



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



**Faculté des Sciences et Techniques**

**Département de Physique**

Mémoire pour l'obtention de

Master 2 Système Énergétique Durable pour Société en Développement (2SED)

## Evaluation du potentiel des résidus agricoles et Essai préliminaire de gazéification

M. TCHIFFA GUIMBARO

*Sous la direction de :*

Dr. HAROUNA GADO Ibrahim  
Maître-assistant, Département de  
physique à l'Université Dan Dicko  
Dankoulodo de Maradi

Année académique 2016-2017

## **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 pour 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 reconnaissance et gratitude à la personne de Dr Harouna Gado Ibrahim, 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-jours.

Je tiens à remercier chaleureusement le président du jury ainsi que tous les membres du jury pour l'honneur d'accepté l'évaluation de ce travail, et pour l'intérêt qu'ils ont accordé à la présente soutenance.

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 manquer de 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
SIGLES ET ABBREVIATIONS .....	VII
RESUME .....	VIII
ABSTRACT .....	IX
INTRODUCTION GENERALE .....	1
CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE .....	4
INTRODUCTION .....	4
I.1 BIOMASSE COMME SOURCE D'ENERGIE.....	4
I.2 PROPRIETES DE LA BIOMASSE.....	5
I.3 METHODE D'EVALUATION DU POTENTIEL DE LA BIOMASSE.....	6
I.4 SYNTHESE SUR LES RESIDUS DE LA BIOMASSE AGRICOLES DISPONIBLES AU NIGER.....	7
1.4.1 Élément sur les cultures pluviales .....	7
1.4.2 Ressource en riz .....	9
1.4.3 Ressource en <i>Balanites aegyptiaca</i> (dattier du désert) .....	10
1.4.4 Ressource en <i>Hyphaene thebaica</i> (palmier doum) .....	11
I.5 LE POINT SUR LES PROCEDES UTILISES POUR LA GAZEIFICATION DE LA BIOMASSE .....	12
1.5.1 Différentes filières de conversion énergétique.....	12
1.5.2 Les quatre étapes de la gazéification .....	13
1.5.3 Outils d'évaluation de la performance d'un gazogène.....	14
CONCLUSION .....	16
CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODE .....	17
INTRODUCTION .....	17
II.1 METHODE D'ESTIMATION DE LA RESSOURCE EN BIOMASSE ET DE LEURS POTENTIELLES ENERGETIQUES.....	17
2.1.1 Potentiel des résidus agricoles .....	17
2.1.2 Potentiel des résidus des produits forestiers .....	20
2.1.3 Choix de la biomasse .....	21
2.1.4 Calcul du potentiel énergétique.....	22
II.2. MATERIELS ET METHODES DES ESSAIS PRELIMINAIRES DE GAZEIFICATION .....	22
2.2.1 Matériels .....	22
2.2.2 Méthodes.....	24
II.3 ANALYSE IMMEDIATE DES BIOMASSES ET DU POUVOIR CALORIFIQUE .....	25
CONCLUSION .....	25
CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS .....	26
INTRODUCTION .....	26
III.1 ÉVALUATION DE LA RESSOURCE EN RESIDUS DE CULTURE .....	26
3.1.1 Estimation du potentiel total brut .....	26
3.1.2 Estimation des résidus potentiellement disponible pour la bioénergie .....	29
3.1.3 Choix de la biomasse .....	29
3.1.4 Estimation des résidus potentiellement mobilisable .....	31
III.2 EVALUATION DE LA RESSOURCE EN RESIDUS D'ESPECES FORESTIERES.....	32
III.3 POTENTIEL ENERGETIQUE DES RESIDUS DE CULTURE ET SOUS-PRODUITS D'AGROFORESTERIE .....	36
III.4 ESSAIS DE GAZEIFICATION .....	37
III.5 RESULTATS DE L'ANALYSE IMMEDIATE .....	43

<b>CONCLUSION .....</b>	<b>44</b>
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>46</b>
<b>PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS .....</b>	<b>48</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>49</b>
<b>ANNEXE 1 .....</b>	<b>A</b>
<b>ANNEXE 2 .....</b>	<b>B</b>
<b>ANNEXE 3 .....</b>	<b>C</b>
<b>ANNEXE 4 .....</b>	<b>D</b>

## Liste des Tableaux

<i>Tableau 1.1 : Composition en cellulose, hémicellulose et lignine pour quelque résidu de biomasse.....</i>	<i>5</i>
<i>Tableau 1.2 : Différentes formes d'utilisation traditionnelles des résidus agricoles au Niger, (en %), (Karimou et Atikou, 1998).....</i>	<i>8</i>
<i>Tableau 1.3: Quelques cultures génératrices de résidus agricoles au Niger.....</i>	<i>9</i>
<i>Tableau 1.4: Répartition de l'énergie pour un gazogène Imbert de laboratoire .....</i>	<i>15</i>
<i>Tableau 2.1: Ratio déchet/produit et contenu énergétique des déchets agricoles .....</i>	<i>20</i>
<i>Tableau 3.1: productions céréalières et industrielles en tonnes .....</i>	<i>26</i>
<i>Tableau 3.2: Quantités brutes de déchets générés par les cultures céréalières en millier de tonne ....</i>	<i>27</i>
<i>Tableau 3.3: Quantité des déchets générés par les cultures de rente, en millier de tonne .....</i>	<i>27</i>
<i>Tableau 3.4 : Quantité de résidus de culture céréalières, potentiellement disponible pour la bioénergie.....</i>	<i>29</i>
<i>Tableau 3.5 : Quantité de résidus de culture de rente, potentiellement disponible pour la bioénergie</i>	<i>29</i>
<i>Tableau 3.6 : Rendement en production de résidus disponibles pour la bioénergie .....</i>	<i>30</i>
<i>Tableau 3.7: Quantités des résidus (A2) mobilisables (en tonne).....</i>	<i>31</i>
<i>Tableau 3.8: estimation du potentiel de Hyphaene thebaica .....</i>	<i>34</i>
<i>Tableau 3.9:estimation du potentiel de Balanites aegyptiaca.....</i>	<i>35</i>
<i>Tableau 3.10 : Quantités brute de résidus de fruit générées par les espèces forestières, en tonne .....</i>	<i>35</i>
<i>Tableau 3.11 : Quantités de résidus de fruit d'espèces forestières (F2), potentiellement mobilisable, en tonne .....</i>	<i>36</i>
<i>Tableau 3.12: Evaluation du potentiel énergétique de résidus agricole.....</i>	<i>36</i>
<i>Tableau 3.13: Évaluation du potentiel énergétique des résidus de fruit des espèces forestières.....</i>	<i>36</i>
<i>Tableau 3.14: Récapitulatif du test de gazéification de la balle de riz .....</i>	<i>42</i>
<i>Tableau 3.15: Analyse immédiate des échantillons du charbon de bois.....</i>	<i>43</i>

## Liste des Figures

<i>Figure 1.1: processus de la gazéification (Zhu et Venderbosch, 2005).....</i>	<i>13</i>
<i>Figure 2.1: Méthode d'estimation du potentiel de résidus agricole pour la bioénergie.....</i>	<i>19</i>
<i>Figure 2.2: Méthode d'estimation du potentiel de résidus de fruit d'espèce forestières .....</i>	<i>21</i>
<i>Figure 2.3: Gazogène de l'étude.....</i>	<i>23</i>
<i>Figure 3.1: Évolution des quantités brutes de résidus de mil et sorgho sur le plan national, de 2008 à 2017.....</i>	<i>28</i>
<i>Figure 3.2: Évolution des quantités brutes de résidus d'autres cultures, générés sur le plan national, de 2008 à 2017.....</i>	<i>28</i>
<i>Figure 3.3: Répartition des résidus agricoles par région.....</i>	<i>32</i>
<i>Figure 3.4: présence des espèces forestières : Balanites aegyptiaca et Hyphaene thebaica.....</i>	<i>33</i>
<i>Figure 3.5: Potentiel en électricité et en chaleur des résidus agricoles mobilisables par an .....</i>	<i>37</i>
<i>Figure 3.6: Profils de températures du réacteur.....</i>	<i>39</i>
<i>Figure 3.7: (a) échantillon de la balle de riz, .....</i>	<i>42</i>
<i>Figure 3.8: (c) échantillon de coque de Balanites aegyptiaca, .....</i>	<i>42</i>
<i>Figure 3.9: (f) échantillon de coque de Balanites aegyptiaca, .....</i>	<i>43</i>
<i>Figure 3.10: (i) résidus de cendre après cendre après gazéification,.....</i>	<i>43</i>

## 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
$\eta_e$	: Rendement électrique
$\Delta H$	: 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



## 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. Les statistiques agricoles et données d'inventaires forestiers ont servi à l'étude. Il ressort que l'utilisation de 0,04% du potentiel total brut des résidus de récolte et 10,6% du potentiel total brut des résidus forestiers, permettrait respectivement de mobiliser près d'un demi-million de tonnes des résidus agricoles par an, et plus de 20 kilotonnes de résidus des produit forestiers, soit respectivement un potentiel de plus de 4.000TWh, et 261,7TWh en moyenne par an. C'est dans ce sens que la gazéification a été envisagée comme moyen de conversion de l'énergie chimique de la biomasse à la chaleur ou l'électricité. Les essais de gazéification ont été conduit dans un gazogène à lit fixe 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'atteindre des températures maximales en zone de combustion et d'une consommation moyenne respectivement de 1074°C et 1,83kg/h ; 854,1°C et 7,21kg/h ; 1026,8°C et 4,28kg/h ; 1147°C et 1,7kg/h. Pour la balle de riz les faibles températures ont limité la production des 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. Par ailleurs les résultats de l'analyse immédiate ont permis d'obtenir les propriétés de base des résidus ciblés. Les taux de cendre et du PCS obtenu sont respectivement de 21,78% et 15,05MJ/kg pour la balle de riz ; 3,27% et 16,76MJ/kg pour la coque du fruit de Balanites ; 13,89% et 17,89MJ/kg pour la coque du fruit d'Hyphaene.

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

## Abstract

The purpose of the assessment of the potential of agricultural residues and forest products in this study is energy recovery by gasification with a view to improving the supply and access to modern energy services. Agricultural statistics and forest inventory data were used for the study. It appears that the use of 0.04% of the total gross potential of crop residues and 15.95% of the total gross potential of forest residues will enable the mobilization of nearly half a million tonnes of agricultural residues per year, and more than 5 kilotonnes of forest product residues, respectively a potential of more than 4,000TWh, and 261,7TWh on average per year. It is in this sense that gasification has been envisaged as a means of converting chemical energy from biomass to heat or electricity. The gasification tests were conducted in a co-current fixed-bed gasifier, with air as oxidant. Tests on 3.95kg of rice husks; 17.9kg of Balanites hulls; 9.5 kg of Hyphaene hulls and 12.2 kg of charcoal, made it possible to reach maximum temperatures in the combustion zone and average consumption of 1074 ° C and 1.83 kg/h; 854.1 ° C and 7.21kg/h; 1026.8 ° C and 4.28 kg/h; 1147 ° C and 1.7kg/h respectively. For the rice husk the low temperatures limited the production of the gases, due to the absence of a stirrer of the biomass bed in the gasifier. On the other hand, for the hulls of Balanites, Hyphaene fruit and charcoal, the production time of the gas is respectively 65 minutes after 15 minutes of the start of the test, 45 minutes after 12 minutes of waiting, and 194 minutes with a duration of wait of 59mn. In addition, the results of the immediate analysis made it possible to obtain the basic properties of the targeted residues. The ash and PCS levels obtained are respectively 21.78% and 15.05 MJ/kg for the rice husk; 3.27% and 16.76MJ/kg for the hull of the Balanites fruit; 13.89% and 17.89MJ/kg for the hull of the Hyphaene fruit.

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

## **Introduction générale**

Aujourd'hui comme jadis, la question énergétique demeure une problématique d'actualité dans toutes les nations, avancées ou en voie de développement. En somme l'énergie est l'une des préoccupations majeures de la communauté internationale, ceci grâce à 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).

C'est pourquoi l'agenda 2030 des objectifs de développements durable prend en compte cet aspect en son objectif 7, "pour garantir l'accès de tous à des services énergétiques fiables, durables et modernes à un coût abordable". Selon un rapport conjoint de l'Agence International de l'Energie (AIE), 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). Le déficit énergétique influence déjà fortement le développement de cette partie de l'Afrique, ces récentes prévisions devront inciter à redoubler plus d'effort.

Le contexte énergétique du Niger, un pays de l'Afrique subsaharienne, est caractérisé par un accès limité à l'électricité avec un taux de couverture national de 12% en 2017, une consommation électrique de 1.1TWh en 2016 (AIE, 2018), avec une forte dépendance des approvisionnements extérieurs. En effet, malgré les 83 % de la population que représente le milieu rural, sa part dans la consommation finale d'électricité ne représente que 1 % (AIE 2018 ; SIE, 2007) ; on note également un faible taux d'utilisation des énergies renouvelables.

Il a été démontré que le raccordement en réseau des zones très reculées ne constitue pas la solution idéale pour rehausser le taux d'accès à l'électricité. Le coût excessif de cette tâche et sa faible rentabilité constituent les principales raisons. En revanche la décentralisation des moyens de production de l'énergie est la solution la mieux indiquée. (Martin et Assouh, 2005).

L'état du Niger dans son plan d'action national des énergies renouvelables (PANER) prévoit une contribution significative des énergies renouvelables au mix énergétique de l'ordre de 30% d'ici à 2030, avec comme priorité de desservir les zones rurales via des systèmes hors réseau (PANER, 2015). Toutefois le PANER indique que la biomasse, aussi bien agricole ne peut malheureusement pas constituer une alternative pour produire de l'énergie, que ce type de biomasse doit être affecté pour le maintien de la fertilité des sols. Par conséquent, ceci justifie la non intégration de la bioénergie dans la politique énergétique au Niger. A l'ère du mix énergétique, autrement dit, de la diversification des sources de production d'énergie, seule

l'énergie solaire photovoltaïque, est en développement et encouragée. La biomasse est mise en retrait, du fait de l'absence d'une base de données fiable devant favoriser sa valorisation. (Adamon, 2017). Il est important de souligner que la biomasse énergie peut jouer un rôle au développement économique aussi bien qu'à l'amélioration de l'environnement local et global selon Riedacker (Guide de biomasse énergie, 2005). La biomasse-énergie possède un avantage essentiel par rapport aux autres énergies renouvelables (solaire, éolien...) : la biomasse peut être stockée, de ce fait elle offre la possibilité de produire l'énergie à la demande, et ne souffre guère de l'intermittence qu'imposent les conditions climatiques. En plus une étude de la FAO indique que les données disponibles sur les résidus agricoles (paille, balles de riz, ...) donnent une estimation de 80 Mt en moyenne par an. La biomasse de par son abondance, représente la principale source d'approvisionnement en énergie dans l'Afrique Subsaharienne. La biomasse, notamment le bois-énergie, constitue la principale source d'énergie utilisée par les ménages nigériens. Au plan national, l'approvisionnement total en énergie primaire (ATEP) fut estimé en 2016 à 3079,56 ktep soit 35.800GWh, avec la biomasse qui représente 74,28 % du total (IFDD, 2019). Près de 95 % des besoins énergétiques des ménages sont satisfaits par les combustibles ligneux, essentiellement le bois-énergie et les résidus agricoles (IFDD, 2019). Par ailleurs les prévisions du FONABES (2017) indiquent que le bois de feu restera le combustible le plus utilisé en milieu rural pendant encore de nombreuses années et que si rien n'est fait, la demande pourrait doubler à l'horizon 2030 compte tenu de plusieurs facteurs dont la pression démographique.

Dasappa *et al.* (2007) soulignent que parmi les énergies renouvelables, les systèmes de production d'énergie basés sur la biomasse peuvent fournir d'excellent réseau d'électricité. A ce titre, au risque de ne pas pouvoir éliminer la prédominance de la biomasse par d'autre source de substitution dans l'immédiat, il serait judicieux de penser à l'adoption de méthodes de conversion plus efficaces, qui permettrait d'accélérer l'accès aux énergies modernes des populations rurales, avec la possibilité de son usage aussi bien en électricité qu'en chaleur. On peut formuler l'hypothèse selon laquelle, l'adoption des méthodes de conversion plus efficaces permettent de réduire significativement le taux de pression exercé sur les ressources forestières. 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. La gazéification est un procédé thermochimique, découvert en Angleterre et en France depuis 1798 (Singer, 1952), qui consiste à la conversion d'un combustible solide en un combustible gazeux (Martin et Assouh, 2005).

Il faut noter que l'insuffisance des statistiques fiables sur la disponibilité et la nature des résidus agricoles pouvant être valorisés, malgré leur abondance, compromettent l'idée de promouvoir leur bioénergie. Pour ces multiples 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 Bénin et au Sénégal. C'est dans ce même 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 est axé 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 disponible 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 1.1 : Composition en cellulose, hémicellulose et lignine pour quelque résidu 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 majeure sur la 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**

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. 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.

## **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  $\mu\text{m}$  à 3  $\mu\text{m}$ ), 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).

## **1.4 Synthèse sur les résidus de la biomasse agricoles disponibles au Niger**

### **1.4.1 Élément sur les cultures pluviales**

Selon une étude menée sous l'égide de la FAO en 2014, 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 1.2). Les tiges qui sont abandonnés au champ sont soit broutées par les animaux, soit enfouies dans le sol, pour l'amender.

*Tableau 1.2 : 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 1.3 indique les principales cultures céréalières, les types de résidus issus de leurs récoltes ainsi que les superficies cultivées au Niger.

Tableau 1.3: Quelques cultures génératrices de résidus agricoles au Niger

Cultures céréalières	Résidus	Superficies culturales (ha)
Mil	Tiges	6 998 776
	Epis	
Sorgho	Tiges	3 819 935
	Epis	
Maïs	Rafles	9 567
	Tiges et feuille	
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 constituent 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 vendu sur place.

#### 1.4.2 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 décortilage 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 décortilage ; 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.

### **1.4.3 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%.

#### **1.4.4 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'Aïr. 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) celle 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 ralenti 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 Le point sur les procédés utilisés pour la gazéification de la biomasse**

### **1.5.1 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 A 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'H<sub>2</sub>, sont récupérés vers

le bas du réacteur. Les gaz produits, peuvent être utilisés 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 1.2.

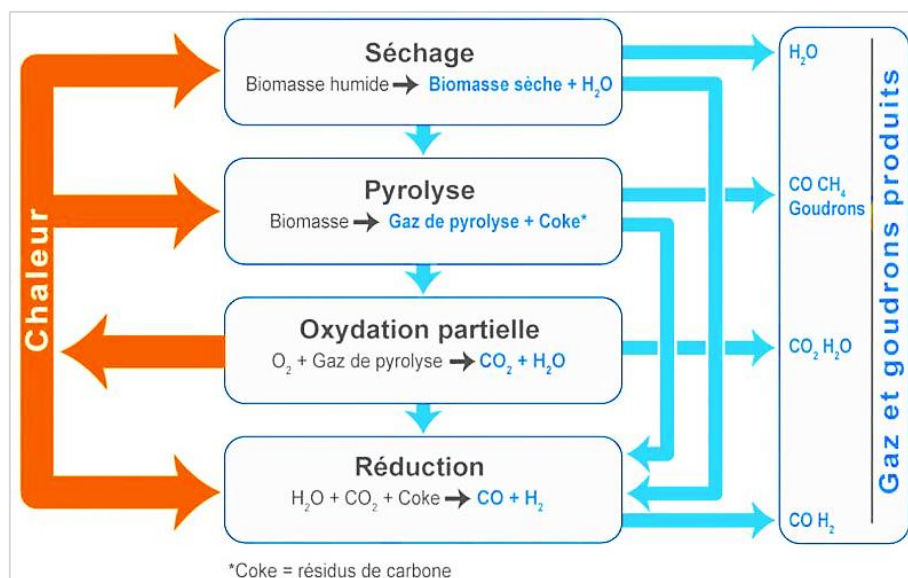


Figure 1.1: processus de la gazéification (Zhu et Venderbosch, 2005)

### 1.5.2 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

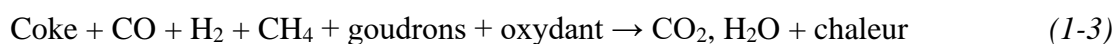
La pyrolyse signifie la décomposition thermique de la matière cellulosique en absence d'oxygène. Elle se produit à partir de 250°C (Gerun, 2007), et conduit à l'obtention des produits solides, des vapeurs condensables et des gaz incondensables. La pyrolyse est généralement considérée autothermique, c'est-à-dire 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

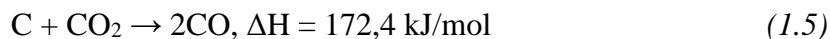
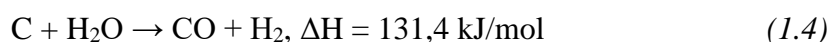
Cette opération se fait en présence d'un oxydant, son choix est fondamental car il gouverne la conception du gazogène et de son choix dépend l'utilisation finale du gaz. C'est essentiellement

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.

### 1.5.3 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 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 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 1.5.

Tableau 1.4: 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

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

avec :  $PCI_{CO} = 282,4 \text{ MJ.kmol}^{-1}$  ;  $PCI_{H_2} = 241,8 \text{ MJ.kmol}^{-1}$  ;  $PCI_{CH_4} = 802,4 \text{ MJ.kmol}^{-1}$  (Ruhrose, 1992). Les coefficients : a, c et d sont les nombres de moles de CO, de H<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub> 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 cendreux, 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 biomasse sélectionnées.

### II.I Méthode d'estimation de la ressource en biomasse et de leurs potentielles énergétiques

#### 2.1.1 Potentiel des 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 et 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 1.1, 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 2.1 donne une présentation générale de la méthode.



Figure 2.1: Méthode d'estimation du potentiel de résidus agricole pour la bioénergie

Les équations (2.1) et (2.4) 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 sont présentés au tableau 2.1.

Tableau 2.1: Ratio déchet/produit et contenu énergétique des déchets agricoles

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

### 2.1.2 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 significatives, renseignées dans la littérature seront considérés.

En somme pour évaluer le potentiel en résidu 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.

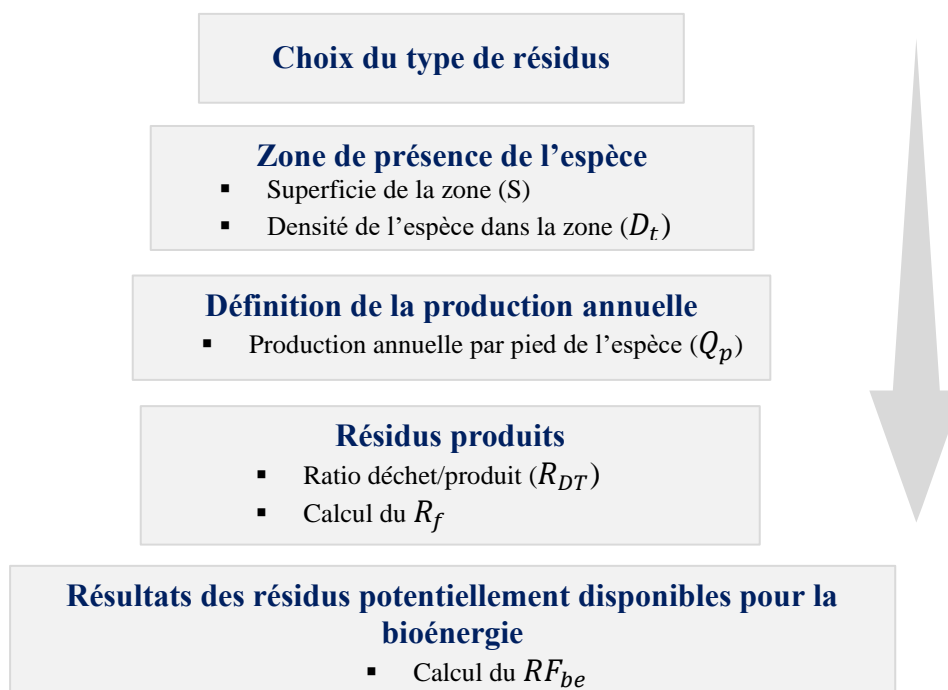


Figure 2.2: Méthode d'estimation du potentiel de résidus de fruit d'espèce forestières

Les équations (2.5) à (2.7) ont été utilisés 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 ;  $\omega$  (%) : pourcentage mobilisable ;  $RF_{be}$  : Quantité de résidus disponible pour la bioénergie.

La zone d'étude choisi pour l'*Hyphaene thebaica* est le Goulbi N'Kaba, et pour la *balanites aegyptiaca* la forêt classée de Gadabéji, toutes situées dans la région de Maradi respectivement dans les départements de Mayahi et Dakoro.

Notons ( $F_1$ ) le groupe des résidus d'agroforesterie, par ailleurs, à l'issue de la sélection, nommons ( $F_2$ ) les résidus d'agroforesteries sélectionnées.

### 2.1.3 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 produit en grande quantité

#### 2.1.4 Calcul du potentiel énergétique

Le potentiel énergétique 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.

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

Etant donné que le rendement électrique 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 l'énergie électrique et 70% dans le cas de l'énergie thermique.

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

#### 2.2.1 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 2.3), sous financement du département de physique de l'Université Dan Dicko Dankoulodo de Maradi. 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.



Il comporte une soufflante de marque G. Meidenger de caractéristique : 0,17ch ; 220/380V ; 0,7-0,4A ; 50Hz ; 2800Tr/mn, qui permet l'injection d'air à deux niveaux du gazogène, à savoir la zone du séchage (injection d'air secondaire) et celle d'oxydation (injection d'air primaire).



Figure 2.3: Gazogène de l'étude

#### 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 utilisées. 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 effectué 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.

### 2.2.2 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 fermée de façon hermétique la partie alimentation à l'aide de 6 boulons et d'une clé à vis.

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 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 à travers le poignet 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 profils 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 résiduel 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  $(105 \pm 2) ^\circ\text{C}$  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  $900^\circ\text{C}$ , pendant exactement 7 minutes c'est la norme AFNOR/X 34 B N° 289 qui a été utilisée. 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

Cette partie a 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 effectuées. Une 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 au cours des essais et par la suite analysées.

### III.1 Évaluation de la ressource en résidus de culture

#### 3.1.1 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 3.1, 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 3.1 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 3.1: productions céréalières et industrielles en tonnes*

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

Source : INS.

Dans le Tableau 3.2 ci-dessous sont présentés les résultats de l'évaluation brute des résidus, calculé 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 générée une quantité brute de résidu estimée à 11.835,4 kilotonnes, ces dernières restent dominées par le mil suivi du sorgho et de l'arachide.

*Tableau 3.2: 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
<b>Moy. annuelle</b>	6690,5	1672,6	2742,5	685,6	15,3	3,8	6,3	18,8
<b>Somme moy annuelle</b>	8363,1		3428,1		19,1		25,1	

Le tableau 3.3 ci-dessous, présente les quantités de résidus générés par les cultures de rente.

*Tableau 3.3: Quantité des déchets générés par les cultures de rente, en millier de tonne*

Types de déchets	Arachide	Canne à sucre	
	Coque	Bagasse	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
<b>Moy. annuelle</b>	173,8	55,7	7,9
<b>Somme moy annuelle</b>		63,6	

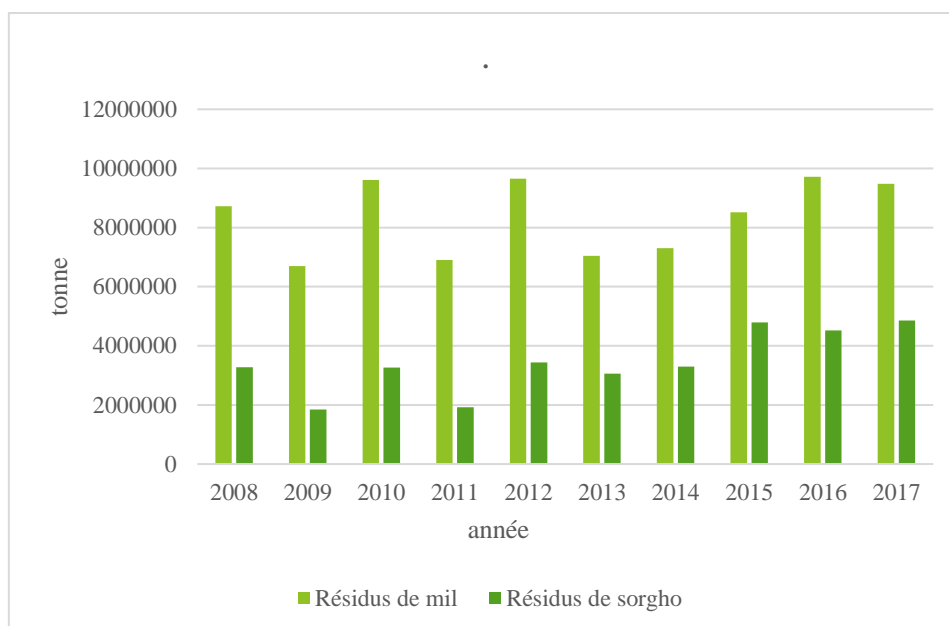


Figure 3.1: Évolution des quantités brutes de résidus de mil et sorgho sur le plan national, de 2008 à 2017

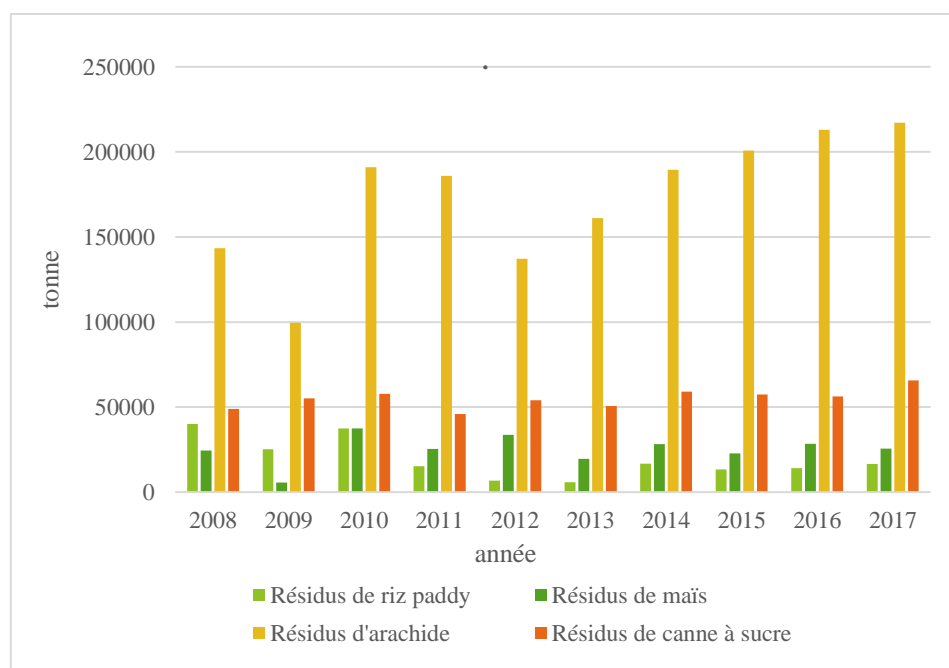


Figure 3.2: Évolution des quantités brutes de résidus d'autres cultures, générés sur le plan national, de 2008 à 2017

Sur la figure 3.4, 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.

### 3.1.2 Estimation des résidus potentiellement disponible pour la bioénergie

Dans cette étude, les résidus potentiellement disponibles pour la bioénergie, sont ceux dépourvu des concurrences entre les usages humains ou animal, avec l'usages énergétiques.

A cet égard, l'applications 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, nous permet d'aboutir à un potentiel disponible pour la bioénergie chiffré à 2.255.471 tonnes et reparti comme suit :

*Tableau 3.4 : Quantité de résidus de culture céréalières, potentiellement disponible pour la bioénergie*

	Mil		Sorgho		Riz paddy		Maïs	
Type déchets	Tiges	Epis	Tiges	Epis	Paille	Balles	Rafle	Tiges
Pourcentage	2,1%	100%	0,1	100%	0%	100%	0%	100%
Quantité (kt)	200,7	1254,5	2,7	514,2	0,015	3,8	0	18,8

*Tableau 3.5 : Quantité de résidus de culture de rente, potentiellement disponible pour la bioénergie*

	Arachide		Canne à sucre
Type déchets	Coque	Bagasse	Feuilles
Pourcentage	100%	100%	100%
Quantité (kt)	173,8	55,1	31,7

Le potentiel disponible obtenu ne représente en effet que 18,7% du potentiel total brute de l'ensemble des types de culture.

### 3.1.3 Choix de la biomasse

A l'issu des calculs du potentiel, on constate au tableau 3.4, que les tiges de mil, du sorgho et du maïs présentent des rendements proches ou égale à zéro (0), ce qui nous amène à les éliminer de l'étude, car en plus de leurs fortes utilisations dans l'habitat humaine 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 spongieuse qui leur confère 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 tient 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 décortiquage, en plus ces usines sont toutes 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 approvisionné dans les usines de production d'huile d'arachide. Donc à ce niveau, les résidus disponibles dans des usines, mieux si ces usines sont dans des régions 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 3.4, 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 3.6 : Rendement en production de résidus disponibles pour la bioénergie*

	<b>Résidus</b>	<b>Rendement tonne/ha</b>
<b>Mil</b>	Tiges	0,03
	Epis	0,18
<b>Sorgho</b>	Tiges	0
	Epis	0,15
<b>Riz paddy</b>	Paille	0
	Balles	0,71
<b>Mais</b>	Rafles	0,28
	Tiges et feuilles	0
<b>Arachide</b>	Coque	0,24
<b>Canne à sucre</b>	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.

### 3.1.4 Estimation des résidus potentiellement mobilisable

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 collectes". 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 collectes jugés possible à être atteint, 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 présentés au tableau 3.7.

*Tableau 3.7: Quantités des résidus (A2) mobilisables (en tonne)*

	Epis de mil	Epis de sorgho	Rafles de Maïs	Balles de riz	Coques d'arachide	Bagasse de canne à sucre
% collectables	20%	20%	20%	60%	30%	20%
Quantités collectables	250893,6	102843,4	3765,2	2296,2	52153,8	11010,6

Cela nous donne un total de 422.963 tonnes de résidus mobilisables, ce qui correspond à 18,9% des résidus agricoles disponibles pour la bioénergie, et 0.04% du potentiel total brut.

La figure 3.3 ci-dessous présente la répartition des résidus générés par culture et par région.

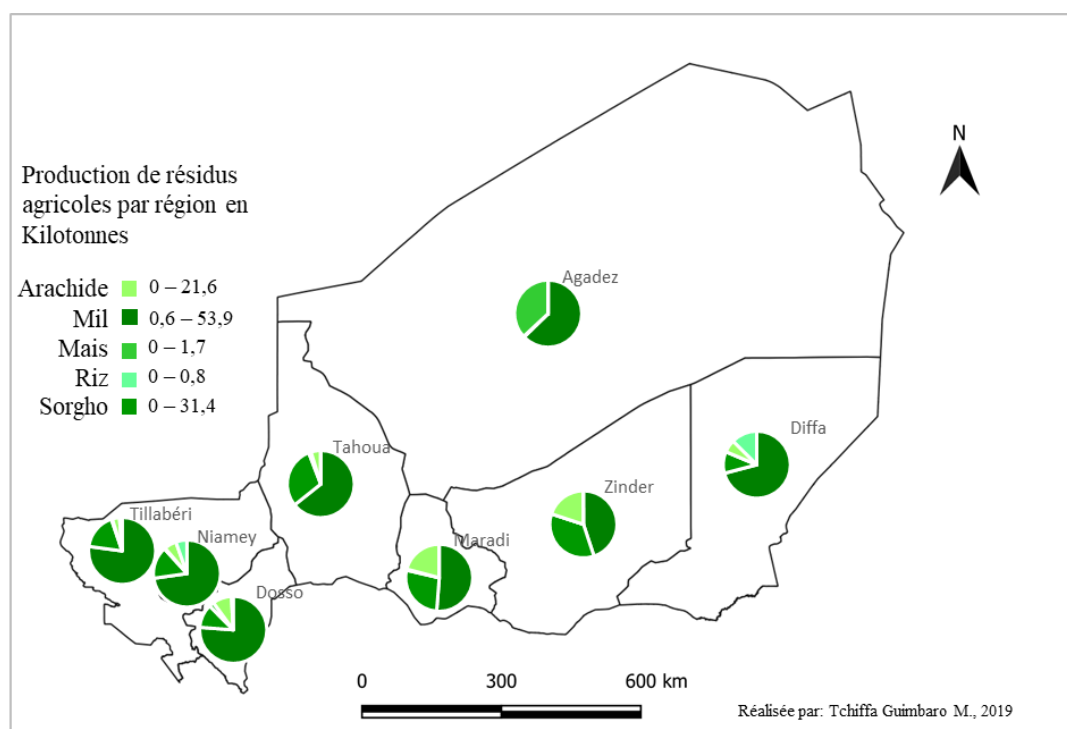


Figure 3.3: Répartition des résidus agricoles par région

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

- La partie Centre-Est constitué de Tahoua Maradi et Zinder
- 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), rare sont les zones où nous retrouvons les densités et les superficies occupées, néanmoins il existe des parcs où ses 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 3.4) 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.

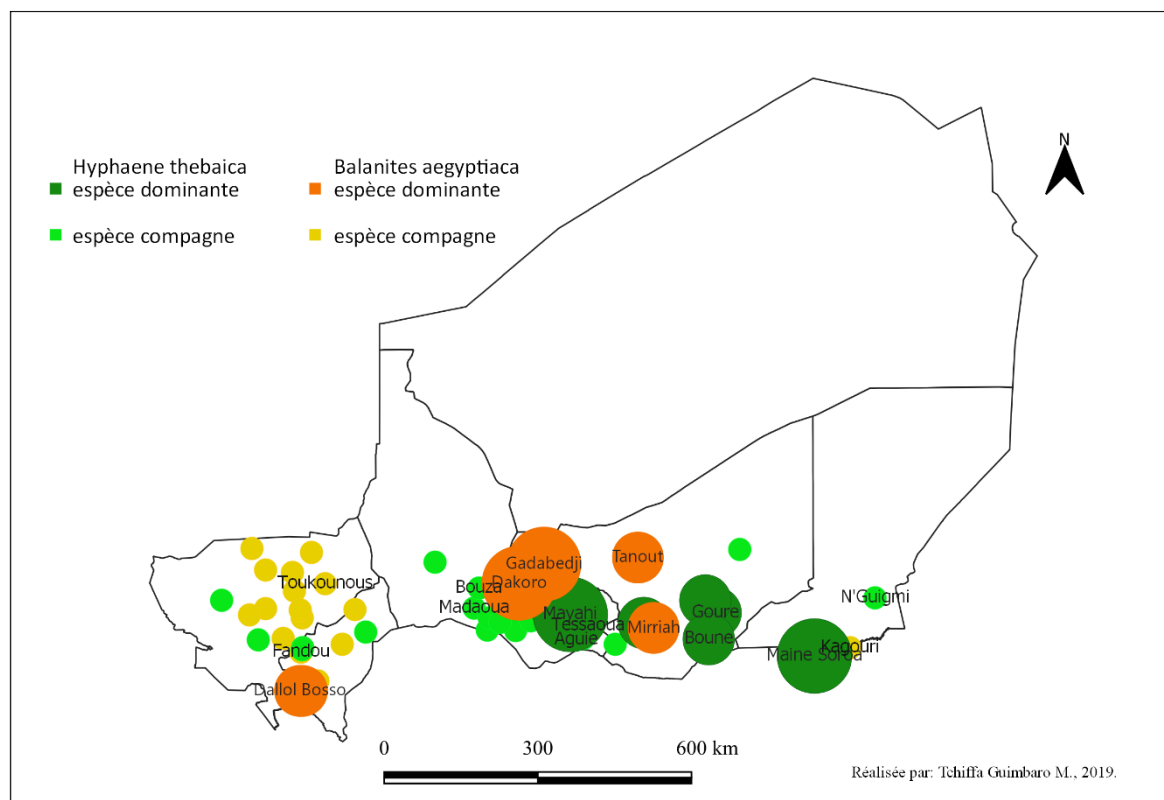


Figure 3.4: présence des espèces forestières : *Balanites aegyptiaca* et *Hyphaene thebaica*

La détermination de la quantité des résidus du *Balanites aegyptiaca* a été rendu 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 a espèces dominantes et 5pieds/ha pour les zones à espèces compagne. Pour l'espèce *Hyphaene thebaica*, les données d'inventaire du Goulbi N'kaba rapportées plus haut dans la synthèse bibliographique ont été utiles à l'évaluation du potentiel, notamment la densité moyenne de 8pieds/ha. En ce sens, il sera considéré une densité de 8pieds/ha dans les zones ou l'espèce est

dominante et 4pieds/ha dans les zones où l'espèce est accompagnatrice. L'estimation du potentiel de ces espèces est résumée dans les tableaux 3.8 et 3.9

**Tableau 3.8: estimation du potentiel de *Hyphaene thebaica***

Zone	Coordonnées	Hyphaene	Superficie	Source	Densité	Potentiel
Dallol Bosso (Falmey, la série de Fandou)	14°27'86''	Espèce compagne	750000	Harou Moussa (2013) ;	6	4500000
Kouringuel	(13°22'19''E et 2°54'36''N).	Espèce compagne		Laoualy Ada et Ali Mahamane (1999) ;		
				Seybou (1993)		
Zinder Formations mixtes, vallée de Gassafa –Bouné - Katgeri	nd <sup>1</sup>	Espèce dominante	174150 ha	Laoualy Ada et Ali Mahamane (1999)	8	1393200
Formations de bas-fonds à <i>Hyphaene thebaica</i> et Borassus (Zinder)	nd	Espèce dominante	50625 ha		8	405000
Niamey, Tillabéry, Dogondoutchi, Bouza, Madaoua, Tahoua	nd	Espèce compagne	nd		4	-
Bangui, Guidan Rounji, Dakoro, Tessaoua, Gazaoua, Aguié, Matameye, Zinder.	nd	Espèce compagne	nd		4	-
N'Guigmi, Mainé-Soroa, Tasker, Gouré, Kao-Tchouloum	nd	Espèce compagne	nd		4	2316600
Goulbin Kaba (Maradi)	longitudes 7° 13' & 7°57' et latitudes 13 ° 46' & 13 °49'	Espèce dominante	289575 ha	Duhem C. (2003)	8	276424
Mainé-Soroa	nd	Espèce dominante	34553	Laminou M. O et al (2016)	8	-
<b>Nombre potentiel d'espèces</b>						<b>4391224</b>

<sup>1</sup> non défini

Tableau 3.9: estimation du potentiel de *Balanites aegyptiaca*

Zone	Coordonnées	Balanites	Superficie	Source	Densité	Potentiel
Dallol Bosso (Falmey, la série de Fandou)	14°27'86''	Espèce dominante	750000	Harou Moussa (2013) ; Laoualy Ada et Ali Mahamane (1999)	10	-
Kogori	(13°41'46''E et 2°54'18''N)	Espèce compagne			5	-
Kouringuel	(13°22'19''E et 2°54'36''N).	Espèce compagne			5	-
Birni N'Gaouré	nd	Espèce compagne			5	-
Réserve de Gadabédji	nd	Espèce dominante	76000 ha	Laoualy Ada et Ali Mahamane (1999)	10	760000
Zinder Formations de bas-fonds Takaya, Tanout...	nd	Espèce dominante	19726 ha		10	197260
Koran Addoua, Dakoro	nd	Espèce dominante		Centre d'échange d'information sur la biodiversité du Niger	10	-
Toukounous (Tillabéry)	nd	Espèce compagne		S. Ousseina et al (2015)	31pieds/ha	-
<b>Nombre potentiel d'espèces</b>						<b>957260</b>

Tableau 3.10 : Quantités brute de résidus de fruit générées par les espèces forestières, en tonne

	Résidus	Ratio	Production moyenne en fruit (kt)	Production moyenne en résidus (kt)
Balanites aegyptiaca	Endocarpe	0,5	119,6	59,8
Hyphaene thebaica	Mésocarpe + endocarpe	0,4	219,5	87,8

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 fruit de *Balanites aegyptiaca* est limitée par la raréfaction 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 et vendu dans des sacs, comme combustible 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 disponibles pour la bioénergie seraient de 23.547,8 tonnes de résidus, voir tableau 3.10.

**Tableau 3.11 : Quantités de résidus de fruit d'espèces forestières (F2), potentiellement mobilisable, en tonne**

	Résidus	Ratio	Pourcentage collectable	Quantité de résidus potentiel (tonne)
Balanites aegyptiaca	Endocarpe	0,4	10%	5982,8
Hyphaene thebaica	Mésocarpe + endocarpe	0,5	20%	17564,9

En somme, cette quantité mobilisable correspond à 15,95% du potentiel total brut.

### 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 3.7 et 3.8 et 3.9, on note qu'il est possible de produire en moyenne par an à partir de résidus agricoles, un potentiel énergétique estimé à 1.398,82 Mtep équivalant à 16.257,89 TWh ; et un potentiel énergétique à partir des résidus de fruit d'espèces forestières de 90,07 Mtep soit 1.047,06 TWh. 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 3.12: Evaluation du potentiel énergétique de résidus agricole*

Produit	Types de déchets	Quantité disponible (tonne/an)	PCI (kcal/kg)	Potentiel énergétique par an (Mtep)	Potentiel énergétique par an (TWh)
Mil	Epis	250,9	3500	800,75	9308,70
Sorgho	Epis	102,8	3500	328,23	3815,72
Riz	Balles	2296,2	2500	0,52	60,85
Maïs	Raffles	3765,2	3500	12,02	139,70
Arachide	Coque	52153,8	4417	210,06	2442,00
Canne à sucre	Bagasse	11010,6	4206	42,23	490,92

*Tableau 3.13: Évaluation du potentiel énergétique des résidus de fruit des espèces forestières.*

Espèce	Types de déchets	Quantité disponible (tonne/an)	PCI (kcal/kg)	Potentiel énergétique par an (Mtep)	Potentiel énergétique par an (TWh)
<b>Hyphaene t.</b>	Mésocarpe + endo.	17564,9	4258,98	68,22	793,02
<b>Balanites ae.</b>	Endocarpe	5982,8	4005,64	21,85	254,05

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

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 4.064,47 TWh pour les résidus agricoles, et un potentiel de 261,77 TWh pour les résidus de fruit des deux espèces forestières.

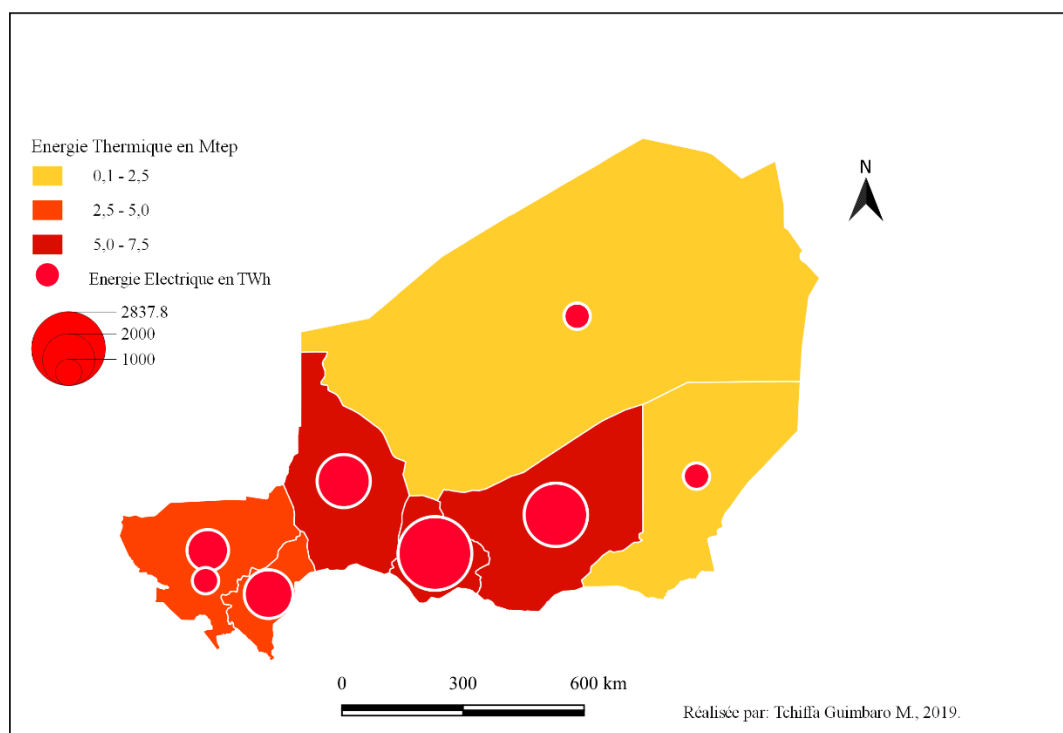


Figure 3.5: Potentiel en électricité et en chaleur des résidus agricoles mobilisables par an

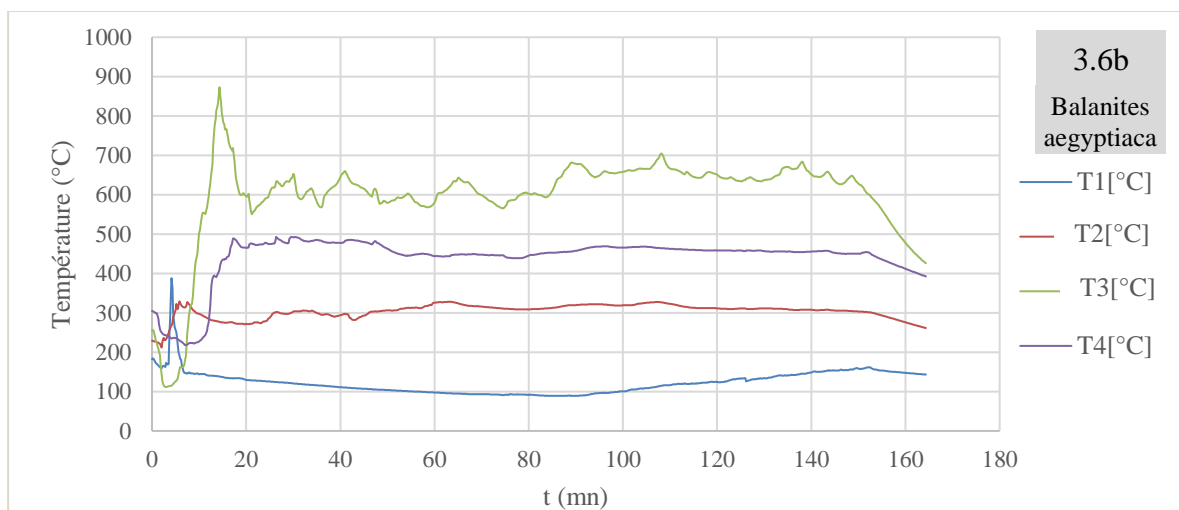
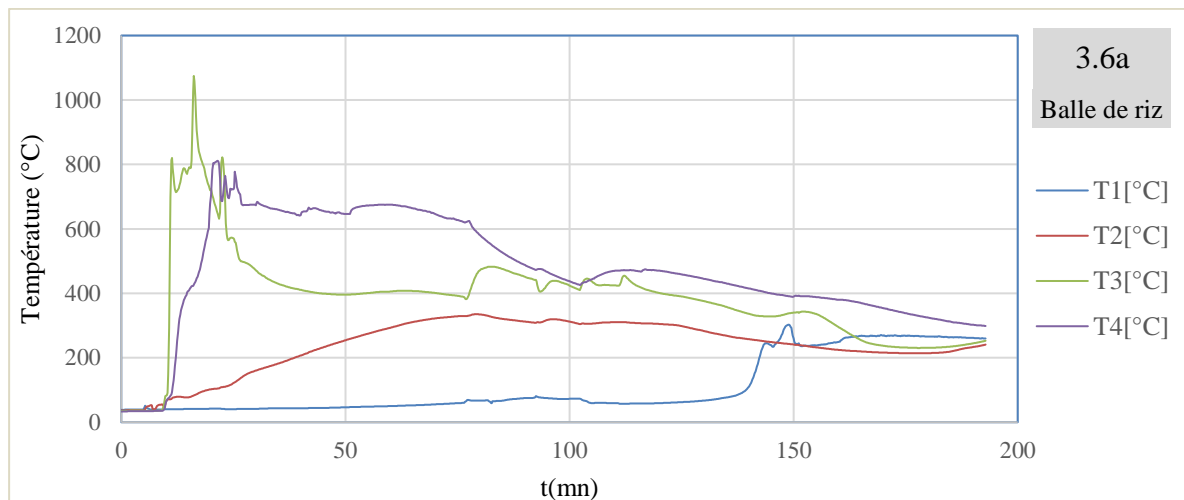
La figure 3.5 montre que le potentiel en chaleur des résidus agricoles est fortement concentré dans les régions de Tahoua Maradi et Zinder. Ces régions rassemblent à elles seules plus de 65% du potentiel récupérable, c'est la région de Maradi qui possède le plus fort taux avec près de 3Gtep d'énergie thermique.

### 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 décortiquage de Kirkissoye à Niamey. Celles des coques de *Balanites aegyptiaca* utilisées ont été constituées d'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.





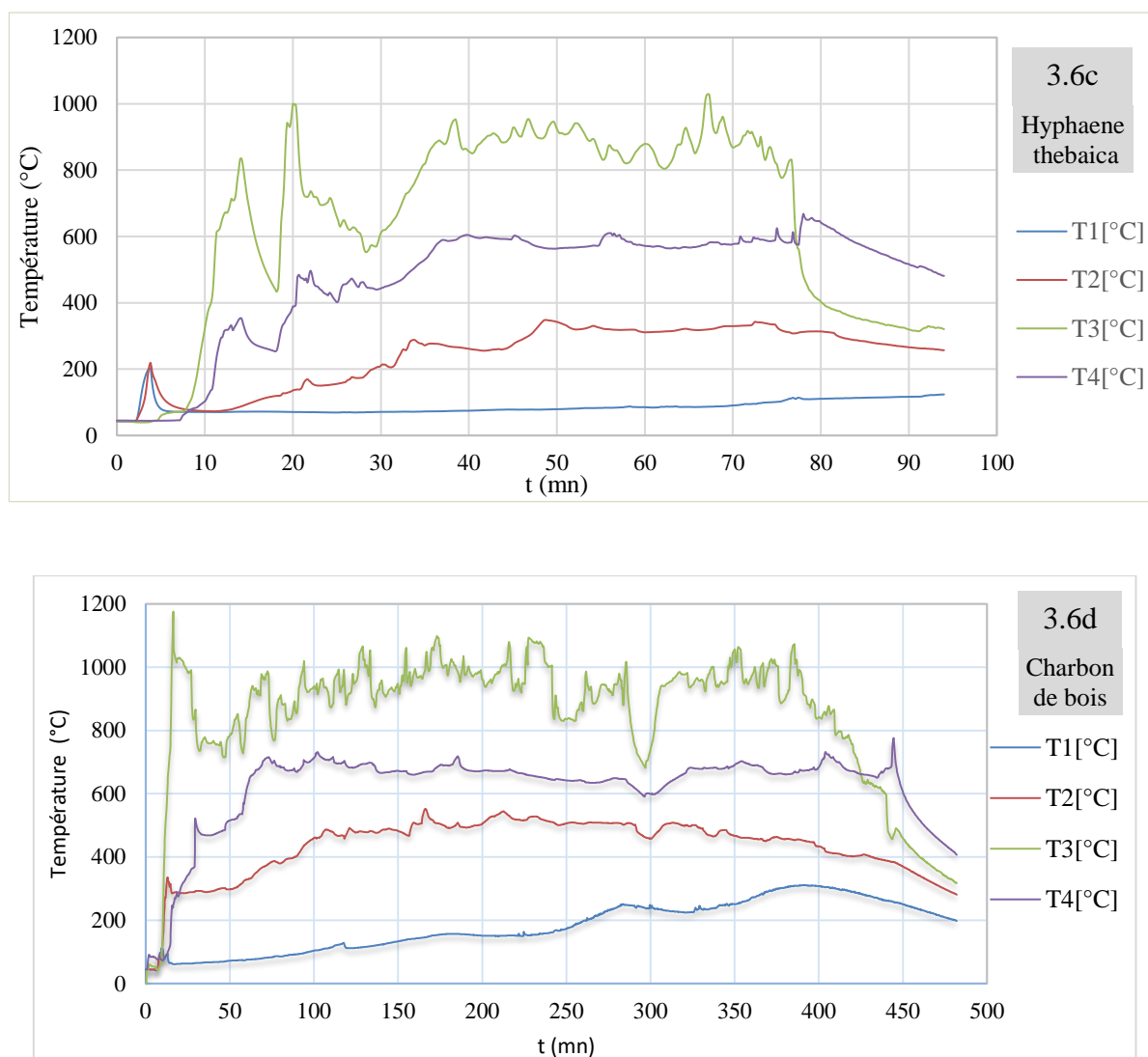


Figure 3.6: Profils de températures du réacteur

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 3.6a), celle-ci décroît fortement une courte durée après la fermeture de la partie alimentation. A  $t=22\text{mn}$  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  $t=25\text{mn}$  a fait croître la température T3 avant de rechuter quelques minutes plus tard. A  $t=83\text{mn}$  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 manœuvrée plusieurs fois. Du charbon de bois incandescent fut injecté dans la partie haute à  $t=98\text{mn}$ . 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  $t=20\text{mn}$ , 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 M. Temmerman *et al* (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  $t=15\text{mn}$ , le relevé des températures (figure 3.6b), indique  $T1=137,9^{\circ}\text{C}$  ;  $T2=275,3^{\circ}\text{C}$  ;  $T3=854,1^{\circ}\text{C}$  ;  $T4=420,9$ , en ce moment précis, les gaz étaient suffisamment combustibles au niveau de la torchère, accompagné d'une stabilisation des flammes qui s'est étalée jusqu'à  $t=80\text{mn}$ , soit un temps d'activité 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  $550^{\circ}\text{C}$  à  $700^{\circ}\text{C}$ , tandis que celle de la zone de réduction T4 était relativement constante. Le temps de stabilisation sans interruption est de  $1\text{h}05\text{mn}$ , sur une durée globale de test de  $2\text{h}29\text{mn}$ . 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  $1000^{\circ}\text{C}$  associé au dépôt constaté pourrait induire que le craquage des goudrons n'a pas été effective, ce qui pourrait impacter sur 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, contrairement aux tests effectués sur les résidus humides. Les premières flammes ont été constatées à  $t=12\text{mn}$  (figure 3.6c), 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 45 minutes d'activités. La production du gaz s'est arrêtée brusquement, contrairement au test de *Balanites aegyptiaca* et

du charbon de bois qui leurs fins se traduit par des interruptions répétitives, marquées par des très courtes durées d'activité des flammes, d'environ 10 secondes la plupart des temps. 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 5 minutes tandis que la température T4 augmente rapidement en passant de 575°C à 657°C en 1 minute 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 pourra 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  $T3=1026,8^\circ\text{C}$ .

Après le chargement complet du gazogène, les flammes ont été observées (figure 3.6d), au bout du temps  $t=49\text{mn}$  pendant que les températures  $T1=71^\circ\text{C}$ ,  $T2=297^\circ\text{C}$ ,  $T3=780,5^\circ\text{C}$ ,  $T4=511^\circ\text{C}$ . Les flammes se sont stabilisées sur la période de  $t=63\text{mn}$  à  $t=184\text{mn}$ , soit une durée d'activité de 121mn sans extinction. Retenons que les températures enregistrées au début de la stabilisation étaient de  $T1=76^\circ\text{C}$ ,  $T2=333^\circ\text{C}$ ,  $T3=936^\circ\text{C}$ ,  $T4=657^\circ\text{C}$ . 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 : 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 leurs activités 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 a 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 enregistré au cours de cet essai ont été bénéfique 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 combustible, dont un résultat similaire a été obtenu par Harouna (2014) pour le cas du charbon des tiges du cotonnier,

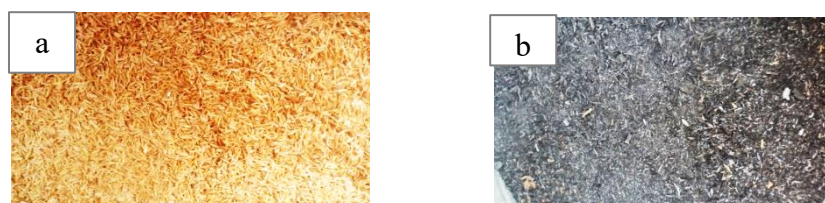
se justifie par la faible consommation moyenne de 1.7kg/h (tableau 3.11). Le taux de cendre recueillis qui est de 11,8 %, démontre l'efficacité du processus de conversion.

Le tableau ci-dessous présente la moyenne des trois tests de gazéification effectués sur chacune des biomasses.

*Tableau 3.14: Récapitulatif du test de gazéification de la balle de riz*

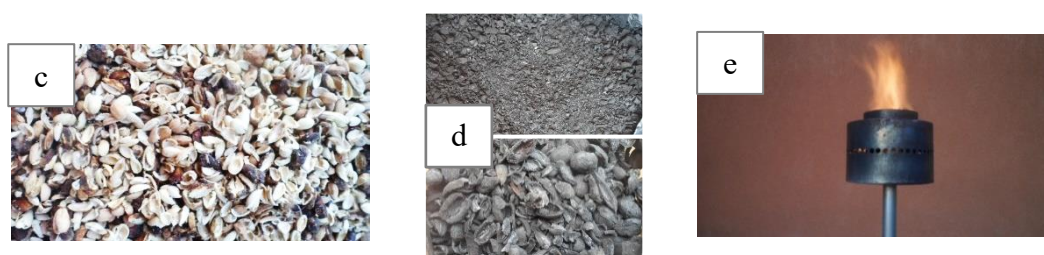
	<b>Masse du combustible (kg)</b>	<b>Consommation moyenne (kg/h)</b>	<b>Durée totale de l'essai (mn)</b>	<b>Durée de stabilisation des flammes (mn)</b>	<b>Proportion des cendres (%)</b>
Balle de riz	3,95	1,83	129	-	49,13
Balanites aegyptiaca	17,9	7,21	149	45	9,77
Palmier doum	9,5	7,14	80	45	61,84
Charbon de bois	12,20	1,72	425	194	11,8

Les figures ci-dessous présentes les échantillons utilisés, les flammes ainsi que les résidus après gazéification.



*Figure 3.7: (a) échantillon de la balle de riz,*

*(b) résidus de cendre après gazéification*



*Figure 3.8: (c) échantillon de coque de Balanites aegyptiaca,*

*(d) cendre et charbon résiduel (imbrulés) après gazéification*

*(e) flammes produites lors du test*



Figure 3.9: (f) échantillon de coque de *Balanites aegyptiaca*,  
(g) résidus de cendre après gazéification  
(h) flammes produites lors du test

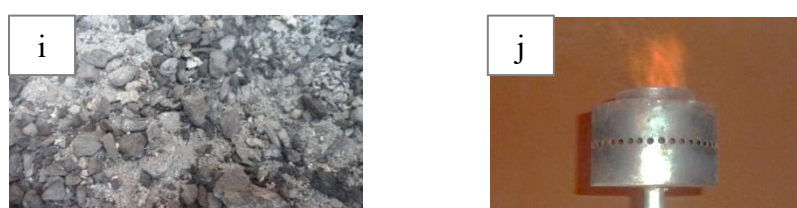


Figure 3.10: (i) résidus de cendre après cendre après gazéification,  
(j) flamme produite lors de l'essai

### III.5 Résultats de l'analyse immédiate

Les résultats de cette analyse sont importants pour les la compréhension des propriétés et contenu énergétique de la biomasse. Le tableau 3.14 présente les résultats pour les biomasses gazéifiées.

Tableau 3.15: Analyse immédiate des échantillons du charbon de bois

	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
Palmier doum	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 supérieurs 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 approximatifs 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 3.16 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 faible comparé 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 particuliers 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 la mise en œuvre d'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 des résidus agricoles et ceux 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 agricole. L'évaluation du potentiel de résidus des produits forestiers a été possible grâce aux résultats d'inventaires recueillis dans la littérature et à l'aide d'hypothèses là où les données sont manquantes. Cela a permis de sélectionner les ressources pertinentes au procédé de valorisation thermochimique.

Au préalable, plusieurs **paramètre devrait être prise** en compte dans l'évaluation du potentiel, afin de ne pas favoriser la bioénergie au détriment des usages utiles faites 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 des résidus agricoles reparti respectivement dans les zones de forte production de types de produit agricole. Il ressort que l'utilisation de 0.04% du potentielle totale **brut** des résidus de récolte et l'utilisation de 10,6% du potentiel total brut des résidus forestiers, permettrait respectivement de mobiliser près d'un demi-million de tonnes des résidus agricoles par an, et plus de 5 kilotonnes de résidus des produit forestiers, soit respectivement un potentiel électrique de plus de 4.000 TWh, et 115 TWh en moyenne par an. 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.

Les essais de gazéification présentées dans cette étude ont été réalisées à l'aide d'un gazogène a co-courant à lit fixe. Les échantillons de la balle de riz, des coques du fruit de deux espèces forestières (*Balanites aegyptiaca* et *Hyphaene thebaica*), ainsi que des échantillons du charbon de bois, ont été gazéifiées et caractérisées. 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 physicochimiques. La technique de gazéification d'un point de vu des technologies disponibles, rendent 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. Au-delà de ce travail, des recherches doivent



s'étendre conjointement entre l'évaluation du potentiel, les tests de gazéification ainsi que l'étude de la qualité des gaz produits. Des études technico-économiques sont également nécessaires. Par ailleurs, l'usage des résidus des produits forestiers ne devrait pas être une contrainte écologique mais un avantage certain pour favoriser la plantation et le développement de ces espèces, sources de multiple avantage socioéconomique pour la population.

En somme l'étude d'évaluation du potentielle à montrer l'existence d'un potentiel valorisable grâce aux données disponibles. Il ressort que l'opportunité qu'offre ses ressources, en plus d'être une source d'énergie renouvelable permet d'éliminer les volumes accumulés de ces déchets et constitue une source d'approvisionnement en énergie moderne, dans les zones rurales, tant qu'ils n'entrent pas en compétition avec d'autres utilisations. Les essais 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 indispensables tel que les institutions de recherches et étatiques sont nécessaires.

## **Perspectives et recommandations**

A l'issu de ce travail qui est loin d'être exhaustif, nous formulons des perspectives et recommandations ci-après.

Comme perspectives, 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.

Nous recommandons des améliorations sur le gazogène de l'étude afin d'accroître ses performances

- Prévoir sur le gazogène, un système d'alimentation en continue.
- Prévoir un diamètre plus grand de la tuyauterie d'échappement des gaz
- Faire une extension du système d'agitation à l'intérieur du réacteur
- Renforcer l'étanchéité du gazogène afin de limiter les pertes.
- Etudier la qualité du gaz, notamment le taux de goudrons

## 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/>, visité le 18/10/2019.
- AIE, Tracking SDG7: "The Energy Progress Report", <http://trackingSDG7gtf.esmap.org>. Publié le 22 mai 2019.
- Amir S., "Etat des lieux de la riziculture au Niger", Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture. Novembre 2011.
- Anne Moreau, K. Sokona, C. Broutin, "Mise au point d'un concasseur à noix de *Balanites aegyptiaca*", InterDev agroalimentaire. 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.
- Boittin I., "Fiche *Balanites* - *Balanites aegyptiaca* -Description, utilisations, acteur, commercialisation", Rongead. 2014, [https://www.nitidae.org/files/5b7cc2e6/balanites\\_aegyptiaca\\_16.09.pdf](https://www.nitidae.org/files/5b7cc2e6/balanites_aegyptiaca_16.09.pdf), Visité le 5/10/2019.
- 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.
- 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) 203–213. 2011.
- 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., Ptasinski 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>

- 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. 2014.
- FONABES, "Schéma Directeur d'Approvisionnement en Combustibles Domestiques de Niamey", République du Niger Ministère de l'Environnement, CIRAD, 2017.
- 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.
- 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>, visité 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 ", ARES, Colloque scientifique international sur la préservation et l'utilisation durables des systèmes oasiens, Université Abdou Moumouni – Université de Liège – Université Catholique de Louvain 28 et 29 septembre 2016.2016.
- Laoualy Ada, Ali Mahamane, "Les ressources forestières naturelles et les plantations forestières au Niger", Programme de partenariat CE-FAO. Août 1999.
- 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](https://www.un.org/sustainabledevelopment/fr/wp-content/uploads/sites/4/2016/10/Why_it_matters_Goal_7_French.pdf), visité 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.
- PAFN, Direction de l'environnement, République du Niger, "Plan d'aménagement de la doumaïraie 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", *Guide Biomasse Energie*, 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, Avril 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), 2015.
- 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.
- 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. <<http://www.prota4u.org/search.asp>>. Visité 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](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

		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%	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:	%	0.10%	0.00%	0.10%	0.00%
	t	6,690	0	2,742	0
Total actuellement utilisé	(%)	44%	0%	81%	0%
	(t/an)	2,923,746.75	0.00	2,213,187.82	0.00

Potentiellement disponibles pour la bioénergie

	Millet -	Millet -	Sorgho -	Sorgho -
Total (t/an)	200,715	1,254,468	2,742	514,217
Zone totale de production (ha)	6,953,332	6,953,332	3,510,609	3,510,609
Rendement de résidus (t/ha)	0.03	0.18	0.00	0.15
Lieu de la production de résidus	recueillies sur le terrain	recueillies sur le terrain	recueillies sur le terrain	recueillies sur le terrain

Les Résidus de Cultures Disponibles pour la Bioénergie

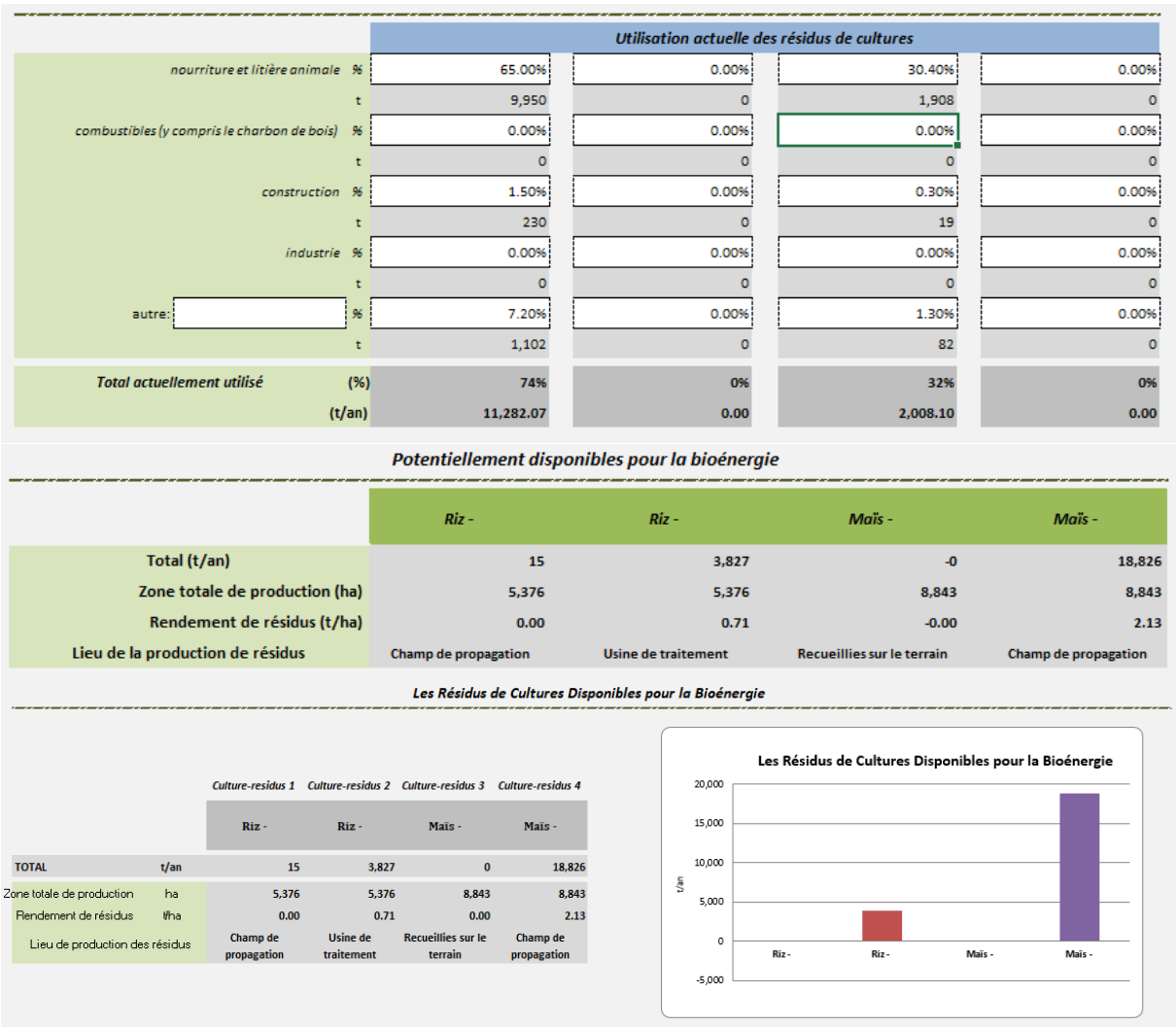
	Culture-résidu 1	Culture-résidu 2	Culture-résidu 3	Culture-résidu 4	
	Millet -	Millet -	Sorgho -	Sorgho -	
TOTAL	t/an	200,715	1,254,468	2,742	514,217
Zone totale de production	ha	6,953,332	6,953,332	3,510,609	3,510,609
Rendement de résidus	t/ha	0.03	0.18	0.00	0.15
Lieu de production des résidus		Recueillies sur le terrain	Recueillies sur le terrain	Recueillies sur le terrain	Recueillies sur le terrain

Les Résidus de Cultures Disponibles pour la Bioénergie

Culture-résidu	Quantité (t/an)
Millet -	200,715
Millet -	1,254,468
Sorgho -	2,742
Sorgho -	514,217

Annexe 2

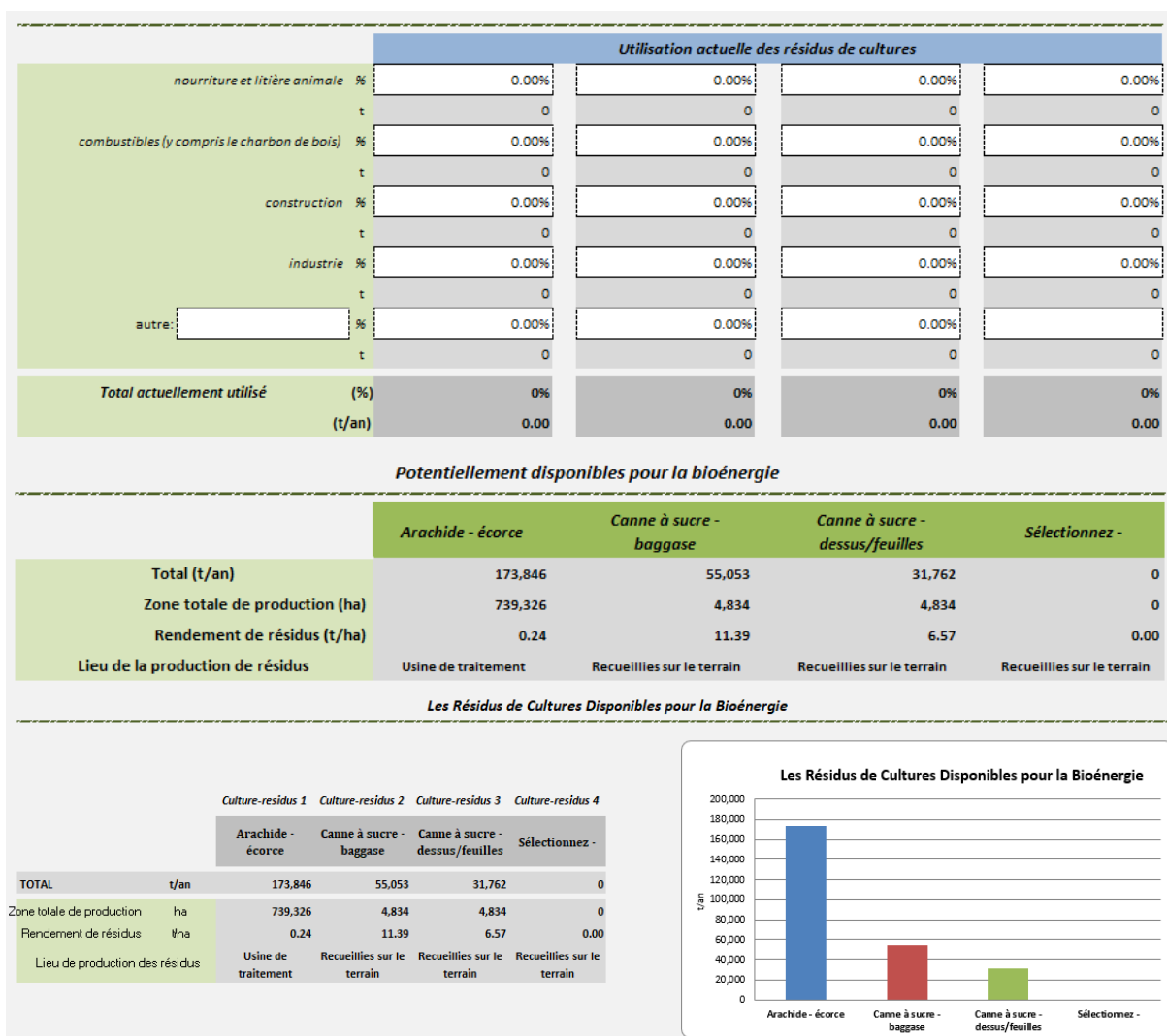
Estimation de la quantité des paille et balles de riz, et tiges et rafle de maïs





## Annexe 3

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



## Annexe 4

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

Région	Agadez	Diffa	Dosso	Maradi	Niamey	Tahoua	Tillabéry	Zinder
MW El	22877209.8	160975332	1879522598	2837798349	40113602.1	2043556938	1611655853	2440376393
MW Th	702832.865	4945478.7	57742629.7	87182745	1232368.73	62782087.2	49513236.7	74973161.1
%	0.2	1.5	17	25.7	0.4	18.5	14.6	22.1

### 2. 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		
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)