et de l'exploitation forestière.

Par ailleurs l'outil fournit une base de données des produits des cultures de rente et dont les résidus sont appropriés pour la production d'énergie. En outre, il fournit des coefficients par défaut du ratio déchet-produit. Compte tenu de l'indisponibilité des coefficients relatifs au contexte du Niger, nous ferons usage d'une liste de coefficients utilisée par Adamon (2017), dans le cas d'une étude de valorisation des résidus de culture au Bénin. En plus des coefficients qu'elle offre, cette liste a l'avantage de préciser le contenu énergétique relatif aux types de résidus. La méthode de l'outil BEFS-RA est basée sur un certain nombre d'hypothèses que nous considérons dans cette étude, celles-ci sont exposées ci-après :

Hypothèses :

- La quantité des déchets est positivement corrélée à la production agricole sur la base du ratio déchet/produit ;
- Pour le maintien de la fertilité et la stabilité du sol, une certaine quantité des résidus doit être laissé au sol après la récolte ;
- Du fait des inconvénients de brûler les résidus dans les champs, ces quantités peuvent être affectés pour un usage bioénergétique ;
- La production d'énergie ne doit pas être priorisée face à l'utilisation déjà existante, des résidus à des fins utiles.

L'outil utilise deux autres valeurs par défaut dans l'évaluation :

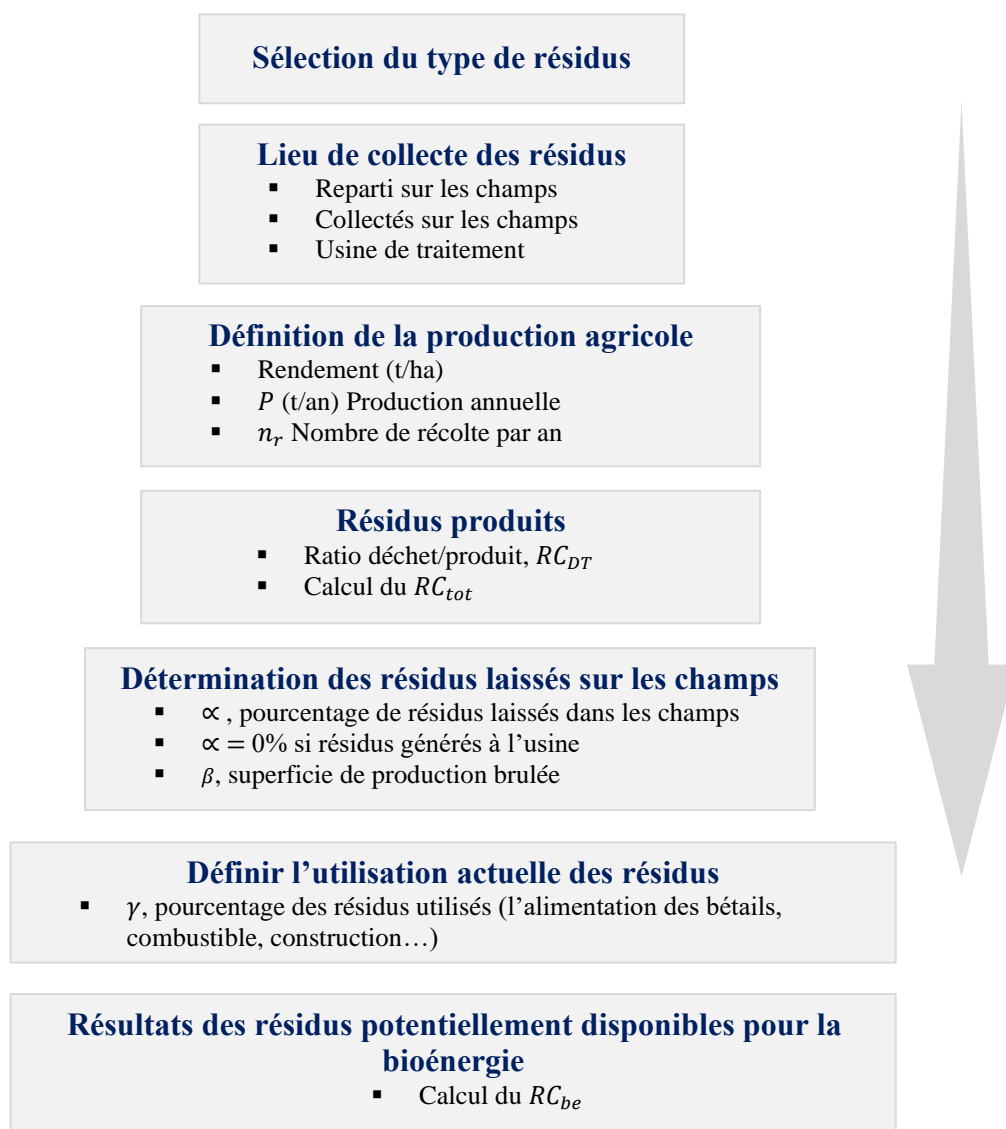
- 25% des résidus sont laissés sur les champs pour la fertilité des sols ou 0% si l'emplacement du traitement est l'usine.
- 10% des résidus sont brûlés sur le champ.

L'outil indique que la valeur par défaut de la quantité de résidus brûlée sur les champs est issue du Guide de bonne pratique (GIEC, 2003), tandis que celle de la quantité des résidus laissés sur les champs résulte d'avis d'autres experts.

Pour compléter ces hypothèses, l'estimation des résidus de culture a été faite en considérant les utilisations actuelles des biomasses suivant les scénarios que nous avons établis comme suit :

- Les données fournies dans le tableau I.1, sur l'utilisation des résidus (alimentation des bétails, construction...) seront considérées dans les calculs du potentiel ;
- Les pourcentages des résidus utilisés comme combustible seront pris en compte comme part disponible pour la bioénergie.
- Là où les données sont manquantes, les valeurs par défaut des résidus laissés sur les champs et brûlés sur les champs seront utilisées.

La figure II.1 donne une présentation générale de la méthode.



Organigramme II. 1: Méthode d'estimation du potentiel de résidus agricole pour la bioénergie

Les équations (2.1) et (2.4) de FAO (2014b) ont été utilisées pour l'estimation des quantités utilisables pour la production énergétique.

$$RC_{tot} = P \times RC_{DT} \quad (2.1)$$

$$RC_{lc} = \alpha \times RC_{tot} \quad (2.2)$$

$$RC_U = \sum_i \gamma_i \times RC_{tot} \quad (2.3)$$

$$RC_{be} = RC_{tot} - (RC_{lc} + \sum RC_U) \quad (2.4)$$

Où P , [t/année] : production annuelle de cultures (t) ; RC_{DT} : ratio déchet-produit ; RC_{be} [t/an] : résidus de cultures disponibles pour la bioénergie ; RC_{tot} [t/an] : quantité totale de résidus de culture produits par an ; RC_{lc} [t/an] : résidus de culture laissés sur les champs

RC_U [t/an] : résidus de culture utilisés à d'autres fins

Les données des productions agricoles sur 10 ans au plan national allant de 2008 à 2017 ont été prises comme données de référence pour l'étude. Notons (A_1) le potentiel disponible des résidus agricoles et à l'issue d'application des critères de sélection, nommons les résidus agricoles sélectionnés par (A_2). Enfin, les ratios et PCI des résidus agricoles utilisés pour l'évaluation sont présentés au tableau II.1.

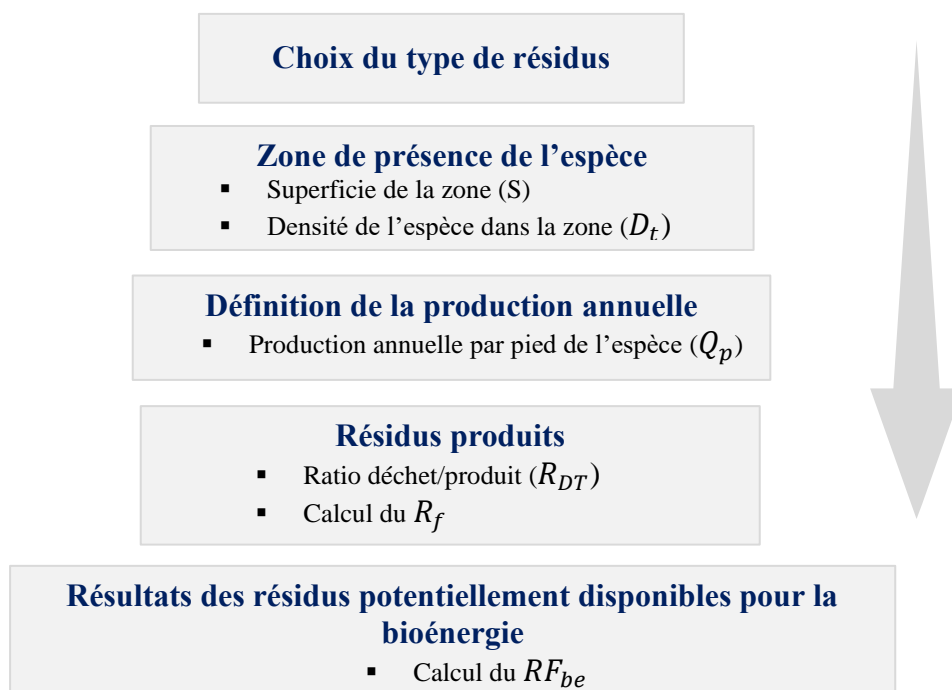
Tableau II.1: Ratio déchet/produit et contenu énergétique des déchets agricoles

	Types de déchets	Ratio déchet/produit	PCI (kcal/kg)	Sources
Mil	Tiges	2	2500	Etudes Engineering Development (EED), cité par Adamon (2017)
	Epis	0,5	3500	
Sorgho	Tiges	2	2500	
	Epis	0,5	3500	
Riz paddy	Paille	1	3000	
	Balles	0,25	2500	
Maïs	Raffles	1	3500	
	Tiges et feuilles	3	2500	
Arachide	Coque	0,47*	4417**	FAO*; (2014b)*; Vladimir <i>et al.</i> (2013) **
Canne à sucre	Bagasse	0,26*	4206**	FAO* (2014b)* ; Andrea <i>et al.</i> (2013) **
	Feuilles/dessus	0,2*	-	

II.1.2 Potentiel des résidus des produits forestiers

Pour les produits forestiers, la production fruitière par pied d'arbre, et la densité de peuplement de chaque espèce pris dans les zones à présence significative, renseignées dans la littérature ont été considérés. En somme pour évaluer le potentiel en résidus de fruit des ressources forestières, nous ferons usage des paramètres suivants :

- Production moyenne annuelle par pied de l'espèce ;
- La densité de l'espèce dans la zone considérée ;
- La superficie de la zone considérée ;
- et le ratio déchet-produit du fruit de l'espèce.



Organigramme II. 2: Méthode d'estimation du potentiel des résidus de fruit des espèces forestières

Les équations (2.5) à (2.7) de FAO (2014b) ont été utilisées pour l'estimation des quantités de résidus de foresterie utilisables pour la production énergétique.

$$P = S \times D_t \times Q_p \quad (2.5)$$

$$R_f = P \times R_{DT} \quad (2.6)$$

$$RF_{be} = \omega \times R_f \quad (2.7)$$

Où P (kg) : production annuelle en fruit ; S (ha) : superficie ; D_t (Pied/ha) : densité moyenne de l'espèce ; Q_p (kg/pied/an) : production moyenne annuelle en fruit par pied d'arbre ; R_f (kg) : quantité de résidu fruit produit ; R_{DT} : ratio déchet-produit ; ω (%) : pourcentage mobilisable ; RF_{be} : Quantité de résidus disponible pour la bioénergie. (FAO, 2014b)

Les zones d'étude choisies pour l'*Hyphaene thebaica* sont les localités de Goulbi N'Kaba, Dallol Bosso, Mainé-Soroa ainsi que d'autres sites rapportés dans la littérature et pour le balanites aegyptiaca la forêt de Gadabéji, le Dallol Bosso de même que d'autres sites identifiés dans la littérature.

II.1.3 Choix de la biomasse

Dans ce travail, les biomasses étudiées sont des biocombustibles purement d'origine végétale, dont les résidus agricoles et ceux d'agroforesteries. Etant donné que la valorisation

thermochimique nécessite comme matière première la biomasse sèche, nous allons nous focaliser sur les résidus secs, notamment ceux produits en grande quantité.

II.1.4 Calcul du potentiel énergétique

Le potentiel énergétique brut thermique est obtenu, en multipliant la quantité de déchet utilisable par la valeur énergétique du type de déchet et enfin par le rendement moyen des équipements de conversion.

$$E_e = R_{be} \times PCI \times \eta_e \quad (2.8)$$

$$E_{th} = R_{be} \times PCI \times \eta_{th} \quad (2.9)$$

Etant donné que le rendement électrique (η_e) de la gazéification est supérieur à 25% tel qu'annoncé plus haut dans la synthèse bibliographique, la valeur du rendement énergétique dans l'évaluation de ce potentiel sera considérée à 25% pour le calcul du potentiel électrique et 70% dans le cas d'une valorisation énergétique thermique.

II.2. Matériels et méthodes des essais préliminaires de gazéification

II.2.1 Matériels

a. Le gazogène

Le gazogène utilisé est de type co-courant à lit fixe, construit par le département de génie mécanique de l'IUT de Maradi (Figure II.3). Sa puissance est estimée à 10 kWe. Son alimentation en biomasse est discontinue, il dispose d'une grille qui peut être secouée en actionnant un poignet dans un mouvement de haut vers le bas pour faciliter la descente des cendres et éviter la formation des mâchefers, il comporte également des thermocouples de type K positionnées sur quatre niveaux : zone de séchage, zone de pyrolyse, zone d'oxydation et zone de réduction ou gazéification.



Figure II .1: Gazogène de l'étude (Gado et al, 2019)

b. l'acquisiteur de température

C'est un Data logger ou enregistreur de données, de type Testo 176T4 avec écran d'affichage, il comporte quatre (4) canaux de mesure offrant ainsi la possibilité de connecter quatre thermocouples simultanément. Il permet l'enregistrement en °F et en °C, avec une plage de mesure allant de -195°C à 1000°C, ce qui lui offre la prise en charge des thermocouples de type K, T et J.

c. Balance

Deux types de balances ont été utilisés. Celle ayant servi aux pesées des quantités des biomasses gazéifiées, est le modèle Ws-150 compute charging scale, capable d'effectuer des mesures dans une plage allant de 10g à 150kg avec une précision de $\pm 1\%$; et celle utilisée pour la pesée des échantillons de l'analyse immédiate, est une microbalance de capacité 220g avec une précision de $\pm 0,1\text{mg}$.

d. Etuve et Four

L'étuve, c'est l'appareil au sein duquel a été effectuée l'analyse du taux d'humidité des échantillons. Le four qui a servi aux analyses du taux des cendres et des matières volatiles est de caractéristique 220v/19 A/4Kw.

II.2.2 Méthodes

a. Démarche générale des essais de gazéification

Pour la présente étude l'acquisiteur de donnée de température a été configuré pour la prise en charge des thermocouples de type K avec une cadence de mesure fixée à 10 secondes. Le

principe de l'essai consiste dans un premier temps à lancer l'acquisiteur de température préalablement raccordé aux quatre thermocouples fixés sur le gazogène. Ensuite mettre en marche la soufflante. La partie d'alimentation du gazogène étant ouverte, débiter le chargement du gazogène en biomasse jusqu'à atteindre le niveau d'injection d'air primaire, puis introduire environ 200g de charbon de bois incandescent, attendre environ une minute pour permettre à la biomasse de s'enflammer, ensuite poursuivre rapidement le chargement du gazogène avec la biomasse jusqu'au remplissage complet, et fermer de façon hermétique la partie alimentation. Il faut noter que chaque quantité de biomasse est pesée à l'aide de la balance avant d'être introduite dans le gazogène. L'opération du chargement du gazogène dure en moyenne 10 minutes. La sortie des gaz au niveau de la torchère est régulièrement contrôlée à l'aide d'un briquet ou une allumette, afin de constater la formation des gaz combustibles. Noter le temps d'apparition des premières flammes au niveau de la torchère, ainsi que la durée de stabilisation de la production du biogaz. Garder le contrôle sur l'évolution des températures enregistrées par l'acquisiteur, notamment la T_3 et T_4 . Avant et après le début de la formation des gaz combustibles constatés au niveau de la torchère, la grille est secouée tous les 5 à 10 minutes pour accélérer la descente des cendres et favoriser davantage les réactions de réduction. Après la fin du test, laisser refroidir complètement le gazogène jusqu'au jour suivant, ouvrir le cendrier et le cyclone (filtre) pour extraire les cendres. Ouvrir la partie alimentation pour accéder à l'enceinte du réacteur extraire les éventuels imbrulés. Peser à l'aide de la balance les cendres et imbrulés collectés. Nettoyer la torchère, les tuyaux et préparer le prochain test.

b. Mesures effectuées

Les mesures effectuées au cours de l'essai de gazéification sont principalement la mesure des températures, et la durée de la gazéification. En plus, d'autres mesures indispensables au test ont été faites, il s'agit de : la pesée de la quantité de biomasse gazéifiée ; la mesure de la durée du processus et la pesée des cendres et charbon résiduels en fin de test.

II.3 Analyse immédiate des biomasses et du pouvoir calorifique

Pour chaque biomasse étudiée, cinq (5) échantillons ont été utilisés par type d'analyse effectué. Une fiche a été élaborée pour enregistrer les données des différentes analyses. La détermination du taux d'humidité des échantillons a été effectué dans l'étuve à (105 ± 2) °C suivant la norme AFNOR/X 34 B N° 110. Étant donné que l'humidité déterminée par rapport à la masse anhydre, autrement dit sur base sèche, est peu utilisée dans le domaine de l'énergie (Schenkel et Temmerman, 2005), une préférence a été portée sur la méthode de détermination sur base humide.

Les cendres sont les résidus obtenus après incinération complète de la biomasse solide. L'analyse du taux de cendre a été effectuée dans un four suivant la norme AFNOR/X 34 B N° 113. Les matières volatiles sont des composés qui peuvent rapidement s'échapper lorsqu'on soumet la matière à une haute température. Cette analyse a été effectuée en introduisant la biomasse préalablement broyée et placée dans un creuset, au sein du four porté à une température de 900°C, pendant exactement 7 minutes d'après la norme AFNOR/X 34 B N° 289. Le carbone fixe est le carbone restant après élimination de l'humidité, des matières volatiles et des cendres. La norme AFNOR/X 34 B N° 289 utilisée précise la formule pour le calcul du taux de carbone fixe. Le pouvoir calorifique supérieur est déterminé à l'aide d'une bombe calorimétrique, sa détermination a été faite sur la base de la norme AFNOR/X 34 B N° 254.

Conclusion

Dans cette partie, nous avons présenté de façon détaillée la méthodologie utilisée dans cette étude ; de la méthode d'évaluation du potentiel de la biomasse à celle de la gazéification en passant par celle de l'analyse immédiate des échantillons. Les matériels utilisés y sont aussi présentés de façon succincte.

CHAPITRE III : Résultats et Discussions

Introduction

Cette section présente les résultats issus de l'évaluation du potentiel des biomasses sélectionnées ainsi que ceux des essais de gazéification effectués. La caractérisation des échantillons des biomasses a été faite en vue de la détermination de leurs contenus énergétiques, nécessaire à l'évaluation du potentiel énergétique. Les paramètres fondamentaux tels que l'évolution des températures, les durées de la gazéification, ont été suivis et analysés au cours des essais.

III.1 Évaluation de la ressource en résidus de culture

III.1.1 Estimation du potentiel total brut

Le potentiel total brut considéré dans cette étude, constitue le gisement total de l'ensemble des sous-produits agricoles retenus. Les données recueillies dans les annuaires statistiques de l'INS présentées au tableau III.1, renseignent sur les principales productions agricoles au Niger sur 10 ans. Ces données ont été collectées dans 3 annuaires statistiques à savoir celui de 2008 à 2012, celui de 2010 à 2014 et celui de 2013 à 2017. Les différentes productions des cultures rapportées dans le tableau III.1 ont été scindées en deux catégories dans les annuaires statistiques : les cultures céréalières (mil, sorgho, riz paddy, maïs...) et les cultures industrielles (arachide, canne à sucre).

Tableau III.1: productions céréalières et industrielles en tonnes

Années	Mil	Sorgho	Riz paddy	Maïs	Arachide	Canne à sucre
2008	3489400	1311100	32000	6100	305000	187800
2009	2677900	738700	20100	1400	211900	211900
2010	3843351	1304832	29963	9381	406245	222500
2011	2760917	770322	12230	6366	395700	176700
2012	3862155	1375697	5429	8413	291800	207500
2013	2815937	1222393	4706	4873	342743	194582
2014	2921982	1320250	13427	7071	403365	226928
2015	3404813	1916590	10726	5669	427030	220635
2016	388600	1808300	11300	7100	453228	216037
2017	3790028	1944256	13200	6380	461841	252854
Moy. annuelle	3345248,3	1371244	15308,1	6275,3	369885,2	211743,6

Source : INS.

Dans le Tableau III.2 ci-dessous sont présentés les résultats de l'évaluation brute des résidus, calculés sur la base des ratios résidu-produits. En moyenne sur 10 ans, la production du Maïs, Riz paddy, Mil, Sorgho, Arachide et Canne à sucre a généré une quantité brute de résidus

estimée à 11.835.400 tonnes, ces dernières restent dominées par le mil suivi du sorgho et de l'arachide.

Tableau III.2: Quantités brutes de déchets générés par les cultures céréalières en millier de tonne

Type déchets	Mil		Sorgho		Riz paddy		Maïs	
	Tiges	Epis	Tiges	Epis	Paille	Balles	Rafles	Tiges
Ratio	2	0.5	2	0.5	1	0.25	1	3
2008	6978,8	1744,7	2622,2	655,6	32	8	6,1	18,3
2009	5355,8	1339	1477,4	369,4	20,1	5	1,4	4,2
2010	7686,7	1921,7	2609,7	652,4	30	7,5	9,4	28,1
2011	5521,8	1380,5	1540,6	385,2	12,2	3,1	6,4	19,1
2012	7724,3	1931,1	2751,4	687,8	5,4	1,4	8,4	25,2
2013	5631,9	1408	2444,8	611,2	4,7	1,2	4,9	14,6
2014	5844	1461	2640,5	660,1	13,4	3,4	7,1	21,2
2015	6809,6	1702,4	3833,2	958,3	10,7	2,7	5,7	17
2016	7772	1943	3616,6	904,2	11,3	2,8	7,1	21,3
2017	7580,1	1895	3888,5	972,1	13,2	3,3	6,4	19,1
Moy. annuelle	6690,5	1672,6	2742,5	685,6	15,3	3,8	6,3	18,8
Somme moy annuelle	8363,1		3428,1		19,1		25,1	

Le tableau III.3 ci-dessous, présente les quantités de résidus générés par les cultures de rente.

Tableau III.3: Quantité des déchets générés par les cultures de rente, en millier de tonne

Types de déchets	Arachide	Canne à sucre	
	Coques	Bagasses	Feuilles
Ratio	0,47	0,26	0,2
2008	143,4	55,1	10
2009	99,6	57,9	9,7
2010	190,9	45,9	9,7
2011	186	54	8,8
2012	137,1	50,6	8,2
2013	161,1	59	0
2014	189,6	57,4	8,3
2015	200,7	56,2	8,9
2016	213	65,7	7,4
2017	217,1	55,1	7,8
Moy. annuelle	173,8	55,7	7,9
Somme moy annuelle		63,6	

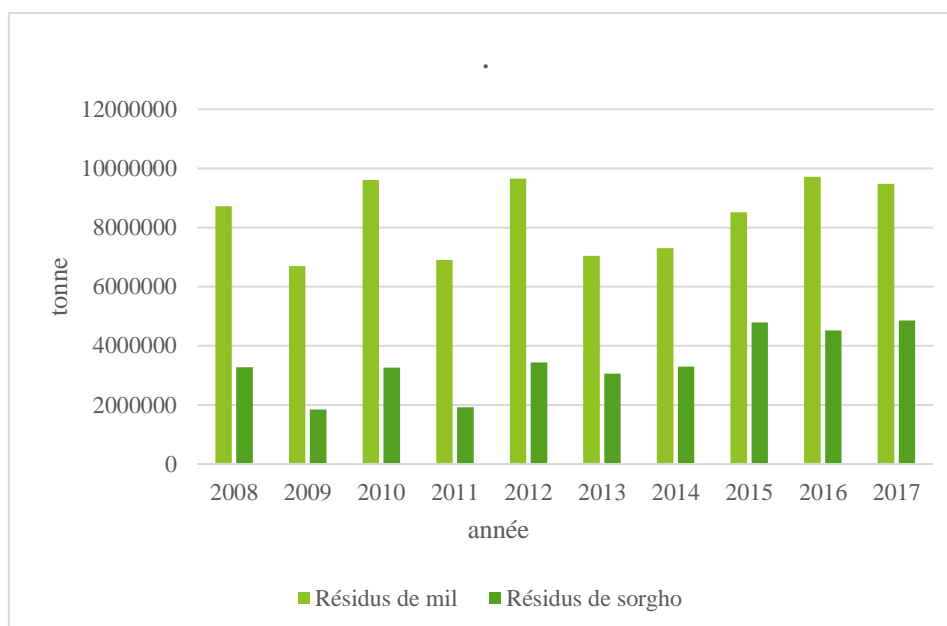


Figure III.3: Évolution des quantités brutes de résidus de mil et sorgho sur le plan national, de 2008 à 2017

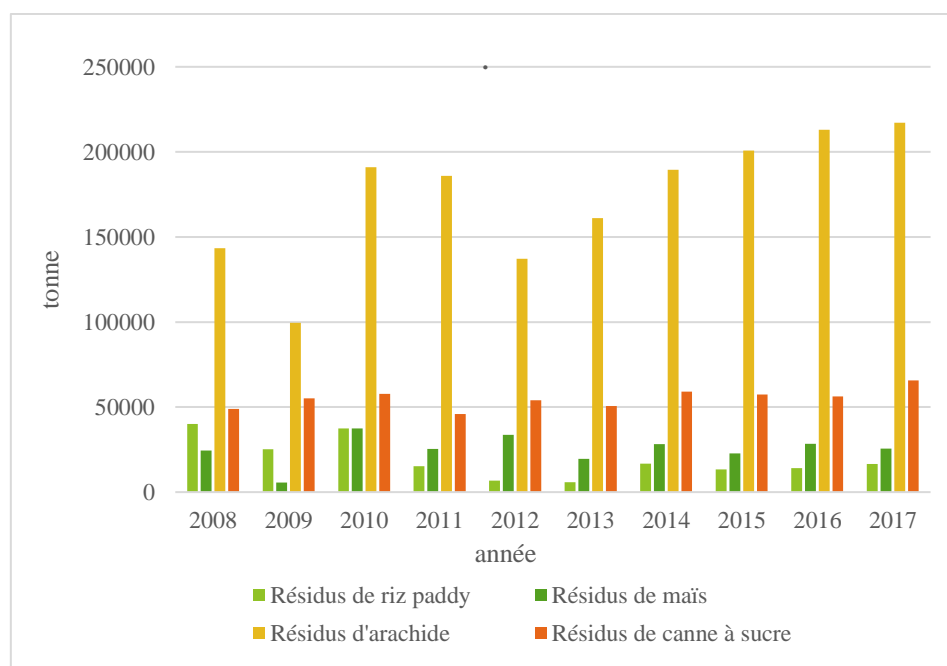


Figure III.4: Évolution des quantités brutes de résidus d'autres cultures, générés sur le plan national, de 2008 à 2017

Sur la figure III.2, de 2008 à 2012, on constate une importante fluctuation suivie de forte baisse, des résidus du mil et du sorgho. En revanche à partir de 2013 jusqu'à 2017 on observe une nette croissance de la presque totalité de ces résidus, ce qui augmente la disponibilité de leurs quantités. Cependant, il est utile de rappeler que ces résultats sont bruts, de ce fait ces quantités ne sont quasiment pas mobilisables dans la réalité, par conséquent leur évaluation doit être soumise à des conditions qui s'approchent de la réalité.

III.1.2 Estimation des résidus potentiellement disponibles pour la bioénergie

Dans cette étude, les résidus potentiellement disponibles pour la bioénergie, sont ceux dépourvus des concurrences entre l'utilisation humaine ou animale, avec l'usage énergétique. A cet égard, l'application des conditions mentionnées dans la méthodologie de ce document, qui prennent en compte les besoins tant pour l'homme que pour le bétail, ainsi que les parts destinées à améliorer la fertilité des sols, (Annexe 1, 2, 3,) nous permet d'aboutir à un potentiel disponible pour la bioénergie, chiffré à 2.255.471 tonnes, ce qui diffère d'environ 400 kilotonnes avec le résultat de Dassapa (2011) dans son étude portant sur le potentiel de la biomasse énergie en Afrique subsaharienne, qui obtint un potentiel de 2,672 millions de tonnes de résidus agricoles pour le Niger. Cette différence peut s'expliquer par le choix du ratio déchet/produit. Les tableaux III.4 et III.5 présentent la répartition du potentiel des résidus agricoles obtenu dans notre étude. En effet d'après le tableau I.2 les chaumes de mil et de sorgho seulement sont concernés par la combustion, et les quantités allouées à la combustion peuvent être affectées pour un usage moderne et bioénergétique, il s'agit de 2,1% et 0,1% respectivement pour les tiges de mil et du sorgho, quant aux feuilles de canne à sucre, la valeur par défaut de 25% laissées sur les champs a été considérée.

Tableau III.4: Quantité de résidus des cultures céréalières (A1), potentiellement disponible pour la bioénergie

Type déchets	Mil		Sorgho		Riz paddy		Maïs	
	Tiges	Epis	Tiges	Epis	Paille	Balles	Tiges	Raffles
Pourcentage	2,1%	100%	0,1%	100%	0%	100%	0%	100%
Quantité (kt)	140 ,5	1672,6	2,7	685,6	0	3,8	0	18,8

Tableau III.5: Quantité de résidus de culture de rente (A1), potentiellement disponible pour la bioénergie

Type déchets	Arachide	Canne à sucre	
	Coque	Bagasse	Feuilles
Pourcentage	100%	100%	75%
Quantité (kt)	173,8	55,7	31,7

Le potentiel disponible obtenu ne représente en effet que 21,91% du potentiel total brute de l'ensemble des cultures.

III.1.3 Choix de la biomasse

A l'issu des calculs du potentiel, on constate au tableau III.6, que les tiges de mil, du sorgho et du maïs présentent des rendements proches ou égaux à zéro (0), ce qui nous amène à les éliminer de l'étude, car en plus de leurs fortes utilisations dans l'habitat humain et l'alimentation animale, Diedhiou (2017) indique que la valorisation thermochimique de ces types de résidus est limitée par une contrainte liée à leurs compositions spongieuses qui leur confèrent une masse volumique relativement faible et un faible rendement de production de chars, en revanche une solution de densification pour un conditionnement en briquettes combustibles peut s'avérer plus avantageuse. La paille de riz n'est également pas éligible pour les mêmes raisons citées précédemment.

S'agissant des balles de riz et rafles de maïs, ces résidus contiennent un taux relativement élevé en silicium respectivement 93,5 % pour les balles de riz et 48,4 % pour les rafles de maïs (Adamon, 2017). Ce fort taux en silicium place à l'abri de tout usage ces biomasses dans l'alimentation du bétail : Ce qui permet de noter l'absence d'un conflit nutritionnel entre ces résidus agricoles et leur valorisation énergétique envisagée dans le cadre de cette étude.

Si l'on tienne compte de la question d'accessibilité de ces résidus, l'on se rend compte que les résidus de riz, notamment la balle de riz, ont l'avantage d'être facilement accessible du fait que leur approvisionnement peut se faire directement dans les usines de décorticage, en plus ces usines sont majoritairement localisées dans la zone du fleuve. C'est le cas de la coque d'arachide qui est d'ailleurs utilisée comme combustible dans les ménages, et peut être approvisionnée auprès des usines de production d'huile d'arachide. Donc à ce niveau, les résidus disponibles dans des usines, si ces usines sont dans des localités proches, ont des avantages d'être plus accessibles que les résidus dispersés dans les champs.

On remarque de plus que le calcul du rendement en termes de production de résidus, tableau III.6, fait ressortir qu'après les résidus de la canne à sucre, la balle de riz possède le plus fort rendement en production des résidus à hauteur de 0,71 t/ha. Ces résultats peuvent s'expliquer en partie, du fait de la transformation du riz paddy en usine ce qui limite les pertes, ainsi qu'en raison de la double production du riz paddy dans l'année, pendant la saison hivernale et la saison sèche, ce qui favorise leurs disponibilités. En revanche pour la canne à sucre, l'indisponibilité d'une filière de transformation industrielle au Niger, limitera la collecte des résidus, malgré les forts rendements de 11,39 et 6,57 respectivement pour la bagasse et les feuilles.

Tableau III.6: Rendement en production de résidus disponibles pour la bioénergie

	Résidus	Rendement tonne/ha
Mil	Tiges	0,02
	Epis	0,24
Sorgho	Tiges	0
	Epis	0,20
Riz paddy	Paille	0
	Balles	0,71
Mais	Rafles	0,28
	Tiges et feuilles	0
Arachide	Coque	0,24
Canne à sucre	Bagasse	11,39
	Feuille/haut	6,57

A l'issue de ces analyses, les résidus de récolte nommés (A2), sélectionnés sont : les épis de mil et sorgho, les rafles de maïs, la balle de riz, les coques d'arachide et la bagasse de la canne à sucre. La suite de l'évaluation portera exclusivement sur ces derniers.

III.1.4 Estimation des résidus potentiellement mobilisables

Les résidus potentiellement mobilisables représentent ici la part des résidus dont il est possible de collecter, en effet, Sourie Jean-Claude (1980) souligne que la valorisation énergétique des sous-produits de culture est quelque part "largement freinée par les contraintes de collecte". En ce sens, afin d'affiner cette étude de potentiel, et en s'inspirant des approches de plusieurs auteurs, consistant à allouer des pourcentages de collecte jugés possible à être atteints, et si nous considérons que :

- 20% uniquement, de résidus respectivement d'épis de mil et sorgho, de rafles de maïs et de la bagasse sont collectables en raison de la dispersion des zones de traitement.
- 30% des résidus en coque d'arachide sont collectables en raison de l'existence d'unité industrielle de transformation d'arachide.
- 60% des résidus de la balle de riz sont collectables grâce aux usines de transformation du riz paddy de la place.

Cela permettra de mobiliser les quantités de résidus présentées au tableau III.7.

Tableau III.7: Quantités des résidus (A2) mobilisables (en millier de tonne)

	Epis de mil	Epis de sorgho	Rafles de Mais	Balles de riz	Coques d'arachide	Bagasse de canne à sucre
% collectables	20%	20%	20%	60%	30%	20%
Quantités collectables	334,52	137,12	0,76	11,28	52,14	11,14

Cela nous donne un total de 546,96 kilotonnes de résidus mobilisables, ce qui correspond à 20,7% des résidus agricoles disponibles pour la bioénergie, et 4,5% du potentiel total brut. La figure III.3 ci-dessous présente la répartition des résidus générés par culture et par région.

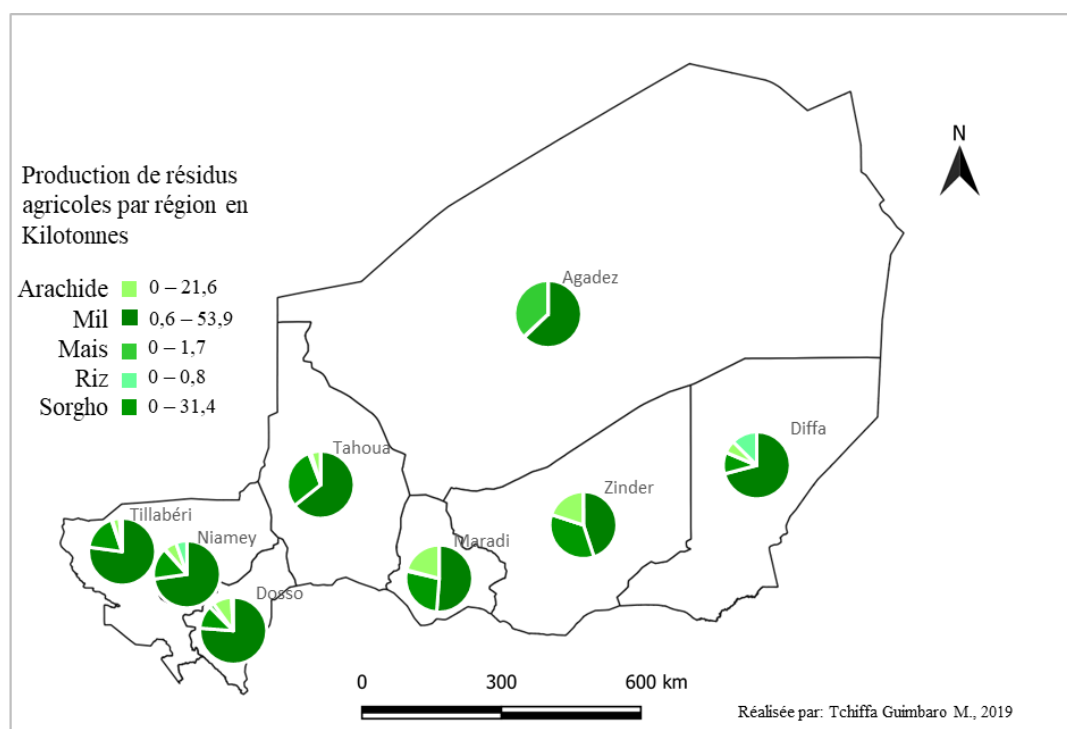


Figure III.5: Répartition des résidus agricoles par région

On remarque que les régions de forte production en résidus du mil sont :

- La partie Centre-Est constituée de Tahoua Maradi et Zinder ;
- La partie de la zone du fleuve constituée de Dosso et Tillabéry.

De même que pour le sorgho la partie à forte production de résidus demeure la zone Centre-Est, constituée de Tahoua Maradi et Zinder. Tandis que pour l'arachide Maradi et Zinder restent dominants, comparativement au reste des régions. Quant au riz, les principales zones de forte production sont :

- La zone du fleuve Tillabéry Niamey et Dosso qui forment plus de 60% de la production nationale.
- La zone Est avec la région de Diffa qui enregistre une production d'environ 35% de la production nationale.

III.2 Evaluation de la ressource en résidus d'espèces forestières

Dans la conduite de l'évaluation, une cartographie de ces deux espèces forestières (*Balanites* et *Hyphaene*) a été faite sous le logiciel QGIS version 3.4.4 (Madeira). Les informations sur la présence de ces espèces données par plusieurs auteurs ont été utilisées notamment les travaux de Laoualy Ada et Ali Mahamane (1999), rares sont les zones où nous retrouvons les densités et les superficies occupées, néanmoins il existe des parcs où ces espèces sont dominantes, alors nous avons considéré une approche utilisée par Laoualy Ada et Ali Mahamane (1999), celle d'« espèce dominante » et « espèce compagne » dans une zone donnée (voir Annexe 4). Ensuite les zones à espèces dominantes dont le potentiel est connu ont été le plus mis en exergue que les autres. La carte (Figure III.4) renseigne que l'espèce *Balanites aegyptiaca* présente des peuplements dominants dans la partie Sud-Est, composée de Maradi et Zinder tandis qu'elle se trouve beaucoup plus comme espèce compagne dans la partie Ouest du pays. L'*Hyphaene thebaica* se trouve également en espèce dominante dans la partie Sud-Est et s'étend cette fois-ci jusqu'à Mainé soroa.

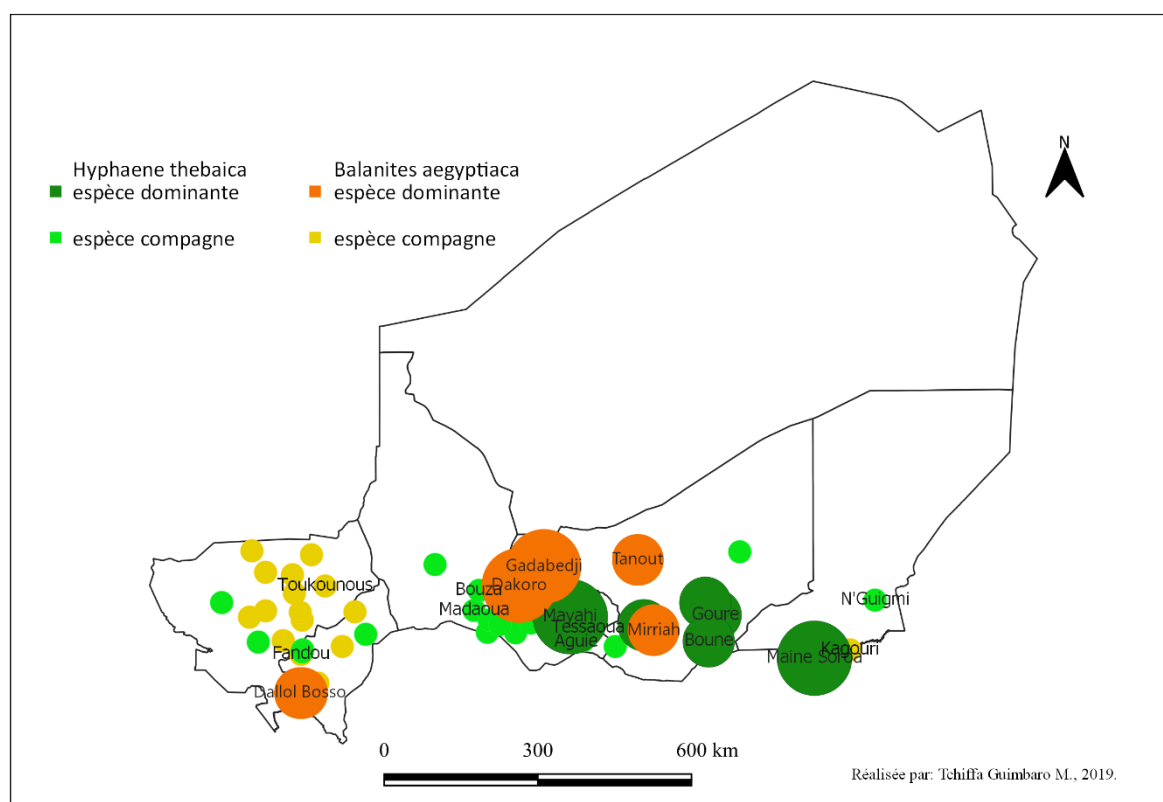


Figure III.6: Présence des espèces forestières : *Balanites aegyptiaca* et *Hyphaene thebaica*

La détermination de la quantité des résidus du *Balanites aegyptiaca* a été rendue possible en considérant une densité moyenne de 10 pieds/ha, car en observant la carte de Hall & Walkerr

1991, sur la répartition de *Balanites aegyptiaca* en Afrique, on peut raisonnablement considérer que la densité de cette espèce localisée sensiblement dans la partie de notre étude pourrait être supérieure ou égale à celle considérée dans les travaux de Vincent .D (1993), dans sa zone d'étude au Burkina Faso. Ainsi, il sera considéré une densité de 10 pieds/ha pour les zones à espèces dominantes et 5pieds/ha pour les zones à espèces compagne. Pour l'espèce *Hyphaene*, le potentiel de cette espèce est résumé dans les tableaux III.8, III.9 et III.10.

*Tableau III.8: Estimation du potentiel de *Hyphaene thebaica* (palmier doum)*

Zone	Source	Coordonnées	Hyphaene	Superficie (ha)	Densité pied/ha	Pied/zone
Dallol Bosso (Falmey, la série de Fandou)	Harou Moussa (2013) ;	14°27'86''	Espèce compagne			
Kouringuel	Laoualy Ada et Ali Mahamane (1999) ; Seybou (1993)	(13°22'19''E et 2°54'36''N).	Espèce compagne	750000	6	4500000
Zinder Formations mixtes, vallée de Gassafa –Bouné - Katgeri	Laoualy Ada et Ali Mahamane (1999)	nd ¹	Espèce dominante	174150	8	1393200
Formations de bas-fonds à <i>Hyphaene thebaica</i> et <i>Borassus</i> (Zinder)	Laoualy Ada et Ali Mahamane (1999)	nd	Espèce dominante	50625	8	405000
Goulbin Kaba (Maradi)	Duhem C. (2003)	longitudes 7° 13' & 7°57' et latitudes 13 ° 46' & 13 °49'	Espèce dominante	289575	8	2316600
Mainé-Soroa	Laminou M. O et al (2016)	nd	Espèce dominante	34553	8	276424
Nombre potentiel d'espèces						8891224

¹ non défini

Tableau III.9: Estimation du potentiel de *Balanites aegyptiaca*

Zone	Source	Coordonnées	Balanites	Superficie (pied/ha)	Densité (pied/ha)	Pied/zone
Dallol Bosso (Falmey, la série de Fandou)	Harou Moussa (2013) ; Laoualy Ada et Ali Mahamane (1999)	14°27'86''	Espèce dominante	750000	10	7500000
Réserve de Gadabédji	Laoualy Ada et Ali Mahamane (1999)	Nd	Espèce dominante	76000 ha	10	760000
Zinder Formations de bas-fonds Takaya, Tanout...	Laoualy Ada et Ali Mahamane (1999)	Nd	Espèce dominante	19726 ha	10	197260
Nombre potentiel d'espèces						8457260

Tableau III.10: Quantités brutes de résidus de fruit générées par les espèces forestières (F1), en millier de tonne

Espèce	Nombre de Pied	Production (kg de fruit/Pied)	Production de fruit (kt)	Résidus	Ratio (kg de résidus/kg de fruit)	Production de résidus (kt)
Balanites aegyptiaca	8457260	125	1057,16	Endocarpe	0,5	528,58
Hyphaene thebaica	8891224	50	444,56	Mésocarpe + endocarpe	0,4	177,82

Toutefois, la récolte effective de la production potentielle obtenue, ne peut être disponible intégralement pour la bioénergie. Notons aussi que l'accessibilité des résidus des fruits de *Balanites aegyptiaca* est limitée par la rareté d'unité de transformation, notamment ceux d'extractions d'huile essentielle ou de lait à base de ce fruit. Contrairement aux résidus du fruit d'*Hyphaene thebaica* qui sont collectés, vendus dans des sacs, comme combustibles de cuisson. De ce fait, si l'on se limite à une récolte de 20% de la production potentielle de *Hyphaene thebaica*, et 10% de la production potentielle de *Balanites aegyptiaca*, les résidus collectables pour la bioénergie seraient de 88,4 kilotonnes de résidus, voir tableau III.11. En somme, cette quantité mobilisable correspond à 12,5% du potentiel total brut.

Tableau III.11: Quantités de résidus de fruit d'espèces forestières, potentiellement mobilisables, en millier de tonnes

Espèce	Résidus	Production de résidus (kt)	Pourcentage collectable	Quantité potentielle de résidus (kt)
Balanites aegyptiaca	Endocarpe	528,58	10%	52,9
Hyphaene thebaica	Mésocarpe + endocarpe	177,82	20%	35,6

III.3 Potentiel énergétique des résidus de culture et sous-produits d'agroforesterie

L'objectif de l'évaluation étant la valorisation énergétique, à l'issue de celle-ci, dont la procédure est consignée au tableau III.8 et III.9 et III.10, et après application de l'équation (3.1) on note qu'il est possible de produire en moyenne par an, à partir de résidus agricoles, un potentiel énergétique brut thermique estimé à 196.927,72 tep équivalant à 2.289,3 GWh (tableau III.12) ; et un potentiel énergétique brut thermique à partir des résidus de fruit d'espèces forestières de 36.319,98 tep soit 422,22 GWh (tableau III.13). Il ressort que l'utilisation des résidus agricoles et sous-produits forestiers en tant que source d'énergie peut constituer un important gisement, source d'approvisionnement en énergie dans les zones rurales.

Tableau III.12: Evaluation du potentiel énergétique des résidus agricoles

Produit	Types de déchets	Quantité disponible (kt/an)	PCI (kcal/kg)	Potentiel énergétique brut (GWh)	Potentiel thermique à 70% (GWh)	Potentiel électrique à 25% (GWh)
Mil	Epis	334,52	3500	1361,1	952,75	340,27
Sorgho	Epis	137,12	3500	557,9	390,53	139,48
Riz	Balles	0,76	2500	2,2	1,55	0,55
Maïs	Rafles	11,28	3500	45,9	32,13	11,47
Arachide	Coque	52,14	4417	267,7	187,41	66,93
Canne à sucre	Bagasse	11,14	4206	54,5	38,13	13,66
Total				2289,3	1602,50	572,32

Tableau III.13: Évaluation du potentiel énergétique des résidus de fruit des espèces forestières.

Espèce	Types de déchets	Quantité disponible (kt/an)	PCI (kcal/kg)	Potentiel énergétique brut (GWh)	Potentiel thermique à 70% (GWh)	Potentiel électrique à 25% (GWh)
Hyphaenett.	Mésocarpe + endocarpe.	35,6	4258,98	176,08	123,26	44,02
Balanites ae.	Endocarpe	52,9	4005,64	246,14	172,29	61,53
Total				422,22	295,55	105,55

$$1tep = 10^7 kcal = 11,625MWh \quad (3.1)$$

Cependant dans la pratique il est difficile d'atteindre cette production d'énergie, car il faudra tenir compte des rendements des équipements de conversion énergétique. En tenant compte d'un rendement électrique de 25% nous obtenons un potentiel moyen annuel de 572,32 GWh pour les résidus agricoles, et un potentiel de 105,55 GWh pour les résidus de fruit des deux espèces forestières. Dans son étude portant sur le potentiel de la biomasse énergie en Afrique subsaharienne, Dasappa (2011) a estimé un potentiel électrique disponible de 100MW, pour 2,672 millions de tonnes de résidus agricoles. Cette puissance disponible peut fournir un maximum de 876 GWh.

Si la quantité des résidus disponible estimée par Dasappa (2011) diffère de celle obtenue dans la présente étude comme annoncé dans la section 3.1.2, la quantité de résidus estimée récupérable dans notre étude, représente le quart de celle-ci. Du coup le potentiel énergétique estimé est moindre comparé à celui obtenu par cet auteur. Notons aussi que l'évaluation du gisement énergétique disponible a été faite sur la base de 30% pour Dasappa (2011), outre la différence au niveau du choix des ratios résidus/produit. Le tableau 2 Annexe 5, montre que le potentiel électrique des résidus agricoles équivaut à plus de 50% de la consommation électrique régulière de ces deux dernières années (2017 et 2018) au Niger. Par ailleurs, il apparaît que les consommations électriques dans les différentes régions sont considérablement disproportionnées par rapport aux potentiels respectifs estimés. C'est ainsi que la région de Niamey qui totalise plus de la moitié de la consommation électrique nationale, dispose de l'un des potentiels énergétiques le plus faible, tandis que Maradi, Zinder et Tahoua disposent des plus forts potentiels. La figure III.7 montre que les potentiels électriques estimés peuvent couvrir intégralement la demande en électricité pour l'année 2018 dans les régions de Dosso, Maradi, Tahoua, Tillabéry et Zinder.

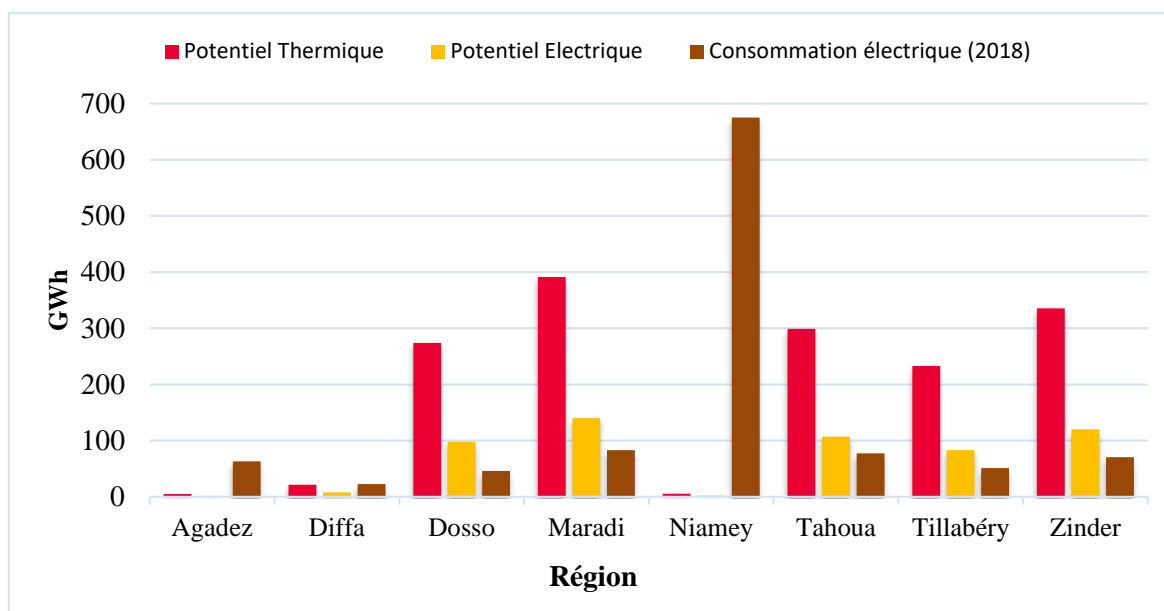


Figure III. 7: Comparaison par région du potentiel énergétique des résidus agricoles et la consommation électrique

La figure III.5 présente la répartition du potentiel en chaleur et en électricité des résidus agricoles, à noter que les résidus de la canne à sucre ne sont pas pris en compte du fait de l'absence des données détaillées au niveau des régions. La figure III.5 montre que ce potentiel est effectivement fortement concentré dans les régions de Tahoua Maradi et Zinder. Ces régions rassemblent à elles seules plus de 65% du potentiel récupérable, c'est la région de Maradi qui possède le plus fort taux avec près de 400 GWh d'énergie thermique par an.

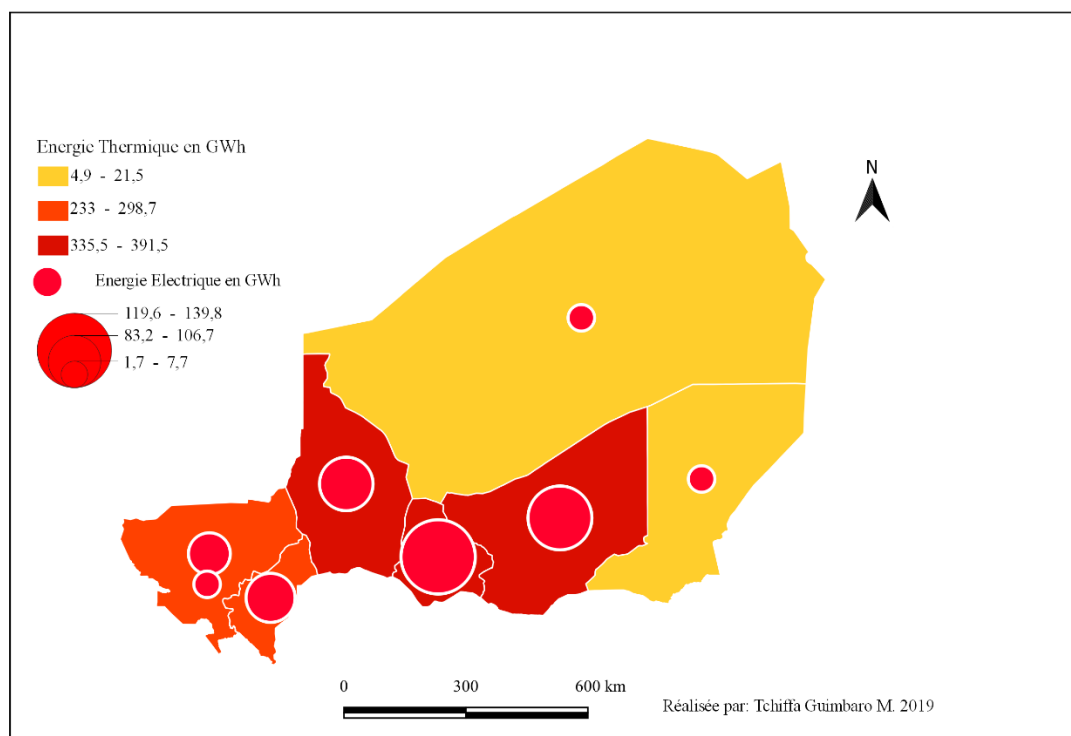


Figure III.8: Potentiel en électricité et en chaleur des résidus agricoles mobilisables par an

III.4 Essais de gazéification

Les tests de gazéification ont été conduits sur 3 types de résidus il s'agit des échantillons de la balle de riz, des résidus du fruit de *Balanites aegyptiaca* et d'*Hyphaene thebaica*. En plus de ces trois biomasses, du charbon de bois a aussi été gazéifié.

Les échantillons de la balle de riz utilisés pour la conduite de ces essais ont été acquis auprès de l'usine de décortilage de Kirkissoye à Niamey. Ceux des coques de *Balanites aegyptiaca* utilisés ont été constitué à travers un mélange de deux échantillons, collectés auprès de l'entreprise Sahara Sahel Food à Zinder, et au Centre artisanal de Maradi. Pour l'*Hyphaene thebaica*, les échantillons ont été obtenus auprès des vendeurs dans la ville de Maradi, il faut noter que ce dernier est utilisé comme combustible de foyers. Quant au charbon de bois, ce dernier a été acquis auprès des revendeurs du charbon dans la ville de Maradi, mais l'espèce de base n'a pas été identifiée. Les 4 courbes constituant la figure III.6 présentent les profils des températures enregistrées en fonction du temps, pour les 4 types d'échantillons gazéifiés.

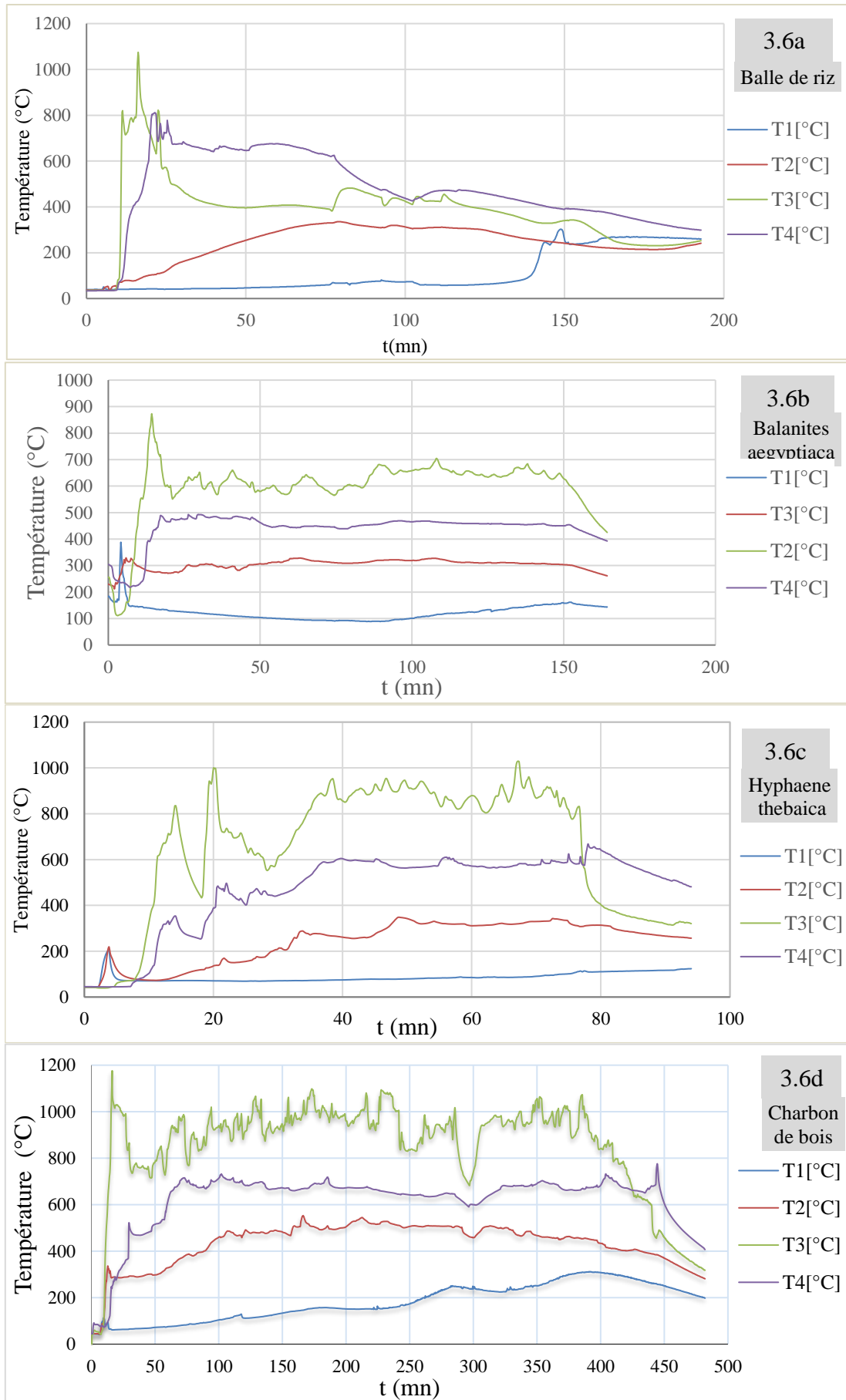


Figure III.9: Profils de températures du réacteur

Les essais effectués sur la balle de riz ont été marqués par une production des gaz combustibles bien avant la fin du chargement du réacteur, ces gaz s'échappent non par le biais de la torchère mais à travers la partie alimentation du gazogène, cela traduit la rapidité avec laquelle T3 a atteint un pic de 1074°C (figure III.6a), celle-ci décroît fortement après la fermeture de la partie alimentation. A t=22mn la seconde vanne est ouverte afin de limiter la baisse de T3, ce qui était sans réel effet, car la fermeture de cette même vanne intervenue à t=25mn a fait croître la température T3 avant de rechuter quelques minutes plus tard. A t=83mn la partie alimentation est ouverte pour investigation, compte tenu de la chute considérable des températures, notamment la température T4. Les observations révèlent une quantité importante de la balle qui restait intacte dans le réacteur. Il ressort que le coke de la balle de riz formé avait des difficultés à descendre sur la grille, bien que celle-ci ait été manœuvré plusieurs fois. D'après Gerun (2007) la taille des particules est importante car elle influe sur trois aspects de la pyrolyse : écoulements dans le réacteur, réactions chimiques hétérogènes et transferts de chaleur et de masse. Ce qui confirme que la balle de riz après combustion forme un lit de charbon qui obstrue le passage pour une nouvelle balle et ralenti considérablement les transferts de chaleur et de masse, cela explique aussi la chute du pic des températures T3 et T4 observée à t=20mn, et qui par conséquent réduit les chances du craquage des goudrons. L'utilisation de la densification aurait pu permettre une meilleure valorisation des balles de riz dans le gazogène de l'étude, et ce selon Schenkel et Temmerman (2005) "la densification revêt beaucoup d'avantage, qui sont d'ordre physique et technique respectivement en donnant aux matières une forme plus favorable à la conversion énergétique que leur état naturel et permet d'obtenir de très haut rendement de transformation énergétique".

Contrairement à la balle de riz, le début du test sur les coques de *Balanites aegytiaca* a été marqué par d'importantes fluctuations des températures. A t=15mn, les gaz étaient suffisamment combustibles au niveau de la torchère, accompagné d'une stabilisation des flammes qui s'est étalée jusqu'à t=80mn, soit un temps de production du gaz de 65 minutes en continue. Pendant la durée de la stabilisation, la température de la zone de combustion T3, a fluctué dans la fourchette de 550°C à 700°C, tandis que celle de la zone de réduction T4 était relativement constante. Le temps de stabilisation sans interruption est de 1h05mn, sur une durée globale de test de 2h29mn. Cet essai a été marqué par un temps de réactivité plus court comparativement au charbon de bois, et une consommation moyenne élevée. En revanche les températures étaient moins élevées. Au cours de ce test un écoulement d'un liquide comparable aux huiles pyrolytiques a été constaté à la partie haute du gazogène, celui-ci résulte essentiellement des résidus de la mésocarpe (la chaire du fruit). A la fin du test, un important

dépôt a été observé dans le réacteur ainsi qu'au niveau de la torchère. Autrement dit la non élévation des températures au voisinage de 1000°C associé au dépôt constaté pourrait induire que le craquage des goudrons n'a pas été effective, ce qui pourrait impacter négativement la qualité du gaz produit.

Le test effectué sur les résidus d'Hyphaene, après 3 jours de séchage au soleil n'a pas généré du charbon résiduel, mais quasi exclusivement des cendres. Les premières flammes ont été constatées à $t=12\text{mn}$ (figure III.6c), d'importantes fluctuations sont observées au niveau de T3 et T4 avant la stabilisation qui n'intervient qu'à partir de $t=34\text{mn}$ pour s'étaler jusqu'à $t=79\text{mn}$ soit 45minutes de production du gaz. La production du gaz s'est arrêtée brusquement, contrairement au test de *Balanites aegyptiaca* et du charbon de bois. En effet vers la fin du test on constate une chute rapide de la température T3 qui passe de 831°C à 400°C en moins de 5minutes tandis que la température T4 augmente rapidement en passant de 575°C à 657°C en 1minute avant de rechuter vers $t=80\text{mn}$. La baisse rapide de la température T3 signifie que l'essentiel de la charge combustible a été consommé. La production du gaz jusqu'à $t=79\text{mn}$ malgré la chute de T3 pourrait s'expliquer par la présence sur la grille, d'un reliquat du charbon de bois utilisé pour initier les réactions. Au cours de ce test la température maximal atteinte est $T3=1026,8^\circ\text{C}$.

S'agissant des tests sur le charbon de bois, après le chargement complet du gazogène, les flammes ont été observées (figure III.6d), au bout du temps $t=49\text{mn}$. Les flammes se sont stabilisées sur la période de $t=63\text{mn}$ à $t=184\text{mn}$, soit une durée de production de 121mn sans extinction. Cette importante étape ayant permis le maintien en activité des flammes a été marqué par les températures de la zone de combustion (T3) et de celle de la réduction (T4) comprises respectivement dans une fourchette de 800°C à +1000°C et de 657°C à 750°C. Après cette phase de stabilisation, des interruptions répétitives et des durées d'activité plus courtes ont été observés. Les durées d'activités les plus significatives enregistrées sont détaillées comme suit: Une stabilisation des flammes de 28mn dans la période allant de $t=188\text{mn}$ à $t=216\text{mn}$. L'ouverture de la seconde vanne à $t=223\text{mn}$ a permis aux flammes de reprendre à $t=226\text{mn}$ avec un temps de stabilisation de 15mn. La chute drastique de la température T3 constatée à $t=300\text{mn}$ est la conséquence de l'ouverture de la seconde vanne, qui à influencer négativement les réactions de combustion, quoique celle-ci a permis la réanimation des flammes à la torchère. En revanche la fermeture de la seconde vanne intervenue à $t=310\text{mn}$ a favorisé non seulement la hausse des températures, mais aussi la reprise des flammes de $t=310$ à $t=321$, soit 11 mn de stabilisation. Après $t=321\text{mn}$ les gaz recueillis à la torchère n'étaient plus inflammables.

En somme, les températures de plus de 1000°C enregistrés au cours de cet essai ont été bénéfiques pour la gazéification du charbon de bois, car comme l'a si bien précisé Gerun (2007), "les hautes températures de l'ordre de 1000°C sont nécessaire pour le craquage efficace des goudrons, ce qui permet de rendre le gaz plus riche car contenant moins d'impureté et donc plus combustible". Cependant, la longue durée de 49mn observée avant la production des gaz combustibles, dont un résultat similaire a été obtenu par Harouna (2014) pour le cas du charbon des tiges du cotonnier, se justifie par la faible consommation moyenne de 1,7kg/h (tableau III.14). Le taux de cendre recueillis, qui est de 11,8 %, démontre l'efficacité du processus de conversion. Le tableau III.14 présente la moyenne des trois tests de gazéification effectués pour chacune des biomasses.

Tableau III.14: Récapitulatif des tests de gazéification

Type de résidus	Masse du combustible (kg)	Consommation moyenne (kg/h)	Durée totale de l'essai (mn)	Durée de stabilisation des flammes (mn)	Proportion des cendres (%)
Balle de riz	3,95	1,83	129	-	49,13
Balanites aegyptiaca	17,9	7,21	149	45	9,77
Hyphaene thebaica	9,5	7,14	80	65	61,84
Charbon de bois	12,20	1,72	425	189	11,8

Les figures III.7 , III.8 , III.9 et III.10 ci-dessous, présentent les échantillons gazéifiés, les tests de flamme à la torchère ainsi que les résidus après gazéification.

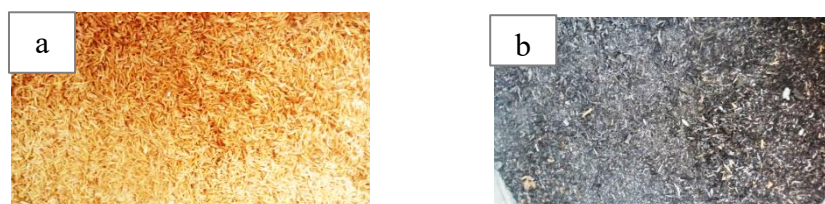


Figure III.10: (a) échantillon de la balle de riz, (b) résidus de cendre après gazéification



Figure III.11: (a) échantillon de coque de *Balanites aegyptiaca*, (b) cendre et charbon résiduel (imbrulés) après gazéification ; (c) flammes produites lors du test

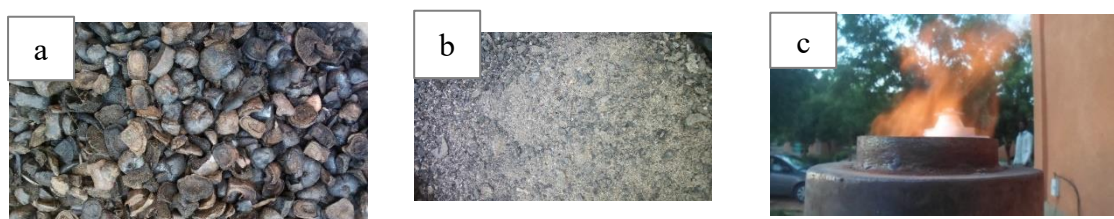


Figure III.12: (a) échantillon de coque de *Hyphaene thebaica*, (b) résidus de cendre après gazéification ; (c) flammes produites lors du test



Figure III.13: (a) résidus de cendre du charbon de bois après gazéification, (b) flamme produite lors de l'essai

III.5 Résultats de l'analyse immédiate

Les résultats de cette analyse sont importants pour la connaissance des propriétés et contenu énergétique de la biomasse. Le tableau III.15 présente les résultats issus de l'analyse immédiate des échantillons de biomasses gazéifiées.

Tableau III.15: Analyse immédiate des échantillons gazéifiés

	Taux d'humidité (%)	Teneur en cendre (%)	Taux de matière volatiles (%)	Carbone Fixe (%)	PCI (MJ/kg)
Balle de riz	7,39	21,78	72,99	5,23	15,05
Balanites aegyptiaca	4,93	3,27	84,51	12,22	16,76
Hyphaene thebaica	3,14	13,89	68,48	17,65	17,82
Charbon de bois	2,88	7,051	40,62	54,71	-

Au regard du taux de carbone fixe élevé de 54,71%, cela confère un privilège exceptionnel au charbon de bois pour des valorisations très exigeantes en matière du PCI du biogaz. Cette analyse renseigne que les coques du palmier doum ont des performances énergétiques supérieures à celle des deux autres biomasses étudiées.

Les résultats obtenus à l'issue de l'analyse immédiate des coques de *Balanites* sont semblables à ceux obtenues par Bambara (2014) dont les résultats sont ci-après : 4,86% de taux d'humidité, 4,21% de teneurs en cendre, 80,19% de matière volatiles et 15,60% de carbone fixe. Dans leur globalité ces résultats démontrent que les coques de *Balanites aegyptiaca* ont un faible taux en humidité et en cendre, cependant leurs taux de matière volatile est élevé. L'application d'un prétraitement pourra diminuer substantiellement le taux de matière volatile, faire croître son taux de carbone fixe ainsi que son PCI, ce qui rendra sa valorisation thermochimique beaucoup plus intéressante.

Des résultats similaires ont été mis en exergue dans les travaux de Adamon (2017) qui a obtenu : 7% pour l'humidité, 18,31% pour le taux de cendre, 70,6% pour les matières volatiles et 11,09% pour le carbone fixe. Selon Thys, cité par Adamon, l'analyse immédiate de la balle de riz révèle en général un taux d'humidité inférieur à 13 %, une forte teneur en cendres comprise entre 15 et 21 %, et un pouvoir calorifique d'environ 14 MJ/Kg. La littérature nous renseigne également que les résultats de l'analyse immédiate diffèrent en fonction de la variété de l'espèce ainsi que de sa provenance. Il est à noter que les résultats issus de l'analyse immédiate rapportés au Tableau III.15 montrent que la balle de riz présente une teneur en cendre de 21,78% loin devant les autres matières gazéifiées. Selon le résultat de l'analyse immédiate, le taux de carbone fixe pour la balle est de 5,23%. Il faut noter que c'est l'un des paramètres importants dans la valorisation thermochimique : la gazéification. En effet, le taux de carbone fixe a une influence sur la chaleur produite lors de la combustion, cette chaleur permettra d'entretenir les réactions de réduction (gazéification) qui sont des réactions endothermiques. La balle de riz présente des performances énergétiques faibles comparées à la coque du fruit de *Balanites aegyptiaca* et celle du fruit de palmier doum, néanmoins cela n'exclut pas les chances qu'elles produisent du gaz combustible. Sa délicatesse liée surtout à sa composition physicochimique et à sa granulométrie devra trouver une solution via d'autres alternatives adaptées, pour une meilleure valorisation thermochimique, soit à travers les méthodes de prétraitement ou explorer d'autres types de gazogènes qui pourront être mieux compatibles.

Conclusion

L'estimation du potentiel, fait ressortir un gisement assez important des résidus agricoles et sous-produits forestiers potentiellement mobilisable, pour la bioénergie. Les résultats expérimentaux concluants obtenus à l'issue des essais, révèlent une possibilité de valorisation énergétique de ces biomasses en particulier la coque de *Balanites aegyptiaca* et celle du palmier doum dont la gazéification n'est pas très connue jusque-là. Cependant la valorisation de la balle de riz dans le gazogène utilisé, ne donne pas de résultat très appréciable ce qui nécessite quelques améliorations sur le gazogène, pour faciliter la meilleure prise en charge de cette biomasse.

Conclusion générale

La présente étude a porté sur l'évaluation du potentiel énergétique des résidus agricoles et des produits forestiers, en vue de contribuer à la promotion de la bioénergie. Celle-ci est couplée à un test de valorisation, pouvant servir comme solution à la production d'électricité décentralisée et éventuellement orienter les politiques énergétiques. Les données collectées dans les annuaires statistiques de l'INS sur les productions agricoles, ont permis de réaliser l'étude du potentiel des résidus agricoles. L'évaluation du potentiel de résidus des produits forestiers a été rendu possible grâce aux résultats d'inventaires recueillis dans les documents et à l'aide d'hypothèses là où les données sont manquantes. Cela a permis de sélectionner les ressources pertinentes au procédé de valorisation thermo-chimique.

Au préalable, plusieurs paramètres devraient être pris en compte dans l'évaluation du potentiel, afin de ne pas favoriser la bioénergie au détriment des usages utiles faits de ces biomasses. Il s'agit de minimiser significativement la concurrence avec d'autres utilisations déjà existantes. L'étude d'évaluation du potentiel a permis l'estimation d'un important gisement de résidus agricoles reparti dans les zones de forte production. Les rendements de production de résidus disponibles obtenus étant de : 0,18t/ha pour le mil, 0,15t/ha pour le sorgho, 0,7t/ha pour le riz paddy, 0,28t/ha pour le maïs, 0,24 t/ha pour l'arachide et 11,56 t/ha pour la canne à sucre. Pour les récoltes dont il n'existe pas de filière de valorisation industrielle, une collecte sur les champs est nécessaire ce qui peut limiter l'accessibilité à certain type de résidu. Il ressort que l'utilisation de 4,5% du potentiel total brut des résidus des récoltes estimés mobilisables, et l'utilisation de 12,5% du potentiel total brut des résidus forestiers estimés mobilisables, permettra respectivement d'enregistrer près d'un demi-million de tonnes des résidus agricoles par an, et plus de 80 kilotonnes de résidus des produit forestiers, soit respectivement un potentiel électrique de plus de 2289,3 GWh, et 422,22 GWh en moyenne par an. L'évaluation montre que le potentiel des résidus agricoles seuls, permettrait de couvrir 50 % de la consommation en électricité au Niger pour l'année 2018. Ce sont les régions de Maradi, Zinder et Tahoua qui disposent des plus forts potentiels.

Les essais de gazéification présentés dans cette étude ont été réalisés à l'aide d'un gazogène de type co-courant à lit fixe. Les échantillons de la balle de riz, des coques du fruit des deux espèces forestières (*Balanites aegyptiaca* et *Hyphaene thebaica*), ainsi que des échantillons du charbon de bois, ont été gazéifiés et caractérisés. Les tests expérimentaux ont permis d'aboutir à des résultats indiquant la possibilité de la gazéification de ces biomasses, exceptée pour la balle de riz, en raison de ses caractéristiques physico-chimiques. La technique de gazéification d'un point de vu des technologies disponibles, rend possible la valorisation de chaque type de biomasse

sèche. Cependant le choix de ces technologies devrait être guidé par les caractéristiques physicochimiques des différentes biomasses. Par ailleurs, l'usage des résidus des produits forestiers ne devrait pas être une menace écologique mais un avantage certain pour favoriser la plantation et le développement de ces espèces, sources de multiples avantages socioéconomiques pour la population.

Les essais de gazéification ont permis de valider le fonctionnement du gazogène de l'étude vis-à-vis des biomasses gazéifiées, cela a permis de prouver la faisabilité du procédé et d'identifier certaines limites. Cependant pour garantir au mieux la contribution de la biomasse au bouquet énergétique, et son usage moderne, une mutualisation des efforts de tous les acteurs, telles que les institutions de recherches et étatiques est nécessaire.

A l'issu de ce travail, nous formulons les perspectives suivantes:

Faire une étude poussée sur le potentiel des biomasses valorisables, par exemple une comparaison des méthodes statistiques et la télédétection, qui offre des avantages en matière d'étendu, de rapidité et de coût ; Au-delà, des recherches doivent s'étendre pour déterminer la qualité du biogaz produit ; Des études technico-économiques sont également nécessaires

Références bibliographiques

- Adamon Gildas David Farid, "Modélisation de la cinétique de gazéification étagée de la biomasse tropicale : cas des balles de riz et des rafles de maïs", UTC Génie des Procédés Industriels et développement durable, thèse. 2017.
- AIE, "World Energy Outlook-2018", <http://www.iea.org/energyaccess/>, consulté le 18/10/2019.
- AIE, Tracking SDG7: "The Energy Progress Report", trackingsdg7.esmap.org. Publié le 22 mai 2019, consulté le 30/6/2020.
- Amir S., "Etat des lieux de la riziculture au Niger", Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture., Rapport, Novembre 2011.
- Andrea C.J., Galip A., "Effect of CaO on tar production and dew point depression during gasification of fuel cane bagasse in a novel downdraft gasifier, Fuel Processing Technology", Volume 106, pp. 654–660. 2013.
- Anne Moreau, K. Sokona, C. Broutin, "Mise au point d'un concasseur à noix de *Balanites aegyptiaca*", InterDev agroalimentaire.p4, 2004.
- Baert F., Guyot G., "Potentials and limits of Vegetation indice of LAI an APAR assessment". Remote Sensing environment, 35, pp.161-173. 1991.
- Bambara L., "Développement de charbons actifs à base de coques de *Balanites aegyptiaca* en vue de la purification du biogaz", Mémoire de master en ingénierie de l'eau et de l'environnement (2iE). Soutenu le 23 juin 2014.
- Banchorndhevakul S., "Effect of urea and urea gamma treatments on cellulose degradation of Thai rice straw and corn stalk" Rad Phys Chem, 64, pp. 417–422. 2002.
- Boittin I., "Fiche *Balanites aegyptiaca*-Description, utilisations, acteur, commercialisation", Rongead. 2014, https://www.nitidae.org/files/5b7cc2e6/balanites_aegyptiaca_16.09.pdf, consulté le 5/10/2019.
- Dasappa S., "Potential of biomass energy for electricity generation in sub-Saharan Africa", Centre for Sustainable Technologies, Indian Institute of Science, Bangalore 560 012, India, Energy for Sustainable Development 15 (2011), pp 203–213. 2011.
- Dasappa S., Sridhar G, Sridhar HV, Rajan NKS, Paul PJ, Upasani A, "Producer gas engines – proponent of clean energy technology", Proceedings of the 15th European Biomass conference and Exhibition, pp 976–980. 2007.
- Deglise X. et Lédé J., "Valorisation Energétique de la Biomasse par Voie Thermique", ENTROPIE (PARIS), Vol. 94, pp 24-37. 1980.
- Deng J., Gui-jun W., Jiang-hong K., Yun-liang Z., Yong-hao L. "Pretreatment of agricultural residues for co-gasification via torréfaction." J. Anal. Appl. Pyrolysis 86: 331–337. 2009.
- Devi L., Ptasiniski KJ. et Janssen F., A review of the primary measures for tar elimination in biomass gasification processes, Biomass and Bioenergy, Vol. 24, pp 125-140. 2003.

- Diedhiou Ansoumane "Étude hydrodynamique et valorisation énergétique par transformation thermochimique de déchets de biomasse pour l'alimentation d'une briqueterie", UTC Génie des Procédés Industriels Thèse. 2017.
- Duhem C., "Etude des filières des produits du palmier doum, Méthodologie, Guides d'entretien et questionnaires", Cirad-Forêts/louis Berger, PAFN, Niamey, Niger. 2003.
- Énergie durable pour Tous, "Objectives," <http://sustainableenergyforall.org/objectives>, consulté le 30/06/2020.
- FAO, Organisation des Nations Unies Pour l'Agriculture et l'Alimentation, "Résidus agricoles et sous-produits agro-industriels en Afrique de l'Ouest : Etat des lieux et perspectives Bureau Régional pour l'Afrique de la FAO", Accra, Rome. 2014a.
- FAO, Organisation des Nations Unies Pour l'Agriculture et l'Alimentation, "Résidus de cultures et d'élevage", bioénergie et sécurité alimentaire évaluation rapide (BEFS-RA), Manuel d'Utilisation. 2014b.
- FONABES, "Schéma Directeur d'Approvisionnement en Combustibles Domestiques de Niamey", République du Niger Ministère de l'Environnement, CIRAD, 2017.
- García-Pérez M., Chacomposition A., Roy C., "Vacuum pyrolysis of sugar cane bagasse". J. Anal. Appl. Pyrolysis 65 111-136. 2002.
- Gaur S. and Reed TB, "An Atlas of Thermal Data For Biomass and Other Fuels" NREL/TP-433-7965.2001.
- Gaur S. et Reed T., "Thermal Data for Natural and Synthetic Fuels", Marcel Dekker. 1998.
- Gerun L., "Etude numérique et expérimentale de la valorisation énergétique du bois par gazéification", Nantes, Ecole de Mines de Nantes. Thèse de Doctorat. 2007.
- GIEC, IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. 2003.
- HAROU M., "Mise en valeur des ressources en eau dans la vallée du Dallol Bosso, région de Dosso, république du Niger". Mémoire Master II Recherche, Université de Niamey, 2013.
- Harouna G.I, "Valorisation thermochimique de la biomasse par gazéification : application aux tiges de cotonnier et au mélange de bois et des sachets plastiques souples en polyéthylène.," Université de Ouagadougou, thèse de doctorat. 2014.
- Hui Long; X. Li; H. Wang, J. Jia, "Biomass resources and their bioenergy potential estimation: A review". Renewable and Sustainable Energy Reviews 26 (2013) 344-352. 2013.
- I. H Gado , O. Sanogo , T. Daho, Balarabé I., Pakmogda J., "Design, realization of a fixed bed downdraft gasifier and conduction of preliminary gasification tests with balanites aegyptiaca hulls, rice husk and charcoal"; African Journal of Environmental Science and Technology, Vol. 13(3), pp. 117-125, DOI: 10.5897/AJEST2018.2631 Article Number: 6EE520C60130 ISSN: 1996-0786, 2019.
- Idriss A. H., "Optimisation d'un procédé de pyrolyse en four tournant : application à la production de charbons actifs", Thèse Institut National Polytechnique de Toulouse. 2007.
- IFDD, "Le bilan énergétique de la comptabilité à la planification", séminaire en ligne, jeudi 29 Août 2019. <https://www.ifdd.francophonie.org/sel>, consulté le 5/10/2019.
- Jeanmart H. et Tchouate P., "Conversion de la biomasse, filières thermochimiques", Université Catholique de Louvain, année académique 2005-2006.

- Khan A. A., Jong W., Jansens P. J., Spliethoff H. "Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies." *Fuel Processing Technology* 90 : 21–50. 2009.
- Laminou M. O., Danguimbo I., Abdou R. Tidjani A. D., " Diversité et structure de la végétation ligneuse dans le système oasienne du Manga au Niger " p.22 communication au Colloque scientifique international sur la préservation et l'utilisation durables des systèmes oasiens, Université Abdou Moumouni – Université de Liège – Université Catholique de Louvain , ARES, 28 et 29 septembre 2016.
- Laoualy Ada, Ali Mahamane, "Les ressources forestières naturelles et les plantations forestières au Niger", Programme de partenariat CE-FAO. Août 1999.
- Lee J., "Biological conversion of lignocellulosic biomass to ethanol". *Journal of Biotechnology* 56-1, 1-24. 2003
- Martin J. et Pardoën M., "Gazéification de la biomasse : Caractérisation du combustible Approche énergétique Valorisation des résidus", Séminaires de Thermodynamique, Université Catholique de Louvain. 2002.
- Martin J., Assouh A. "GUIDE DE LA BIOMASSE", 2ème Edition, ISBN 2-89481-026-1, IEPF. 2005.
- Mermoud F., « Gazéification de charbon de bois à la vapeur d'eau : de la particule isolée au lit fixe continu », 256 pages, Thèse : Energétique et Transfert, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2006.
- Ministère des Mines et de l'énergie, République du Niger, "Rapport annuel SIE-Niger", janvier 2007.
- Ministère du Développement Agricole, République du Niger, "Stratégie nationale de développement de la filière riz". 2009.
- Moustapha Bassimbé Sagna, Khoudia Sène Niang, Aliou Guisse, Deborah Goffner, "Balanites aegyptiaca (L.) Delile: geographical distribution and ethnobotanical knowledge by local populations in the Ferlo (north Senegal) ", *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 18(4), 503-511.2014.
- ODD7, https://www.un.org/sustainabledevelopment/fr/wp-content/uploads/sites/4/2016/10/Why_it_matters_Goal_7_French.pdf, visitéconsulté le 7/12/2019.
- Oleksandr Tretyakov, « Estimation du potentiel énergétique des déchets agricoles comme source d'approvisionnement décentralisé pour l'espace rural (l'exemple de la région de Kharkiv, Ukraine) », *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Aménagement, Urbanisme, document 431, mis en ligne le 14 novembre 2008.consulté le 30/06/2020.
- PAFN, Direction de l'environnement, République du Niger, "Plan d'aménagement de la doumairaie de Goulbin N'kaba (Mayahi) ". 2004.
- PANER, "Plan d'Actions National des Energies Renouvelables", NIGER, Période [2015-2020/2030]. 30/03/2015.
- Peltier R., Duhem C. S., Ichaou A., "Valoriser les produits du palmier doum pour gérer durablement le système agroforestier d'une vallée sahélienne du Niger et éviter sa désertification" ; *VertigO – La revue en sciences de l'environnement*, Vol 8 n°1. Avril 2008.

- Prabir B., "Chapter 3 – Biomass Characteristics, Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction (Second Edition) ", Practical Design and Theory, Academic PRESS, Pages 47– 86. 2013
- Reda A. Aamer, "Physicochemical Properties of Doum (*Hyphaene thebaica*) Fruits and Utilization of its Flour in Formulating Some Functional Foods", Alex. J. Fd. Sci. & Technol. Vol. 12, No. 2, pp. 29-39. 2015.
- Reed T. et Das A., "Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems", The Biomass Energy Foundation Press. 1988.
- Riedhaker A., "Les biomasses dans le contexte du changement climatique et du développement durable", dans Guide Biomasse Energie, 2ème Edition, ISBN 2-89481-026-1, IEFP. 2005.
- S. Ousseina, R. Fortina, H. Marichatou, A. Yenikoye, "Diversité, structure et régénération de la végétation ligneuse de la Station Sahélienne Expérimentale de Toukounous, Niger", Int. J. Biol. Chem. Sci. 9(2): 910-926, April 2015, DOI: 10.4314/ijbcs. v9i2.29.
- Schenkel Y., Temmerman M., "Guide biomasse Energie", 2ème édition, institut de l'énergie et de l'environnement (IEPF), 2005.
- Seybou, Y., "Étude du comportement du palmier *Hyphaene thebaica* Mart. dans les vallées du Dallol-bosso et du goulbin Kaba du Niger", Mémoire de maîtrise. Université Laval Québec, Canada, 1993.
- Shu-Lai M. and Antal M.J., "Uncatalyzed solvolysis of whole biomass hemicellulose by hot compressed liquid water". Ind. Eng. Chem. Res. 31 pp. 1157-1161. 1992.
- Singer C. J. "History of Technology." Oxford IV: 252. 1952.
- Soromessa T., 2011. *Hyphaene thebaica* (L.) Mart. [Internet] Fiche de PROTA4U. Brink, M. & Achigan-Dako, E.G. (Editeurs). PROTA (Plant Resources of Tropical Africa / Ressources végétales de l'Afrique tropicale), Wageningen, Pays Bas. 2011. <<http://www.prota4u.org/search.asp>>. consulté le 25/09/2019
- Sourie Jean-Claude. "L'agriculture, source d'énergie : le point sur les techniques d'utilisation de la biomasse" In : Économie rurale. N°138, 1980. pp. 49-58; doi : <https://doi.org/10.3406/ecoru.1980.2726> https://www.persee.fr/doc/ecoru_0013-0559_1980_num_138_1_2726. Visité le 25/10/2019.
- Tagutchou J.-P., "Gazéification du charbon de plaquettes forestières : particule isolée et lit fixe continu", (Centre de Recherches en génie des Procédés des Solides Divisés, de l'Energie et de l'Environnement, UMR CNRS 2392) thèse de l'Ecole des Mines d'Albi- Carmaux - Campus Jarlard - 81013 Albi CT Cedex 09 – France. 2008.
- Thys E., "Utilisation de tourteau et de coques de coton à haute dose dans l'alimentation de bœufs de l'extrême Nord Cameroun : Observations préliminaires," *Tropicultura*, pp. 132-136. 1989.
- Zhu X. et Venderbosch R., "A correlation between stoichiometric ratio of fuel and its higher heating value, " *Fuel*, Vol. 84, , pp 1007-1010. 2005.

Annexe 1

Estimation de la quantité des tiges et épis de mil, et tiges et épis du sorgho

Sélectionnez le type de résidus de cultures

	Culture 1	Culture 2	Culture 3	Culture 4
Cultures	Millet	Millet	Sorgho	Sorgho
Résidus	paille	Type de résidus	paille/tige	Type de résidus
Lieu de la production de résidus	Recueillies sur le terrain	Recueillies sur le terrain	Champ de propagation	Recueillies sur le terrain

	Production de cultures			
Rendement des cultures (t/ha)	0.48		0.39	0.39
Nombre de récoltes/an	1.00		1.00	1.00
Production annuelle (t)	3,345,248.00	3,345,248.00	1,371,244.00	1,371,244.00
Superficie totale de la production (ha)	6,953,331.95	6,953,331.95	3,510,609.32	3,510,609.32

	Production des résidus de cultures			
Ratio résidus-à-cultures	Défini par l'utilisateur: 2.00	Défini par l'utilisateur: 0.50	Défini par l'utilisateur: 2.00	Défini par l'utilisateur: 0.50
Valeur par défaut				
Production total de résidus (t/an)	6,690,496.00	1,672,624.00	2,742,488.00	685,622.00
Rendement de résidus (t/ha)	0.96	0.24	0.78	0.20

	Résidus laissés dans les champs (pour la fertilité et la stabilité du sol)			
Défini par l'utilisateur (%)	53%	0%	19%	0%
Valeur par défaut (%)				
Total (t/an)	3,566,034.37	0.00	526,557.70	0.00

	Résidus brûlés dans les champs (zone de production brûlée après la récolte)			
Défini par l'utilisateur (ha)	0.00	0.00	0.00	0.00
Valeur par défaut (ha)				
Quantité de résidus brûlés (t/an)	0.00	0.00	0.00	0.00

	Utilisation actuelle des résidus de cultures			
nourriture et litière animale	30.00%	0.00%	79.50%	0.00%
t	2,007,149	0	2,180,278	0
combustibles (y compris le charbon de bois)		0.00%	0.00%	0.00%
t	0	0	0	0
construction	13.60%	0.00%	1.10%	0.00%
t	909,907	0	30,167	0
industrie	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
t	0	0	0	0
autre	1.00%	0.00%	0.10%	0.00%
t	66,905	0	2,742	0
Total actuellement utilisé	(%) 45%	0%	81%	0%
(t/an) 2,983,961.22	0.00	2,213,187.82	0.00	

	Potentiellement disponibles pour la bioénergie			
	Millet - paille	Millet - Type de résidus	Sorgho - paille/tige	Sorgho - Type de résidus
Total (t/an)	140,500	1,672,624	2,742	685,622
Zone totale de production (ha)	6,953,332	6,953,332	3,510,609	3,510,609
Rendement de résidus (t/ha)	0.02	0.24	0.00	0.20
Lieu de la production de résidus	Recueillies sur le terrain	Recueillies sur le terrain	Champ de propagation	Recueillies sur le terrain

Les Résidus de Cultures Disponibles pour la Bioénergie

	Culture-résidus 1	Culture-résidus 2	Culture-résidus 3	Culture-résidus 4
	Millet - paille	Millet - Type de résidus	Sorgho - paille/tige	Sorgho - Type de résidus
TOTAL	t/an 140,500	1,672,624	2,742	685,622
Zone totale de production	ha 6,953,332	6,953,332	3,510,609	3,510,609
Rendement de résidus	t/ha 0.02	0.24	0.00	0.20
Lieu de production des résidus	Recueillies sur le terrain	Recueillies sur le terrain	Champ de propagation	Recueillies sur le terrain

Les Résidus de Cultures Disponibles pour la Bioénergie

Annexe 2

Estimation de la quantité des paille et balles de riz, et tiges et rafle de maïs

Sélectionnez le type de résidus de cultures

	Culture 1	Culture 2	Culture 3	Culture 4
Cultures	Riz	Riz	Maïs	Maïs
Résidus	paille	écorce	la canne	cob
Lieu de la production de résidus	Champ de propagation	Usine de traitement	Recueillies sur le terrain	Champ de propagation

	Production de cultures			
Rendement des cultures (t/ha)	1.42	1.42	0.71	0.71
Nombre de récoltes/an	2.00	2.00	1.00	1.00
Production annuelle (t)	15,308.10	15,308.10	6,275.30	6,275.30
Superficie totale de la production (ha)	5,376.17	5,376.17	8,843.43	8,843.43

	Production des résidus de cultures				
Ratio résidus-à-cultures	Défini par l'utilisateur	1.00	0.25	1.00	3.00
	Valeur par défaut				
Production total de résidus (t/an)	15,308.10	3,827.03	6,275.30	18,825.90	
Rendement de résidus (t/ha)	2.85	0.71	0.71	2.13	

	Résidus laissés dans les champs (pour la fertilité et la stabilité du sol)			
Défini par l'utilisateur (%)	26%		68%	0%
Valeur par défaut (%)				
Total (t/an)	4,010.72	0.00	4,267.20	0.00

	Résidus brûlés dans les champs (zone de production brûlée après la récolte)				
Zone de production brûlée après la récolte	Défini par l'utilisateur (ha)	0.00		0.00	0.00
	Valeur par défaut (ha)				
Quantité de résidus brûlés (t/an)	0.00	0.00	0.00	0.00	

	Utilisation actuelle des résidus de cultures				
nourriture et litière animale	%	65.10%	0.00%	30.40%	0.00%
	t	9,966	0	1,908	0
combustibles (y compris le charbon de bois)	%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	t	0	0	0	0
construction	%	1.50%	0.00%	0.30%	0.00%
	t	230	0	19	0
industrie	%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	t	0	0	0	0
autre	%	7.20%	0.00%	1.30%	0.00%
	t	1,102	0	82	0
Total actuellement utilisé	(%)	74%	0%	32%	0%
	(t/an)	11,297.38	0.00	2,008.10	0.00

	Potentiellement disponibles pour la bioénergie			
	Riz - paille	Riz - écorce	Maïs - la canne	Maïs - cob
Total (t/an)	0	3,827	-0	18,826
Zone totale de production (ha)	5,376	5,376	8,843	8,843
Rendement de résidus (t/ha)	0.00	0.71	-0.00	2.13
Lieu de la production de résidus	Champ de propagation	Usine de traitement	Recueillies sur le terrain	Champ de propagation

	Les Résidus de Cultures Disponibles pour la Bioénergie				
	Culture-résidu 1	Culture-résidu 2	Culture-résidu 3	Culture-résidu 4	
	Riz - paille	Riz - écorce	Maïs - la canne	Maïs - cob	
TOTAL	t/an	0	3,827	0	18,826
Zone totale de production	ha	5,376	5,376	8,843	8,843
Rendement de résidus	t/ha	0.00	0.71	0.00	2.13
Lieu de production des résidus		Champ de propagation	Usine de traitement	Recueillies sur le terrain	Champ de propagation

Les Résidus de Cultures Disponibles pour la Bioénergie

Catégorie	Quantité (t/an)
Riz - paille	0
Riz - écorce	3,827
Maïs - la canne	0
Maïs - cob	18,826

Annexe 3

Estimation de la quantité des coques d'arachide, feuille et bagasse de la canne à sucre

Sélectionnez le type de résidus de cultures

	Culture 1	Culture 2	Culture 3	Culture 4
Cultures	Arachide	Canne à sucre	Canne à sucre	Sélectionnez
Résidus	écorce	bagasse	dessus/feuilles	
Lieu de la production de résidus	Usine de traitement	Recueillies sur le terrain	Recueillies sur le terrain	Recueillies sur le terrain

	Culture 1	Culture 2	Culture 3	Culture 4
Production de cultures				
Rendement des cultures (t/ha)	0.50	43.80	43.80	
Nombre de récoltes/an	1.00	1.00	1.00	
Production annuelle (t)	363,885.00	211,744.00	211,744.00	
Superficie totale de la production (ha)	739,326.40	4,833.85	4,833.85	0.00

	Culture 1	Culture 2	Culture 3	Culture 4
Production des résidus de cultures				
Ratio résidus-à-cultures	0.47	0.26	0.20	-
Production total de résidus (t/an)	173,845.95	55,053.44	42,348.80	0.00
Rendement de résidus (t/ha)	0.24	11.39	8.76	0.00

	Culture 1	Culture 2	Culture 3	Culture 4
Résidus laissés dans les champs (pour la fertilité et la stabilité du sol)				
Ratio résidus-à-cultures	0%	0%	25%	25%
Total (t/an)	0.00	0.00	10,587.20	0.00

	Culture 1	Culture 2	Culture 3	Culture 4
Résidus brûlés dans les champs (zone de production brûlée après la récolte)				
Ratio résidus-à-cultures	0.00%	0.00%	483.39%	0.00%
Quantité de résidus brûlés (t/an)	0.00	0.00	4,234.88	0.00

	Culture 1	Culture 2	Culture 3	Culture 4
Utilisation actuelle des résidus de cultures				
nourriture et litière animale	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
combustibles (y compris le charbon de bois)	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
construction	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
industrie	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
autre:	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Total actuellement utilisé	0%	0%	0%	0%

	Arachide - écorce	Canne à sucre - bagasse	Canne à sucre - dessus/feuilles	Sélectionnez -
Total (t/an)	173,846	55,053	31,762	0
Zone totale de production (ha)	739,326	4,834	4,834	0
Rendement de résidus (t/ha)	0.24	11.39	6.57	0.00
Lieu de la production de résidus	Usine de traitement	Recueillies sur le terrain	Recueillies sur le terrain	Recueillies sur le terrain

Les Résidus de Cultures Disponibles pour la Bioénergie

	Arachide - écorce	Canne à sucre - bagasse	Canne à sucre - dessus/feuilles	Sélectionnez -
TOTAL	173,846	55,053	31,762	0
Zone totale de production	739,326	4,834	4,834	0
Rendement de résidus	0.24	11.39	6.57	0.00
Lieu de production des résidus	Usine de traitement	Recueillies sur le terrain	Recueillies sur le terrain	Recueillies sur le terrain

	Arachide - écorce	Canne à sucre - bagasse	Canne à sucre - dessus/feuilles	Sélectionnez -
TOTAL	173,846	55,053	31,762	0
Zone totale de production	739,326	4,834	4,834	0
Rendement de résidus	0.24	11.39	6.57	0.00
Lieu de production des résidus	Usine de traitement	Recueillies sur le terrain	Recueillies sur le terrain	Recueillies sur le terrain

Les Résidus de Cultures Disponibles pour la Bioénergie

Catégorie	Quantité (t/an)
Arachide - écorce	173,846
Canne à sucre - bagasse	55,053
Canne à sucre - dessus/feuilles	31,762
Sélectionnez -	0

Annexe 4

Présence des espèces balanites aegyptiaca et Hyphaene thebaica

Zone	Coordonnées	Balanites	Hyphaene	Source
Dallol Bosso (Falmey, la série de Fandou)	14°27'86''	Espèce dominante	Espèces compagnes	Laoualy Ada, Ali Mahamane (1999)
Kogori	(13°41'46''E et 2°54'18''N),	Espèces compagnes		
Kouringuel	(13°22'19''E et 2°54'36''N).	Espèces compagnes	Espèces compagnes	
Birni N'Gaouré		Espèces compagnes		
Réserve de Gadabédji		Espèce dominante		
Zinder Formations de bas-fonds Takaya, Tanout...		Espèce dominante		
Zinder Formations mixtes, vallée de Gassafa –Bouné - Katgeri			Espèce dominante	
Formations de bas-fonds à Hyphaene thebaica et Borassus (Zinder)			Espèce dominante	
Niamey, Tillabéry, Dogondoutchi, Bouza, Madaoua, Tahoua			Espèce compagnes	
Bangui, Guidan Rounji, Dakoro, Tessaoua, Gazaoua, Aguié, Matameye, Zinder.			Espèces compagnes	
N'Guigmi, Mainé-Soroa, Tasker, Gouré, Kao-Tchouloum			Espèces compagnes	
Koran Addoua, Dakoro		Espèce dominante		Centre d'échange d'information sur la biodiversité du Niger
Goulbin Kaba (Maradi)	les longitudes 7° 13' & 7°57' et latitudes 13 ° 46' & 13 °49'		Espèce dominante	Duhem C. (2003)
Toukounous (Tillabéry)		Espèces compagnes		S. Ousseina et al (2015)
Mainé-Soroa			Espèce dominante	Laminou M. O et al (2016)

Annexe 5

1. Répartition par région, de l'énergie électrique à 25% et l'énergie thermique à 70% du potentiel mobilisable

<i>résidus agricoles</i>								
Région	Agadez	Diffa	Dosso	Maradi	Niamey	Tahoua	Tillabéry	Zinder
GWh Th	4,89	21,45	273,72	391,46	5,62	298,72	233,01	335,50
GWh El	1,75	7,66	97,76	139,81	2,01	106,68	83,22	119,82
%	0,31	1,37	17,49	25,01	0,36	19,09	14,89	21,44
MW El	65,3							
<i>Sous-produits forestiers</i>								
MW El	12,3							

2. Comparaison du potentiel énergétique des résidus agricoles et la consommation électrique nationale

Zone	Potentiel Thermique (GWh)	Potentiel Electrique (GWh)	Productions Nationales et Importations	
			(GWh)	(%)
Agadez	4,89	1,75	62,77	5,29%
Diffa	21,45	7,66	22,39	1,89%
Dosso	273,72	97,76	45,85	3,86%
Maradi	391,46	139,81	82,79	6,98%
Niamey	5,62	2,01	674,90	56,86%
Tahoua	298,72	106,68	77,15	6,50%
Tillabéry	233,01	83,22	51,25	4,32%
Zinder	335,50	119,82	70,24	5,92%
Total	1565,06	558,95	1087,33	100%

3. Pourcentage des productions locales et achats de l'année 2018

	Locale	Sonichar	PHCN
kWh	196348712,3	56516929	935925191
%	16,5	4,8	78,9

Source : NIGELEC