

REPUBLIQUE DU NIGER  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR,  
DE LA RECHERCHE ET DE L'INNOVATION  
UNIVERSITE DAN DICKO DANKOULODO DE  
MARADI (UDDM)



**Faculté des Sciences et Techniques**

*DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE*

**MÉMOIRE**

PRÉSENTÉ COMME EXIGENCE PARTIELLE POUR L'OBTENTION DE MASTER

**Spécialité : Système Énergétique Durable pour Société en Développement  
(2SED)**

**Thème : Etude des rendements massiques et énergétiques d'un  
carbonisateur des résidus d'agroforesterie.**

Présenté par :

**DOULLA SEYDOU Nouhou**

Encadré par :

Dr. HAROUNA GADO Ibrahim,  
Maître-assistant, UDDM/Niger

Supervisé par :

Pr. MAKINTA Boukar,  
Maître de Conférences UAM/Niger

Soutenu publiquement le 13/10/2020 devant le jury composé de :

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

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

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

*Année Académique 2019-2020*

## **DEDICACES**

Je dédie ce travail à mes chers parents qui n'ont ménagé aucun effort pour me mettre sur le droit chemin et pour m'avoir toujours soutenu dans mes études.

## **REMERCIEMENTS**

De prime abord, je rends grâce à ALLAH pour avoir guidé mes pas depuis ma naissance et m'avoir donné les dispositions physiques, mentales, intellectuelles et morales qui m'ont permis de réaliser ce travail.

Je remercie mon encadreur de mémoire de Master Dr HAROUNA GADO Ibrahim, enseignant chercheur à l'Université Dan Dicko Dankoulodo de Maradi pour avoir accepté de m'encadrer. Je lui suis reconnaissant pour ses conseils, sa disponibilité et son soutien sans cesse manifesté malgré ses multiples occupations.

Je remercie le superviseur Pr Makinta BOUKAR pour l'honneur d'accepter l'évaluation de ce travail, et pour l'intérêt qu'il a accordé à la présente soutenance.

Je tiens à remercier chaleureusement le président et examinateur du jury Pr Dungall LAOULI d'avoir accepté de juger mon travail.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à Dr ISSOUFOU Amadou, responsable du laboratoire des sciences et technologie alimentaire de l'Université Dan Dicko Dankoulodo de Maradi pour m'avoir accueilli et permis d'effectuer mes analyses au sein du laboratoire. Qu'il trouve ici le témoignage de ma respectueuse gratitude.

Je remercie également maître ADAMOU Salou, notaire à Maradi pour son soutien et ses conseils tout au long de mon cursus universitaire, le Directeur de l'usine de riz du Niger de Kirkissoye (Niamey) pour la balle de riz qu'il nous a fourni. Nos remerciements vont aussi à Mr BALARABE Mahamane Issa enseignant technologue à l'IUT de Maradi, Mr DJIBO Mahamadou et Mr ADAMOU Baguiri Salihou étudiants en chaudronnerie au département de Génie Mécanique pour la conception et la réalisation de notre dispositif, le projet CowpeaSquare pour nous avoir permis d'effectuer nos recherches dans leur local. Mes remerciements s'adressent également à tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à l'élaboration de ce mémoire de fin de cycle.

Je ne saurais terminer sans remercier tout le corps professoral de l'Université Dan Dicko Dankoulodo de Maradi en général et en particulier ceux du département de physique.

Et enfin je remercie mes camarades de promotion pour les moments agréables et chaleureux partagés avec eux.

*Merci à tous*

## RESUME

La valorisation énergétique des déchets des industries de transformation des produits agricoles est non seulement une solution aux problématiques de leur gestion, mais aussi une production d'énergie. De plus, elle contribue à la diminution de la déforestation. La présente étude a pour objectif de développer une méthode de carbonisation des résidus d'agroforesterie. Les résidus utilisés sont constitués de la coque du palmier doum (*hyphaene thébaïca*) et de la balle de riz. La carbonisation est à combustion partielle, et le dispositif utilisé est un four métallique constitué de trois (3) étages. Les pics des températures, les rendements massiques, et énergétiques ainsi que la qualité du charbon (taux de carbone fixe) ont été déterminés à chaque étage du carbonisateur. Les rendements massiques obtenus pour la coque du palmier doum pour les étages 3, 2 et 1 sont respectivement 66,41%, 42,60% et 21,57%. Pour la balle de riz, ils sont respectivement 46,94%, 67,19% et 24,83%. Les rendements énergétiques pour la coque du palmier doum sont respectivement 82,41%, 57,05% et 30,97%. Pour la balle de riz, ils sont respectivement 56,1%, 74,58% et 26,66%. La qualité du charbon (taux de carbone fixe) est de 35,32%, 44,42% et 52,32% pour la coque du palmier doum. Pour la balle de riz, les taux de carbone fixe sont respectivement de 32,55%, 30,43% et 30,75%. La durée du cycle est de 9,03h pour la coque du palmier doum contre 11,22h pour la balle de riz. Cette étude montre que la coque du palmier doum produit un charbon de meilleure qualité par rapport à la balle de riz, et que le charbon obtenu au niveau de son étage 1 ( $E_1$ ) peut être utilisé non seulement pour la gazéification mais aussi pour l'usage domestique.

**Mots clés :** Balle de riz, Charbon, Carbonisation, Coque du palmier doum, *Hyphaene thébaïca*.

## **ABSTRACT**

The energy recovery of waste from agricultural product processing industries is not only a solution to their management issues, but also energy production. In addition, it contributes to the reduction of deforestation. The objective of this study is to develop a method of carbonization of agroforestry residues. The residues used consist of the shell of the doum palm (*hyphaene thébaïca*) and the rice husk. Carbonization is partial combustion, and the device used is a metal furnace made up of three (3) stages. The peaks of temperatures, mass and energy yields as well as the quality of the coal (fixed carbon rate) were determined at each stage of the carbonizer. The mass yields obtained for the shell of the doum palm for stages 3, 2 and 1 are respectively 66.41%, 42.60% and 21.57%. For rice husk, they are 46.94% respectively 67.19% and 24.83%. The energy yields for the shell of the doum palm are 82.41% respectively 57.05% and 30.97%. For rice husk, they are respectively 56.1%, 74.58% and 26.66%. The quality of the coal (fixed carbon rate) is 35.32%, 44.42% and 52.32% for the shell of the doum palm. For rice husk, the fixed carbon rates are respectively 32.55%, 30.43% and 30.75%. The cycle duration is 9.03h for the shell of the doum palm tree against 11.22h for the rice husk. This study shows that the shell of the doum palm produces a better quality charcoal compared to the rice husk, and that the charcoal obtained at its stage 1 (E\_1) can be used not only for gasification but also for carbonation. Domestic use.

**Key words:** Rice husk, Coal, Carbonization, Doum palm shell, *Hyphaene thébaïca*.

## SOMMAIRE

DEDICACES .....	I
REMERCIEMENTS .....	II
RESUME.....	III
ABSTRACT .....	IV
Liste des abréviations .....	VII
Liste des figures .....	IX
Liste des tableaux .....	X
Introduction générale.....	1
CHAPITRE I : Synthèse bibliographique .....	4
Introduction .....	5
I.1 Généralités sur la biomasse.....	5
I.1.1 Définition .....	5
I.1.2 Résidus agricoles .....	5
I.1.3 Conversion de la biomasse par voie thermochimique .....	6
I.1.3.1 Pyrolyse.....	6
I.1.3.2 Gazéification .....	7
I.1.3.3 Combustion .....	8
I.1.3.4 La carbonisation.....	8
I.1.3.4.1 Définition .....	8
I.1.3.4.2 Procédés de carbonisation.....	8
I.1.3.4.3 Les différents types des carbonisateurs.....	9
I.1.3.4.4 Paramètres influençant la carbonisation .....	10
I.1.3.4.5 Les caractéristiques de base du charbon .....	12
I.1.3.5 La torréfaction.....	12
I.1.3.6 Différences entre carbonisation et torréfaction.....	13
Conclusion :.....	14
CHAPITRE II : Matériels et méthodes .....	15
Introduction .....	16
II.1 Matériels .....	16
II.1.1 Carbonisateur métallique .....	16
II.1.2 Balance .....	17
II.1.3 Acquisition des températures.....	18
II.1.4 L'analyse immédiate.....	18
II. 2 Méthodes .....	18

II.2.1 Préparation des matières premières .....	18
II.2.2 Détermination de la capacité du carbonisateur .....	19
II.2.3 Protocole de Carbonisation.....	19
II.2.4 Mesures effectuées .....	20
II.2.3.1 Méthode de la détermination des durées des étages considérées .....	21
II.2.3.2 La température maximale du cycle.....	21
II.2.3.3 L'analyse immédiate.....	22
II.2.3.4 Pouvoir calorifique supérieur (PCS).....	23
II.2.4 Rendement massique ( $\eta_m$ ) .....	23
II.2.5 Rendement énergétique ( $\eta_e$ ) .....	24
Conclusion.....	24
CHAPITRE III : Résultats et discussions .....	25
Introduction .....	26
III.1 Capacité du carbonisateur .....	26
III.2 Présentation des résultats et analyses .....	26
III.2.1 Champs de température .....	26
III.2.2. Durées des différentes phases de la carbonisation .....	29
III.2.3 Analyse immédiate et rendements.....	30
Conclusion.....	36
Conclusion générale .....	37
Bibliographie.....	39
Annexes .....	42
Annexe A : Figures des étapes de la carbonisation .....	43
Annexe B : Conception du carbonisateur.....	46

## Liste des abréviations

AFD : Agence Française de Développement.

BAD : Banque Africaine de Développement.

C : Taux de cendre (%).

CF : Carbone fixe (%).

DC : Durée du cycle (heure).

$E_{AS1}$  : Entrée d'air secondaire sur l'étage 1.

$E_{AS2}$  : Entrée d'air secondaire sur l'étage 2.

$E_{AP}$  : Entrée d'air primaire.

$E_1$  : Etage n°1

$E_2$  : Etage n°2

$E_3$  : Etage n°3

FAO: Organisation des nations unies pour l'agriculture et l'alimentation.

h : Humidité sur base sèche (%).

H : Humidité sur base humide (%).

IEA : Agence internationale de l'énergie.

IUT : Institut Universitaire de Technologie.

MV : Taux de matière volatile (%).

PCS : Pouvoir calorifique supérieure (MJ/kg).

$T_{FEAP}$  : Durée de fermeture des entrées d'air primaires (minute).

$T_{FEAS1}$  : Durée de fermeture des entrées d'air secondaires 1 (minute).

$T_{FEAS2}$  : Durée de fermeture des entrées d'air secondaires 2 (minute).

$T_R$  : Durée de refroidissement (minute).

$T_{rem}$  : Durée de remplissage (minute).

$T_{rc}$  : Durée de réaction (minute).

$T_1$  : Température de l'étage n°1 (°C).

$T_2$  : Température de l'étage n°2 (°C).

$T_3$  : Température de l'étage n°3 (°C).

$\eta_e$  : Rendement énergétique (%).

$\eta_m$  : Rendement massique sur base humide (%).

## Liste des figures

Figure 1 : Schéma de la gazéification.....	7
Figure 2 : Carbonisateur de l'étude.....	16
Figure 3 : Carbonisateur avec acquiseur.....	17
Figure 4 : (a) Palmier doum brut ; (b) Balle de riz brute. ....	19
Figure 5: Courbe des températures pour la carbonisation : (a) Coque du palmier doum ; (b) Balle de riz.....	27
Figure 6 : Charbons obtenus pour la balle de riz respectivement pour le palmier doum (a, a') étage 1 ; (b, b') étage 2 ; (c, c') étage 3.....	33
Figure 7: Séchage du palmier doum.....	42
Figure 8: Allumage du charbon .....	42
Figure 9 : Combustion de la quantité initiale .....	42
Figure 10: Remplissage de l'étage n°3.....	42
Figure 11 : Mise en place de la grille de l'étage n°2.....	43
Figure 12 : Etanchéité en utilisant l'eau.....	43
Figure 13 : Fermeture des entrées d'air .....	43
Figure 14 : Déchargement de l'étage n°3.....	43
Figure 15: Déchargement de l'étage n°2 .....	44
Figure 16: Déchargement de l'étage n°1.....	44
Figure 17: Charbon obtenu à base des coques de l'hyphaene thebaica.....	44
Figure 18: Fermeture.....	45
Figure 19: Grille.....	45
Figure 20: Fût.....	46
Figure 21: Cheminée.....	46
Figure 22: Fourneau.....	46
Figure 23: Carbonisateur (Assemblage) .....	47

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Comparaison des différents procédés de carbonisation.....	9
Tableau 2 : Quelques données sur la torréfaction légère, moyenne et sévère de la biomasse.....	13
Tableau 3 : Comparaison de la biomasse carbonisée et torréfiée.....	14
Tableau 4 : Capacité du carbonisateur.....	26
Tableau 5 : Moyenne des pics de température obtenus lors des tests de carbonisation de la balle de riz et des coques du palmier doum pour chaque étage.....	29
Tableau 6 : Durée moyennes des phases de remplissage, du temps de fermeture des différentes entrées d'air, de combustion, de refroidissement, et du cycle de la carbonisation de la balle de riz et du palmier doum.....	29
Tableau 7 : Résultats de l'analyse immédiate et du PCS anhydre de la balle de riz et des coques du palmier doum brute comparé au bois.....	31
Tableau 8 : Résultats de l'analyse immédiate et du PCS du charbon de la balle de riz et des coques du palmier doum par étage et des valeurs moyennes.....	32
Tableau 9: Résultats des rendements massiques et énergétiques de la carbonisation de la balle de riz et de la coque du palmier doum par étage.....	32

# **Introduction générale**

A l'heure actuelle, le monde connaît une croissance démographique rapide. Cette croissance provoque une demande énergétique énorme car toute activité humaine consomme de l'énergie (transport, construction etc...). D'après Adamon (2017), les énergies fossiles que nous utilisons se font de plus en plus rares. D'autre part Harouna (2014) indique que leur coût est très élevé, et ont un impact négatif sur notre environnement. En effet ces énergies sont très polluantes et rejettent énormément de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, ce qui est en partie la cause du réchauffement climatique qui à son tour entraîne des catastrophes naturelles. Selon les études de Pana-BENIN (2008), l'impact du changement climatique est la source des inondations, de la baisse des rendements d'agriculture pluviale avec des lourdes conséquences en matière de sécurité alimentaire et de malnutrition. Pour lutter contre le réchauffement climatique et protéger l'environnement, il est plus que nécessaire de remplacer les énergies fossiles par les énergies nouvelles. En effet, de nombreuses formes d'énergies dites renouvelables ont été développées telles que le photovoltaïque, l'éolien, l'hydraulique, la conversion énergétique de la biomasse, ou encore la géothermie. La biomasse reste la première énergie renouvelable utilisée dans le monde (IEA, 2007). Elle est abondante et peut être utilisée pour le chauffage domestique, la production d'électricité ou de biocarburants (Benjamin, 2012). La biomasse présente de nombreux avantages tant au plan énergétique, qu'environnemental. Cependant selon les études de la (FAO, 2007), le bois énergie (bois de feu et charbon de bois) est la principale source d'énergie de chauffage et de cuisson en Afrique. Une étude de l'AFD & BAD (2009) indique que la consommation africaine en charbon de bois représente plus de la moitié de la production mondiale. Ces réserves en bois que nous utilisons sont en train d'être épuisées, et cela provoque la déforestation ; or l'utilisation de la filière de valorisation énergétique de la biomasse doit se faire sans aggraver le phénomène de la désertification. En effet les plantes jouent un rôle important dans la diminution du taux de dioxyde de carbone dans notre écosystème à travers la photosynthèse (Adamon, 2017), d'où la nécessité de valoriser les résidus d'agroforesteries. L'utilisation de la valorisation énergétique de la biomasse agricole présente un problème majeur lié à la non maîtrise du procédé provoquant ainsi une perte en masse et en énergie d'où la nécessité de diminuer ces pertes. Ce mémoire présente comme objectif d'une part de développer une méthode de carbonisation adaptée aux résidus d'agroforesteries, et d'autre part d'optimiser les rendements massiques et énergétiques de la carbonisation.

Le travail est structuré en trois (3) chapitres :

Le premier chapitre fait le point sur la valorisation de la biomasse en général et par la carbonisation en particulier. Dans ce chapitre, nous faisons un rappel sur les différents types de carbonisateurs et celui sélectionné pour conduire nos travaux. Le deuxième chapitre porte sur les matériels utilisés et les différentes méthodes de carbonisation. Et enfin, le troisième chapitre est consacré à la présentation et à l'analyse des différents résultats obtenus dans le cadre de la présente étude.

***CHAPITRE I : Synthèse bibliographique***

## **Introduction**

Ce chapitre qui présente un état de l'art du sujet traité dans ce mémoire est divisé en deux (2) parties. La première partie est consacrée aux généralités sur la biomasse. La deuxième partie traite de la carbonisation (le choix d'un carbonisateur, les procédés de carbonisation, les paramètres influençant sur la carbonisation...).

### **I.1 Généralités sur la biomasse**

#### **I.1.1 Définition**

La biomasse est l'ensemble des produits organiques végétaux et animaux utilisés à des fins énergétiques ou agronomiques. De manière générale, les végétaux convertissent dans leurs cellules de l'énergie solaire sous forme d'énergie chimique grâce à la photosynthèse. Le terme de biomasse recouvre un champ très large : bois, déchets des industries de transformation du bois, déchets agricoles (pailles, balle de riz, palmier doum, etc...), fraction des déchets ménagers et des industries agro-alimentaires, biogaz ou produits de méthanisation (Melle, 2008). Cependant, on distingue deux types de biomasses (Zellagui, 2016):

- La biomasse sèche ou lignocellulosique (le bois, la paille, les résidus verts, etc.) qui représente la source la plus abondante de notre planète. Elle contient un faible taux d'humidité et c'est la forme la plus utilisée pour la valorisation thermo-chimique.
- La biomasse humide (fumiers, boues d'épuration, etc.) qui ne peut pas être utilisée directement comme source d'énergie par des procédés thermo-chimiques à cause de sa faible teneur énergétique. Cependant, il existe des procédés biochimiques pour valoriser cette forme de biomasse.

La biomasse se compose essentiellement de cellulose, d'hémicellulose et de lignine (Zeïda, 2017).

#### **I.1.2 Résidus agricoles**

Les résidus agricoles choisis dans ce travail sont la balle de riz et la coque du palmier doum, ce choix pour un pays comme le Niger s'est fait en s'inspirant des travaux de plusieurs auteurs. Le palmier doum de son nom scientifique *hyphaene thebaica* est un fruitier spontané très abondant dans la vallée des palmiers doum de Goulbi N'kaba dans le département de Mayahi dont les fruits et les graines sont appréciés par les populations (Moussa, 1997).

Kemou (2017), également souligne un potentiel non négligeable du palmier doum dans les cuvettes de Mirriah et Guidimouni, dans les régions du fleuve, dans les cuvettes de Goudoumaria (Maïné), et dans les oasis de l'Air. En ce qui concerne la balle de riz, le riz est cultivé dans la vallée du fleuve Niger, dans les régions de Niamey, de Tillabéry et de Dosso (Amir, 2011).

Cependant, la carbonisation des résidus agricoles est confrontée à des multiples problèmes. En effet, les résidus agricoles sont indisponibles dans les zones urbaines, d'où la nécessité de les transporter jusqu'au niveau des zones urbaines, ce qui est un peu couteux, leur masse volumique faible produit un charbon friable, ce qui nécessite une densification. A cela s'ajoute le manque de maîtrise des procédés de carbonisation de ces derniers.

### **I.1.3 Conversion de la biomasse par voie thermochimique**

Il s'agit essentiellement de deux procédés de conversion de la biomasse au plan énergétique (Diedhiou, 2017):

- La voie biochimique : c'est une voie qui est plus basée sur la dégradation de la matière organique à partir d'une action microbienne et enzymatique. On distingue à cet effet, trois (3) procédés : la digestion anaérobique, la fermentation alcoolique et l'extraction d'huile végétale.
- La voie thermochimique : cette voie repose sur la combustion, la pyrolyse, la gazéification, la carbonisation et la torréfaction.

Notre étude s'intéresse à la voie thermochimique et par la carbonisation.

#### **I.1.3.1 Pyrolyse**

Elle peut être définie comme étant un processus de dégradation thermique en absence d'agent oxydant qui conduit à la formation de condensables (huiles et goudrons), de gaz ( $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$  et  $CH_4$ ) et résidus carbonés. Les caractéristiques et rendements de chacun de ces produits dépendent de nombreux paramètres expérimentaux (Alexandre, 2007). Selon les conditions de températures et de vitesses de chauffe, on peut parler de pyrolyse lente (température inférieure à  $600^{\circ}C$ ) qui vise l'obtention du charbon, et de pyrolyse rapide ou flash pour des températures supérieures à  $600^{\circ}C$  et qui aboutit à des gaz et de liquide (Benjamin, 2012).

## I.1.3.2 Gazéification

C'est une voie de valorisation énergétique thermochimique qui produit un combustible gazeux à partir d'un combustible solide. La gazéification regroupe quatre (4) étapes importantes à savoir : le séchage, la pyrolyse, l'oxydation et la réduction, représentée à la figure 1.

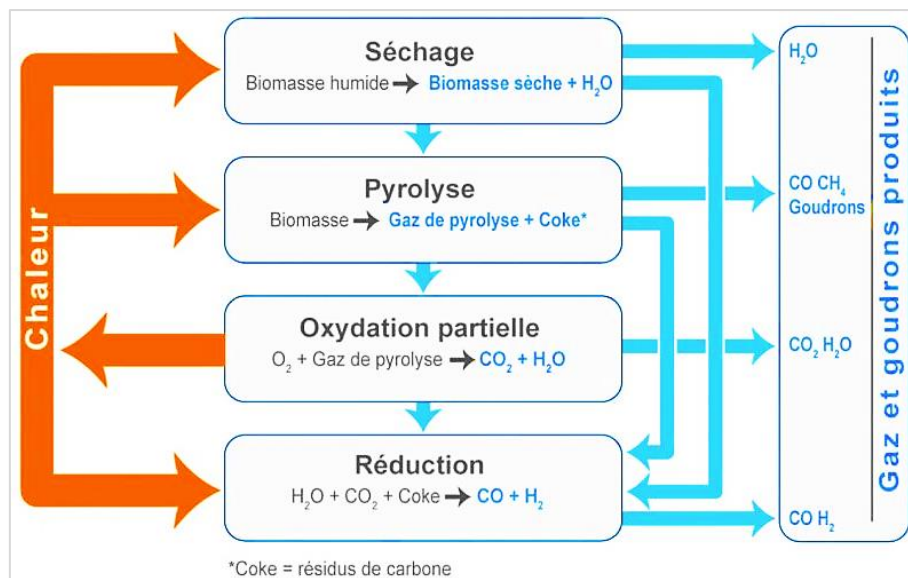


Figure 1: Schéma de la gazéification, (Zhu et Venderbosch, 2005).

-Le séchage : il consiste à éliminer l'eau dans le combustible sans décomposition chimique, et est observé pour des températures inférieures à 200°C. Un taux d'humidité sur brut ne dépassant pas 15% est nécessaire pour le processus de gazéification.

-La pyrolyse : une fois le combustible séché, il subit une dégradation sous l'effet de la chaleur dans un milieu pauvre en oxygène, ce qui provoque l'émission des matières volatiles et la formation d'un résidu solide (charbon). Les matières volatiles sont composées de gaz condensable et de gaz non condensable.

-L'oxydation : c'est une opération qui se déroule en présence d'un agent oxydant (air, eau, oxygène pur) et qui produit du gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) et de la vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O). L'oxydation est qualifiée de combustion partielle et fournit la chaleur nécessaire au processus de la gazéification.

-La réduction : c'est la phase qui correspond à la conversion de la partie non oxydée du combustible solide (charbon) issue de la pyrolyse en gaz. Cette étape est observée pour des températures de 800-1200°C, (Harouna, 2014).

### **I.1.3.3 Combustion**

La combustion est définie selon Alexandre (2017), comme étant une réaction exothermique qui transforme un matériau solide en dioxyde de carbone et de la vapeur d'eau sous la présence d'oxygène à une température supérieure à 800°C. Cette transformation du bois et des résidus agricoles produit de la chaleur, pouvant être utilisée pour la cuisson, le chauffage, la production d'eau chaude ou la production d'électricité (Benjamin, 2012).

### **I.1.3.4 La carbonisation**

#### **I.1.3.4.1 Définition**

La carbonisation peut être définie comme la transformation d'un combustible en l'exposant à un apport de chaleur et une faible quantité d'air en résidu solide (le charbon). Elle est aussi qualifiée de pyrolyse lente du fait que l'objectif ultime est la production du charbon (Onana, 2011). La carbonisation des résidus agricoles permet la réduction de l'utilisation du bois (chose qui est en train d'accélérer la désertification). La carbonisation se déroule en quatre 4 étapes en fonction de la température :

- Le séchage : il consiste à éliminer l'humidité contenue dans le combustible sous l'effet de la chaleur, cette dernière est observée pour une température en dessous de 120°C.
- La torréfaction : pour une température comprise entre 120°C et 250°C, cette étape consiste à la volatilisation de la matière et conserve le rendement massique et énergétique.
- La carbonisation : pour des températures comprises entre 250°C et 500°C, on assiste à une perte de masse de la biomasse et à l'obtention d'un résidu riche en carbone.
- La cuisson du charbon : Au-delà d'une température de 500°C, elle consiste à dégrader les goudrons et à former le charbon.

#### **I.1.3.4.2 Procédés de carbonisation**

On distingue trois (3) modes opératoires de carbonisation en fonction du mode d'apport de chaleur nécessaire à la réaction (Ndiaye, 2008). Il s'agit de :

- La carbonisation par combustion partielle : L'énergie nécessaire à la carbonisation est fournie par la combustion d'une partie de la charge à carboniser. C'est ce procédé qui est utilisé dans le cadre de ce travail.
- La carbonisation par chauffage externe : L'énergie nécessaire est fournie à la charge par un foyer de chauffage externe par l'intermédiaire d'une surface d'échange.
- La carbonisation par contact de gaz chaud : L'énergie est fournie par la mise en contact direct de la charge et d'un gaz chaud provenant d'un foyer externe.

Par la suite nous présentons les différents types de carbonisateur utilisés dans le cadre de la carbonisation à combustion partielle.

### I.1.3.4.3 Les différents types des carbonisateurs

Le choix du carbonisateur s'est effectué en fonction de plusieurs paramètres, le tableau 1 résume les avantages et inconvénients des différents types de carbonisateur.

Tableau 1: Comparaison des différents procédés de carbonisation (Schinkel et al., 1998) :

Techniques	Avantages	Inconvénients
Meule	Mobilité du four Utilisation de matériaux locaux Zéro investissement Utilisation de gros morceaux de bois Utilisation de résidus de biomasse	Opérateur expérimenté Intense labeur Charbon de qualité variable Sensible aux conditions climatiques Faible rendement Dégagement d'importante quantité de fumée
Fosse	Investissement très faible Utilisation de matériaux locaux Carbonisation de gros morceaux de bois Capacité variable Facile à opérer Charbon relativement propre	Sensible aux conditions climatiques Nécessite un sol adapté (dure) Intense labeur Opérateur expérimenté Faible rendement Dégagement d'importante quantité de fumée
Carbonisateurs en briques	Utilisation de matériaux locaux Bonne isolation thermique Facile à opérer Charbon propre et homogène	Opérateur expérimenté (pour la construction du four) Installation fixe Capacité fixe

	Durée de vie longue Pas très sensible aux conditions climatiques	Refroidissement lent Découpage de gros morceaux de bois Dégagement d'importante quantité de fumée
Carbonisateurs métalliques	Mobilité du four Cycle de carbonisation court (rapide refroidissement) Charbon propre et homogène Facile à opérer Pas très sensible aux mauvais temps	Investissement important Capacité fixe Découpage de gros morceaux de bois Durée de vie limitée Rendement moyen Dégagement d'importante quantité de fumée
Procédés industriels	Charbon homogène et de qualité ajustable Bon rendement Automatisé Faible pollution	Investissement considérable Technologie sophistiquée Transport du bois Préparation du bois (avant sa carbonisation)

Il s'agit pour nous de choisir un carbonisateur qui peut répondre aux critères suivants :

- Une mobilité du dispositif pour faciliter le déplacement du dispositif au besoin et effectuer la carbonisation dans un lieu de convenance.
- Un investissement acceptable (pour qu'on puisse proposer le dispositif aux paysans qui peuvent valoriser les résidus de leurs champs).
- Un rendement acceptable (moyen).
- Une durée du cycle court (ceci permettra d'envisager plus d'un test par jour).
- Un charbon propre et homogène (pour une meilleure utilisation).

Ainsi, au vue de ces critères, le carbonisateur métallique semble être le mieux adapté pour nos besoins.

#### **I.1.3.4.4 Paramètres influençant la carbonisation**

Plusieurs paramètres peuvent influencer le processus de la carbonisation, on peut citer entre autres :

- **La Température**

La température représente le paramètre le plus important de la carbonisation. Elle permet de déterminer la qualité du charbon et son rendement massique. Zeïda (2017), souligne qu'une température élevée permet la volatilisation du combustible, ce qui joue en faveur du taux de carbone fixe qui va augmenter et provoquer une diminution du rendement massique, d'où la nécessité d'optimiser cette dernière. En fonction du pic de température (plus grande température atteinte lors du cycle de carbonisation) on peut parler de torréfaction pour des températures de 250-280°C ou de carbonisation pour des températures de 300-500°C, (Harouna, 2014).

- **La vitesse de chauffe**

La vitesse de chauffe indique la vitesse avec laquelle la température de la biomasse évolue lors de la pyrolyse, lorsque cette vitesse de chauffe est élevée, le charbon devient friable et sa production limitée (Ndiaye et al., 2004). Les travaux d'Alexandre (2007) ont montré que la perte de masse de la composante majoritaire qui est la cellulose augmente avec la vitesse de chauffe. Selon Girard et Napoli (2005), la vitesse de chauffe et la température sont à l'origine de la quantité et la qualité des produits de la pyrolyse.

- **La cheminée**

La cheminée est aussi un paramètre qui peut influencer la carbonisation, elle permet d'activer l'aération (favorise la circulation de l'air) à travers la création d'une différence de niveau, ce qui favorise la combustion, et diminue la durée de carbonisation d'où une augmentation du rendement (Bambara, 2014).

- **Le temps de combustion**

Il joue un rôle important lors de la carbonisation car plus ce dernier augmente plus le rendement massique, énergétique et la teneur en matières volatiles diminue. Cela génère comme conséquent une augmentation du taux de cendre et de carbone fixe (Harouna, 2014).

- **La nature de la biomasse**

La nature de la biomasse influe aussi sa carbonisation notamment sa composition en cellulose, lignine, et hémicellulose. Il a été prouvé que les composantes de la biomasse réagissent à des degrés de températures différents selon la nature de la biomasse brute. L'hémicellulose se dégrade dans un intervalle de température de 240 à 280 °C, la cellulose commence à partir de

250 et la lignine qui est une matière hydrophobe riche en eau se dégrade à des températures élevées.

- **Le taux d'humidité**

Le taux d'humidité joue un rôle important dans le processus de la carbonisation, une forte humidité limite la carbonisation et nécessite plus d'énergie pour le séchage, d'où la nécessité de sécher la biomasse avant la carbonisation. Le taux d'humidité prolonge aussi la durée du cycle de carbonisation (Harouna, 2014).

### **I.1.3.4.5 Les caractéristiques de base du charbon**

Les caractéristiques de base du charbon issu de la carbonisation sont entre autres son pouvoir calorifique, son taux d'humidité, en matières volatiles, en cendre (matière minérale), et en carbone fixe (Girard et Napoli, 2005).

-Le pouvoir calorifique du charbon représente la quantité de chaleur qu'il dégage par combustion d'un kilogramme ou bien un litre de combustible. On distingue deux types : le pouvoir calorifique supérieur (PCS) et le pouvoir calorifique inférieur (PCI). Le PCS représente le pouvoir calorifique avec la quantité de chaleur de condensation des vapeurs d'eau, alors que le PCI c'est sans celle de la condensation des vapeurs d'eau. Diedhiou (2017), indique que le pouvoir calorifique représente un indice énergétique de la matière première et permet de situer sa contenance énergétique.

-Quant aux taux de cendre, de matière volatile et de carbone fixe, on peut les lier directement à la température, plus la température est élevée plus les matières volatiles se volatilisent et les taux de cendre et carbone fixe deviennent importants, ce qui favorise la qualité du charbon.

### **I.1.3.5 La torréfaction**

Elle est définie selon Basu (2013), comme étant un procédé thermochimique dans un environnement inerte avec une quantité limitée d'oxygène où la biomasse est chauffée lentement à l'intérieur d'une plage de température spécifiée et retenue dans le dispositif pendant un temps fixé de telle sorte qu'il en résulte une dégradation quasi-totale de son contenu, des hémicelluloses, tout en maximisant la masse et le rendement énergétique du produit solide. Harouna (2014) dans son étude, indique que la torréfaction est qualifiée de prétraitement du fait qu'elle prépare la biomasse à une utilisation finale. Cependant nous

avons plusieurs degrés de torréfaction en fonction de la température. Le tableau 2 résume quelques données sur la torréfaction légère, moyenne et sévère de la biomasse.

Tableau 2: Quelques données sur la torréfaction légère, moyenne et sévère de la biomasse (Eseltine 2013- Bridgeman et al., 2008).

Degré de torréfaction	Légère 200-240°C (Eseltine D 2013)	Moyenne 240-260°C (Bridgeman et al., 2008)	Sévère 260-300°C (Bridgeman et al., 2008)
Nature de la biomasse	Bois	Herbacé	Herbacé
Rendement massique (%)	--	82,6-89,6	55,1-79,8
Rendement énergétique (%)	84,7 – 93,6	86,2 – 92,7	65,8 – 85,8
PCS (MJ/Kg)	19,5 – 20,1	19,8 – 20,6	20,7 – 22,6
Carbone fixe (%)	13,3 – 18,4	18,6 – 23,3	16,1 – 38,0
Matière volatile (%)	77,0 – 80,3	69,5 – 74,6	51,8 – 79,3
Cendre (%)	1,08 – 2,39	1,9 – 7,4	2,1 – 10,2

Cependant, les deux mots carbonisation et torréfaction sont proches en définition, le point suivant permettra de faire lumière sur les différences entre ces deux procédés de prétraitements.

### I.1.3.6 Différences entre carbonisation et torréfaction

Le tableau 3 résume quelques différences entre la biomasse brute, carbonisée et torréfiée. La carbonisation a pour objectif l'obtention d'un charbon riche en carbone fixe et pauvre en matière volatile, et elle s'effectue à des températures élevées (supérieure à 300°C), alors que la torréfaction s'effectue entre 200°C et 300°C.

Tableau 3 : Comparaison de la biomasse carbonisée et torréfiée (Basu, 2013).

	Bois typique	Bois torréfié	Charbon de bois
<b>Température (°C)</b>	-	200-300	>300
<b>Humidité (% base humide)</b>	30-60	1-5	1-5
<b>Volatile (% base sèche)</b>	70-80	55-65	10-12
<b>Carbone fixe (% base sèche)</b>	15-25	28-35	85-87
<b>Rendement massique (%)</b>	-	80	30

### Conclusion :

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté la revue de la littérature sur la biomasse, à travers son importance, les différents types, sa composition ainsi que les différents modes de conversion thermochimique. La conversion thermochimique retenue pour cette étude est la carbonisation et le type de carbonisateur est le carbonisateur métallique. Le chapitre prochain sera consacré à la présentation du carbonisateur métallique utilisé, ainsi que les autres matériels et la méthodologie suivie.

***Chapitre II : Matériels et méthodes***

### Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter le dispositif qui a servi à la carbonisation, ainsi que l'ensemble des matériels utilisés dans le cadre de nos travaux. Enfin nous exposerons la méthodologie suivie pour la réalisation de l'étude.

### II.1 Matériels

#### II.1.1 Carbonisateur métallique

Le carbonisateur utilisé dans le cadre de notre travail est représenté sur la figure 2.

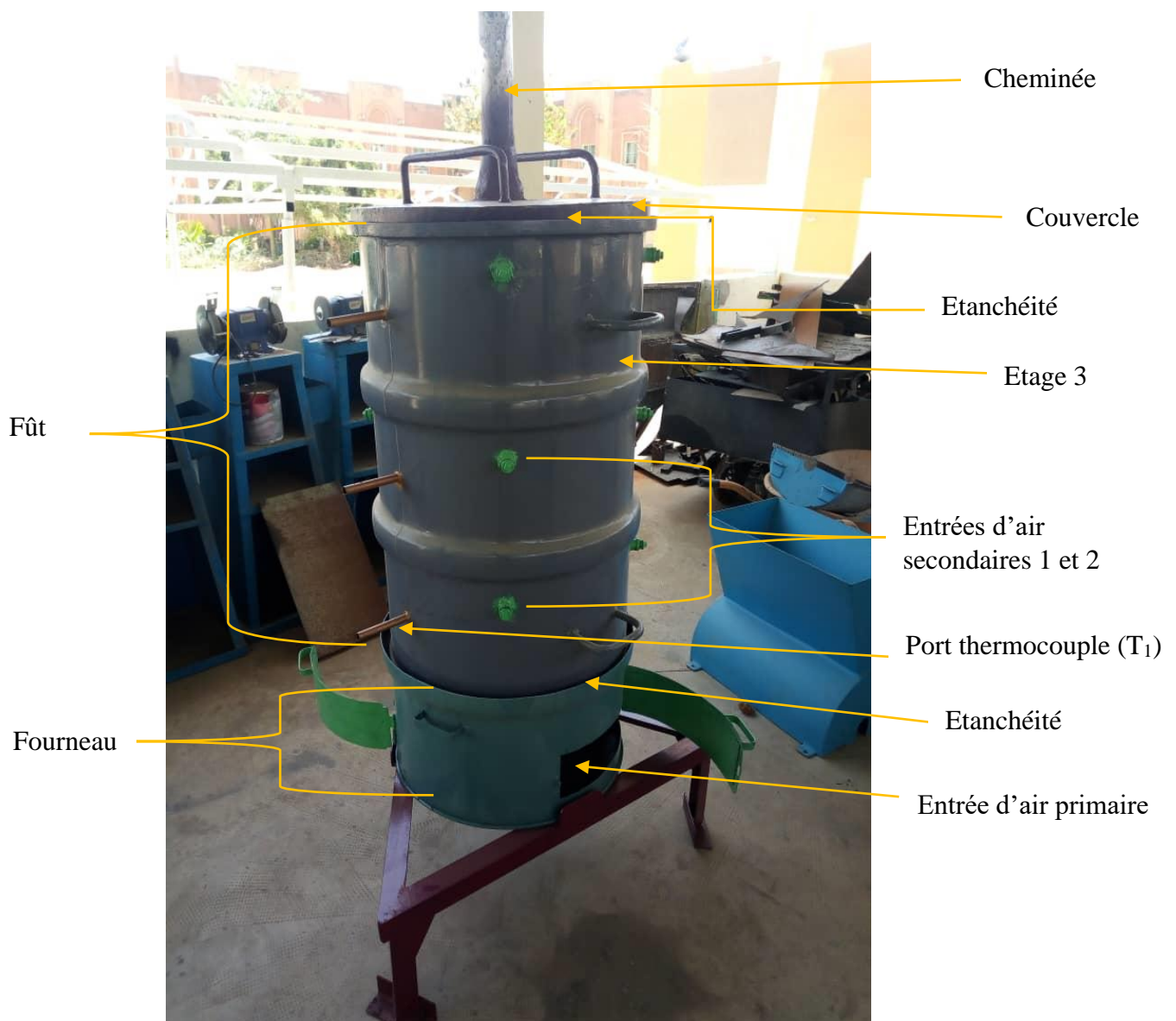


Figure 2: Carbonisateur de l'étude (Zeida, 2017).

C'est un carbonisateur circulaire de diamètre intérieur 57cm et de hauteur 1,20 m. Il est constitué de deux parties : le fût et le fourneau, (Figure 2).

- Le fût de hauteur 94 cm, dispose de trois étages séparés par des grilles disposées comme suit : la première grille est placée au fond du fût, la deuxième à 30 cm de la première et la troisième à 30 cm de la deuxième. Chaque étage possède quatre (4) entrées d'air de diamètre 2 cm et un thermocouple pour mesurer sa température. A l'intérieur du fût nous avons une cheminée sans trous d'une hauteur de 80 cm et d'un diamètre interne de 8,5 cm et à l'extérieur (sur le couvercle) une cheminée d'une hauteur de 1,70 m et d'un diamètre interne de 8 cm. Le bout du fût et le couvercle sont reliés par une gorge d'étanchéité.
- Le fourneau possède une hauteur de 32 cm et deux entrées d'air parallèles disposées à 4 cm du bas de section 10 cm\*40 cm. Une grille est posée à 4 cm au-dessus des entrées d'air. Les deux parties du carbonisateur (fût et fourneau) sont reliées par une gorge d'étanchéité. Ce dispositif est semblable à celui utilisé dans les travaux de Zeïda (2017) pour la carbonisation des coques d'anacarde.

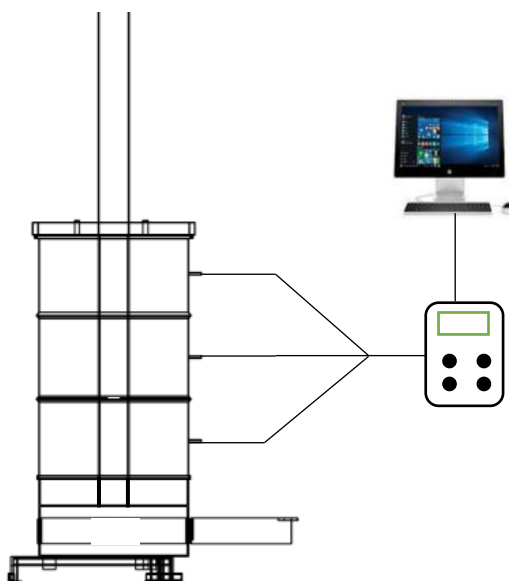


Figure 3 : Carbonisateur avec acquiiseur

### II.1.2 Balance

C'est une balance de modèle Ws-150 computer charging scale possédant une capacité de 150kg avec une précision de 1% et est utilisée pour peser les masses de biomasse brute ainsi que celles du charbon et cendre obtenus.

### **II.1.3 Acquisition des températures**

L'acquisition des températures se fait grâce à trois thermocouples de type K placés dans le carbonisateur. Le premier thermocouple est placé à 20 cm au-dessus de la première grille, les deux autres sont régulièrement espacés de 30 cm. Les thermocouples sont ensuite reliés à un acquiiseur Testo 176T4 (DATA LOGGER) donnant une plage de mesure de  $-195^{\circ}\text{C}$  à  $1000^{\circ}\text{C}$ . L'acquiiseur (Testo 176T4) prélève la température chaque minute et procède à l'enregistrement.

### **II.1.4 L'analyse immédiate**

L'analyse immédiate consiste à déterminer le taux d'humidité, de cendres, de matières volatiles et carbone fixe des combustibles. Pour réaliser cette analyse, un four de marque RESISTANCE FURNACA a été utilisé. L'étuve utilisée dans ce travail a permis d'effectuer l'analyse du taux d'humidité dans une plage de température de  $105\pm 2^{\circ}\text{C}$ . Une balance de capacité 220g et de précision  $\pm 0,1\text{mg}$  nous a permis de mesurer les échantillons de l'analyse immédiate. Le pouvoir calorifique supérieur des combustibles a également été déterminé à l'aide d'une bombe calorimétrique.

## **II. 2 Méthodes**

### **II.2.1 Préparation des matières premières**

Les matières premières utilisées dans le cadre de notre travail étant la balle de riz et le palmier doum (coque d'hyphaene thebaica) ont subi d'abord une phase préparatoire à savoir : la collecte, le séchage et le broyage (pour l'analyse immédiate). La balle de riz nous a été fournie par l'usine de décorticage de Kirkissoye à Niamey. Quant à la coque du palmier doum, nous l'avons achetée au niveau des vendeurs de quartier de Maradi.

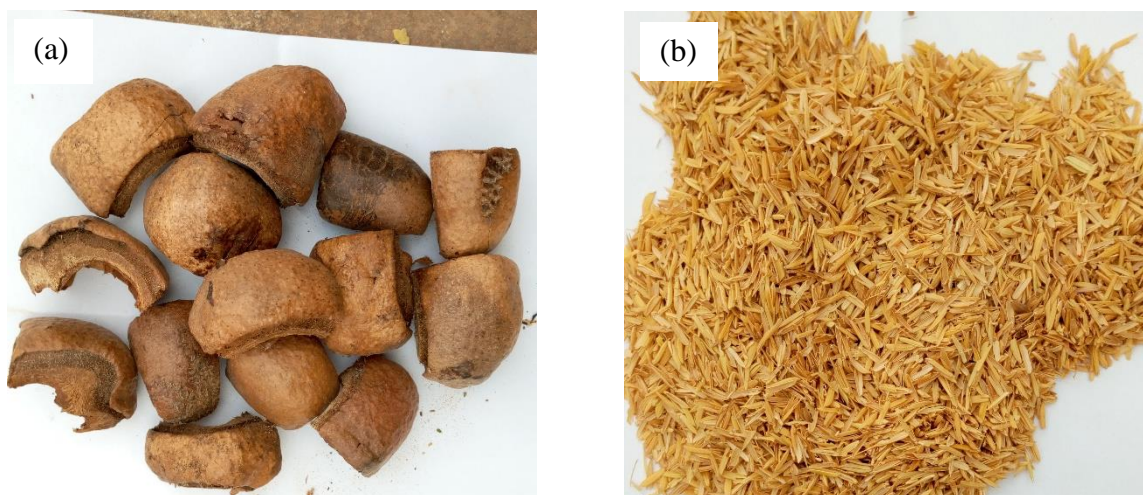


Figure 4 : (a) Palmier doum brut, (b) Balle de riz brute.

Le séchage: Les coques d'hyphaene thebaica ont été préalablement séchées pendant trois (3) jours avant toute utilisation.

### II.2.2 Détermination de la capacité du carbonisateur

Pour la détermination de la capacité du carbonisateur, des essais à vide ont été effectués en suivant la démarche suivante :

- Peser la masse d'un sac et la noter  $m_1$ .
- Remplir l'étage 1 avec la masse du sac et ensuite peser la masse du sac restant après remplissage, on note cette masse  $m_2$ .
- La masse de l'étage ( $m_3$ ) est égale à la différence entre la masse  $m_1$  et la masse  $m_2$ .
- Reprendre l'opération trois (3) fois.
- Faire la moyenne des trois pesés. Soit  $m_4$  la moyenne obtenue.
- Suivre la même démarche pour les trois (3) étages.
- La moyenne des trois (3) étages représente la masse ( $m$ ) du carbonisateur.

### II.2.3 Protocole de Carbonisation

La méthode de carbonisation utilisée étant par combustion partielle, l'initiation de la carbonisation est effectuée à partir d'une quantité de charbon (généralement 1 à 2 kg pour l'ensemble du processus). Le remplissage commence à partir de l'étage n°1 (étage du bas) où environ une quantité de 0,5kg de charbon est utilisée pour initier la carbonisation.

- Une quantité de charbon de 0,5 kg est allumée puis versée sur la grille 1 situé au fond du carbonisateur.

- Une petite quantité de biomasse (100g à 300g), est ensuite versée dans le carbonisateur pour initier la réaction.
- On place le thermocouple au niveau de l'étage n°1 pour la mesure de la température  $T_1$ .
- La biomasse est ensuite progressivement versée jusqu'au remplissage du premier étage (situé en bas du dispositif) du carbonisateur.
- La grille de l'étage n°2 est placée au-dessus du lit combustible du premier étage.
- On procède de la même manière pour le remplissage de l'étage n°2 (étage du milieu) et l'étage n°3 (étage du haut).
- Le carbonisateur est fermé à la fin du remplissage et de l'eau est directement introduite dans la gorge pour l'étanchéité.
- Ensuite on ferme les entrées d'air primaires ( $E_{Ap}$ ), après la fermeture du carbonisateur.
- Les entrées d'air secondaires situées au niveau de chaque étage sont fermées progressivement (du premier au deuxième étage) en fonction de l'évolution de la température du lit combustible de chaque étage. La température de référence pour procéder à la fermeture de chaque étage est fixée à 300°C pour permettre la carbonisation de la charge combustible.
- Le temps de refroidissement est évalué à partir de la fin de la fermeture des entrées d'air jusqu'à la baisse de la température à un niveau inférieur à 50°C.
- Une fois que l'ensemble des températures descendent à un niveau inférieur à 50°C, on procède au déchargement par étage, à commencer par l'étage n°3, respectivement n°2 et n°1.
- Les quantités de charbon et de cendre obtenues pour chaque étage sont pesées après le déchargement.
- Les échantillons de charbon sont prélevés et analysés.

### II.2.4 Mesures effectuées

Les mesures effectuées dans le cadre de nos travaux sont : la durée de remplissage, la durée de fermeture des entrées d'air primaires et secondaires, la durée du refroidissement, la durée du cycle, le pic des températures, l'analyse immédiate et le pouvoir calorifique supérieur (PCS). Les résultats des mesures ont été utilisés pour calculer les rendements massiques et énergétiques, et l'analyse de la qualité du charbon.

### II.2.3.1 Méthode de la détermination des durées des étages considérées

La méthode utilisée pour calculer la durée du remplissage, la durée de fermeture, la durée de refroidissement et la durée du cycle est la suivante :

- **La durée du remplissage ( $T_{\text{rempl}}$ ) :**

La durée du remplissage du dispositif est compté à partir du début d'initiation de la carbonisation jusqu'à la fermeture du couvercle.

- **La durée de fermeture des entrées d'air primaire et secondaire :**

La durée de fermeture des entrées d'air primaires ( $T_{\text{FEAP}}$ ) est comptée à partir de la fermeture du carbonisateur jusqu'à la fermeture des entrées d'air primaires ( $E_{\text{AP}}$ ). La durée entre la fermeture des entrées d'air primaires et les entrées d'air secondaires du premier étage est notée ( $T_{\text{FAES1}}$ ). La durée entre la fermeture des entrées d'air secondaires du premier étage et les entrées d'air secondaires du deuxième étage est notée ( $T_{\text{FAES2}}$ ). La durée de réaction de la carbonisation est donnée par le temps entre la fin du remplissage et la fermeture des entrées d'air secondaires du deuxième étage ( $T_{\text{rc}}$ ).

- **La durée de refroidissement ( $T_{\text{R}}$ ) :**

La durée du refroidissement du procédé est comptée à partir de la fin des fermetures des entrées d'air secondaires jusqu'à la descente des températures de tous les niveaux à un niveau inférieur à 50°C qui correspond à l'ouverture du carbonisateur.

- **La durée du cycle (DC) :**

La durée du cycle est donnée par la somme de la durée de remplissage, de réaction et du refroidissement (équation II.1).

$$DC = T_{\text{rempl}} + T_{\text{rc}} + T_{\text{R}} \quad (\text{II.1})$$

### II.2.3.2 La température maximale du cycle

La température maximale du cycle de la carbonisation a également été identifiée pour chaque étage du carbonisateur lors des tests réalisés. Les courbes de température enregistrées ont été utilisées à cet effet.

### II.2.3.3 L'analyse immédiate

L'analyse immédiate a été effectuée au niveau du laboratoire des sciences et technologie alimentaire de l'Université Dan Dicko Dankoulodo de Maradi, et le pouvoir calorifique au niveau du laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement (LPCE) de Ouagadougou. Elle permet de nous renseigner sur la qualité du produit, notamment son taux d'humidité, de cendre, de matière volatile et de carbone fixe. Pour chaque échantillon cinq (5) essais ont été effectués afin de garantir la répétabilité des résultats.

#### - Le taux d'humidité

C'est la quantité d'eau (teneur en eau) contenue dans le combustible. Le taux d'humidité est déterminé à partir des expériences effectuées à l'étuve suivant la norme française (AFNOR/X 34 B N° 110). On pèse d'abord la biomasse brute, et ensuite on la porte à une température de  $105\pm 2^\circ\text{C}$  jusqu'à obtenir une masse constante. La biomasse déshydratée est enfin pesée. Le taux d'humidité (en pourcentage) sur base humide est donné par l'équation II.2.

$$H = \frac{(m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)} \times 100 \quad (\text{AFNOR/X 34 B N}^\circ 110) \quad (\text{II.2})$$

- $m_1$  est la masse en grammes du creuset vide ;
- $m_2$  est la masse en grammes du creuset plus l'échantillon avant séchage ;
- $m_3$  est la masse en grammes du creuset plus l'échantillon après séchage.

#### - Le taux de cendre

C'est la quantité de matières minérales contenues dans le combustible. L'analyse du taux de cendre est effectuée à l'aide du four suivant la norme AFNOR (AFNOR/X 34 B N° 113). Le taux de cendre sur base sèche est donné par l'équation II.3 :

$$C = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} \times 100 \times \frac{100}{(100 - H)} \quad (\text{II.3})$$

Ou

- $m_1$  est la masse en grammes du creuset vide ;
- $m_2$  est la masse en grammes du creuset et de l'échantillon d'essai ;
- $m_3$  est la masse en grammes du creuset plus les cendres ;

-  $H$  est l'humidité sur base humide exprimée en pourcentage de la masse.

### - Le taux de matière volatile

Les matières volatiles sont des composés qui peuvent rapidement s'échapper lorsqu'on soumet la matière à une haute température. La biomasse est introduite dans un four à une température de  $900^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$  pendant un temps de 7min. La matière volatile de l'échantillon, exprimée en pourcentage en masse sur la base sèche, est donnée suivant la norme AFNOR par l'équation II.4 (AFNOR/X 34 B N° 289):

$$MV = \frac{(m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)} \times 100 \times \frac{100}{(100 - H)} \quad (\text{II.4})$$

Avec

- $m_1$  est la masse en grammes du creuset et du couvercle vides ;
- $m_2$  est la masse en grammes du creuset et du couvercle et de la prise d'essai avant chauffage ;
- $m_3$  est la masse en grammes du creuset et du couvercle et du contenu après chauffage ;
- $H$  est l'humidité sur base humide exprimée en pourcentage de la masse.

### - Le taux de carbone fixe

C'est la quantité de carbone restant après l'élimination de l'humidité, des matières volatiles et des cendres, nous avons suivi la norme AFNOR pour sa détermination avec l'équation II.5 (AFNOR/X 34 B N° 289) :

$$CF = 100 - (MV + C) \quad (\text{II.5})$$

#### II.2.3.4 Pouvoir calorifique supérieur (PCS)

Le pouvoir calorifique supérieur (PCS) a été déterminé à l'aide d'une bombe calorimétrique suivant la norme AFNOR (AFNOR/X 34 B N° 254).

$$PCS = PCI + \text{Chaleur latente d'évaporation} \quad (\text{II.6})$$

#### II.2.4 Rendement massique ( $\eta_m$ )

Le rendement massique ( $\eta_m$ ) a été calculé sur base humide. Le rendement massique de chaque étage est obtenu en faisant le rapport de la masse du charbon (sans cendres) obtenue sur la masse de la biomasse introduite (équation II.7), (Harouna, 2010). Le rendement de l'ensemble du test est donné par la même relation en prenant en compte la masse totale du charbon et de la biomasse.

$$\eta_m = \frac{m}{M} * 100 \quad (\text{II.7})$$

- $m$  : masse du charbon obtenue ;

- $M$  : masse de la biomasse introduite.

### II.2.5 Rendement énergétique ( $\eta_e$ )

Le calcul du rendement énergétique a été effectué en utilisant le PCS de la biomasse et du charbon, de la masse sèche introduite et du charbon obtenu. Le rendement énergétique est donné par l'équation II.8 (Harouna, 2010) :

$$\eta_e = 100 * \frac{\text{PCS charbon} * \left(1 - \frac{h}{100}\right) m}{\text{PCS biomasse} * \left(1 - \frac{H}{100}\right) M} \quad (\text{II.8})$$

Avec

-*PCS charbon*: pouvoir calorifique supérieure du charbon obtenu ;

-*PCS biomasse* : pouvoir calorifique supérieure de la biomasse introduite.

### Conclusion

Le contenu de ce chapitre nous a permis de voir la méthodologie adaptée dans ce document pour effectuer la carbonisation, ainsi que l'ensemble des matériels utilisés pour aboutir aux différents résultats qui seront présentés et analysés dans le chapitre suivant.

*Chapitre III : Résultats et discussions*

### **Introduction**

Ce chapitre est consacré à la présentation et la discussion des résultats obtenus lors des essais de carbonisation. Il s'agit d'abord de la détermination de la capacité du carbonisateur, de l'analyse des performances de la carbonisation en fonction de l'étage du carbonisateur et de la nature de la biomasse. La qualité du charbon obtenu sera également analysée et comparée avec les résultats de la littérature.

### **III.1 Capacité du carbonisateur**

Le tableau 4 résume les résultats des essais à vide pour la détermination de la capacité du carbonisateur.

*Tableau 4 : Capacité du carbonisateur*

<b>Biomasse</b>	<b>Palmier doum</b>			<b>Balle de Riz</b>		
<b>Etage</b>	$E_3$	$E_2$	$E_1$	$E_3$	$E_2$	$E_1$
<b>Essai 1(kg)</b>	8,80	11,50	12	5,7	7,72	7,50
<b>Essai 2(kg)</b>	8,20	11	10,50	7	6,50	6,50
<b>Essai 3(kg)</b>	9,40	10,20	11,30	6,50	6,30	6,70
<b>Moyenne/Etage (kg)</b>	8,80	10,9	11,26	6,4	6,84	6,9
<b>Moyenne du carbonisateur (kg)</b>	30,96			20,14		

Les résultats ont permis d'estimer les quantités de la balle de riz et de la coque du palmier doum à utiliser pour les tests de carbonisation. Ainsi pour les tests de carbonisation la masse moyenne utilisée est 31 kg pour la coque du palmier doum, 20,14 kg pour la balle de riz et 1,5 kg de charbon pour l'initiation.

### **III.2 Présentation et analyses des résultats de la carbonisation**

#### **III.2.1 Champs de température**

Les résultats des essais de carbonisation des champs de température pour chaque biomasse étudiée respectivement la coque du palmier doum et la balle de riz sont représentés par la Figure 5. Pour chaque biomasse étudiée trois (3) essais ont été considérés, mais dans le souci de ne pas surcharger le document, nous présentons une courbe par biomasse. Les courbes sont

issues de l'acquisition des températures sur les trois (3) thermocouples placés à l'intérieur du carbonisateur.

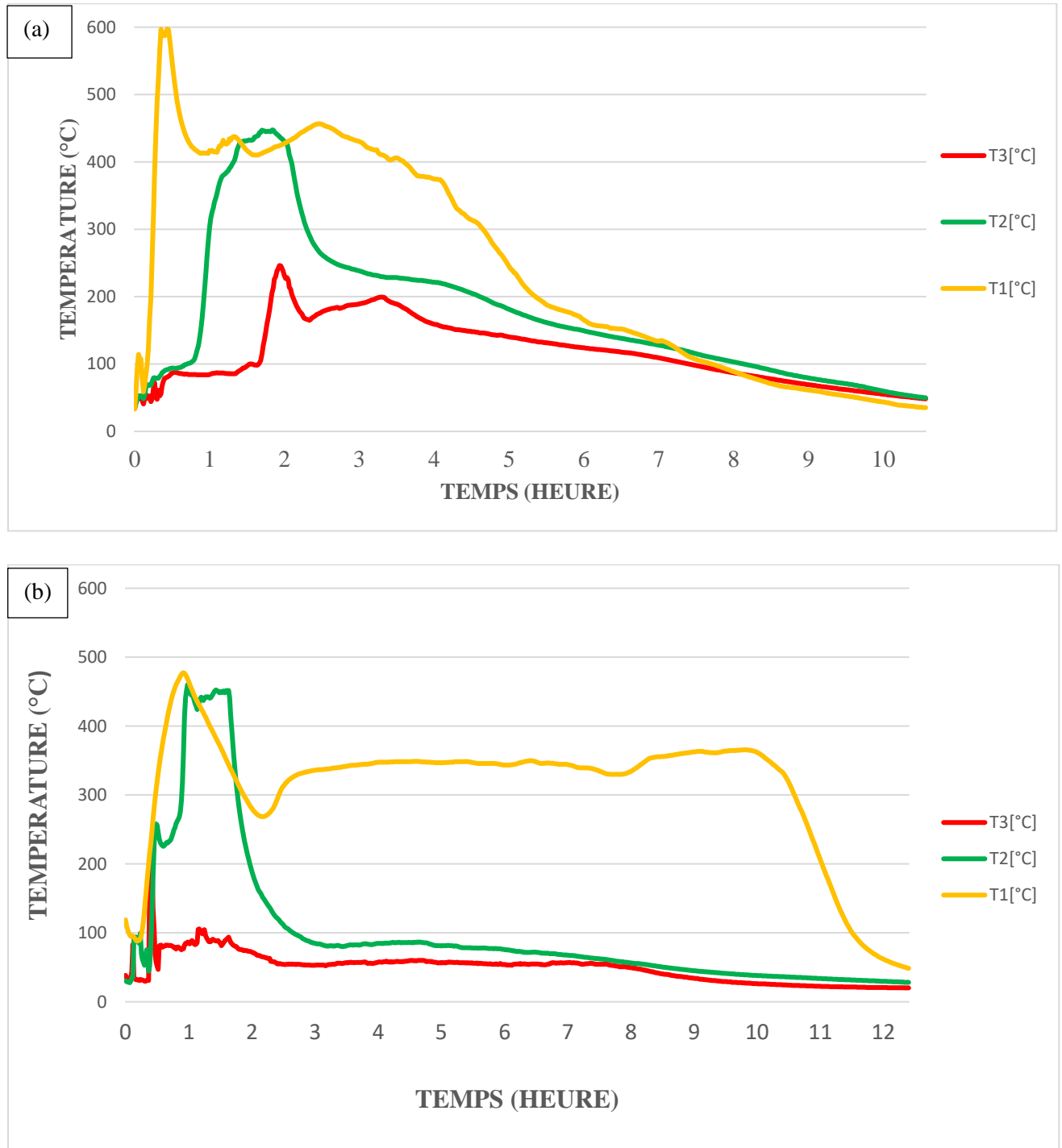


Figure 5: Courbe des températures pour la carbonisation : (a) Coque du palmier doum ; (b) Balle de riz

D'une manière générale les champs de température présentent une allure semblable pour les trois (3) températures  $T_1$ ,  $T_2$  et  $T_3$ , cette évolution peut être divisée en deux phases. La première phase qui correspond à une croissance des trois (3) températures jusqu'à leur pic de température et une deuxième qui correspond à une décroissance des températures de leur pic de température jusqu'à un niveau de température inférieure à 50°C. La première phase est qualifiée de phase de combustion et la deuxième est la phase de refroidissement.

Pour le palmier doum, la température  $T_1$  augmente progressivement jusqu'à son pic moyen qui est de 620°C, puis commence à chuter juste après la fermeture des entrées d'air primaires, pendant ce temps les températures  $T_2$  et  $T_3$  continuent à croître jusqu'à atteindre leur pic respectivement 499,7°C et 249,13°C. Les trois (3) pics sont atteints en moins de 2 heures. Pour la carbonisation de la balle de riz, les moyennes des pics de température de 429,03°C ; 381,86 °C et 125,7°C pour  $T_1$ ,  $T_2$  et  $T_3$  respectivement sont enregistrées. La phase de la combustion est la phase durant laquelle le combustible subit une dégradation thermique sous l'effet de la chaleur. La phase de la combustion est la phase de la carbonisation qui est à l'origine de la qualité du charbon obtenu. Au cours de cette phase l'opérateur doit être très vigilant et contrôler les pics des températures en fonction de l'usage visé pour le charbon. Un pic de température situé entre 250°C et 300°C conduit à un produit torréfié. Par contre un pic de température situé entre 300°C et 500°C conduit à un produit carbonisé. Une élévation excessive de cette dernière conduit à une combustion excessive qui est la conséquence de l'obtention des cendres, de la diminution du rendement massique et énergétique.

Notons que l'évolution des températures montre une différence nette entre les étages et aussi entre la balle de riz et les coques du palmier doum. La température de l'étage 1 (étage inférieur) est plus élevée que celle des autres étages (2 et 3) du fait de sa proximité avec les entrées d'air primaires situées en dessous du carbonisateur. Le pic de la température de l'étage 2 (étage du milieu) est également supérieur à celui de la température de l'étage 3 situé au-dessus du carbonisateur. La température  $T_3$  de l'étage supérieur est très faible (inférieur à 250°C) du fait que le thermocouple placé à cet étage est situé au-dessus du lit combustible. Pour le cas de la balle de riz, la chute des températures une fois que le pic est atteint est plus rapide lors de la carbonisation comparativement à la baisse de la température observée lors de la carbonisation des coques du palmier doum (figure 5). En moins de 3h,  $T_2$  et  $T_3$  atteignent une température inférieure à 100°C. En effet la balle de riz étouffe le charbon utilisé pour l'initiation de l'étage 2 (étage du milieu) juste après la fermeture des entrées d'air primaires qui alimentent l'étage 1, provoquant ainsi la chute brusque de la température  $T_2$  avant même

la fermeture de ses entrées d'air ( $E_{ASE1}$ ). L'évolution des températures montre clairement le rôle crucial des entrées d'air primaires et secondaires sur le niveau des températures et les phases de la carbonisation aussi bien pour la balle de riz que pour les coques du palmier doum. Le tableau 5 résume la moyenne des pics de température obtenus lors des trois (3) tests de carbonisation pour chaque étage et par type de combustible.

*Tableau 5 : Moyennes des pics de température obtenus lors des tests de carbonisation de la balle de riz et des coques du palmier doum pour chaque étage*

Type de combustible	Etage 1 (étage inférieur)	Etage 2 (étage du milieu)	Etage 3 (étage supérieur)
Balle de riz (°C)	429,03	381,86	125,7
Coques du palmier doum (°C)	620	499,7	249,13

D'une manière générale, on remarque que les pics atteints par la coque du palmier doum lors de la carbonisation sont supérieurs à ceux obtenus pour la balle de riz au niveau de chaque étage, mais aussi que l'étage du bas (inférieur) pour chaque combustible atteint un pic plus élevé que les deux (2) autres, respectivement celui du milieu et du haut (inférieur) .

### III.2.2. Durées des différentes phases de la carbonisation

Les moyennes des durées des phases de remplissage, de fermeture des différentes entrées d'air, de combustion, de refroidissement, et du cycle sont résumées dans le tableau 6.

*Tableau 6 : Durée moyennes des phases de remplissage, du temps de fermeture des différentes entrées d'air, de combustion, de refroidissement, et du cycle de la carbonisation de la balle de riz et du palmier doum*

Durée des étapes de la carbonisation	Balle de riz	Coque du palmier doum
Durée de remplissage(min)	40	15
Durée de fermeture des entrées d'air primaires (min)	60	1
Durée de fermeture des entrées d'air secondaires de l'étage 1 (min)	70	43
Durée de fermeture des entrées d'air secondaires de l'étage 2 (min)	40	53

<b>Durée de combustion (heure)</b>	3,5	1,86
<b>Durée de refroidissement(heure)</b>	7,72	7,17
<b>Durée du cycle(heure)</b>	11,22	9,03

Les différentes durées enregistrées pour le remplissage et les fermetures des entrées d'air primaires et secondaires de la balle de riz sont supérieures à celles du palmier doum. Les durées de 1,86 heure et 3,5 heures représentent le temps de combustion (remplissage et fermeture des entrées d'air) pour la carbonisation des coques du palmier doum et de la balle de riz respectivement. La deuxième phase correspondant à celle du refroidissement, une phase durant laquelle on ferme les entrées d'air, le combustible est privé d'air d'où la diminution de la température au sein du carbonisateur. Cette phase de refroidissement dure 7,17 h et 7,72 h pour la carbonisation des coques du palmier doum et de la balle de riz respectivement.

La phase de combustion dure plus longtemps lors de la carbonisation de la balle de riz par rapport à la carbonisation des coques du palmier doum avec une durée 3,5 heures pour la balle de riz contre 1,86 heures pour les coques du palmier doum. Par contre, la durée de refroidissement est peu influencée par la nature du combustible. La durée totale du cycle est de 11,22 h soit presque une demi-journée et 9,03h pour les coques du palmier doum. La balle de riz présente une durée du cycle plus élevée que le palmier doum. D'une manière générale, on remarque le palmier doum se dégrade plus rapidement que la balle de riz avec une durée totale de carbonisation de 9,03h contre 11,22h pour la balle de riz. Les deux durées des cycles obtenues sont nettement inférieures aux durées obtenues pour des carbonisateurs traditionnels qui peuvent durer des jours voire des semaines. Les études de la FOA (1987), souligne que ces procédés traditionnels ont une durée de cycle variant entre 12 et 14 jours avec un pic de température proche de 500°C.

### **III.2.3 Analyse immédiate et rendements**

Les résultats de l'analyse immédiate, du PCS et des différents rendements (massique et énergétique) présentés dans cette partie représentent tout comme les champs de température la moyenne de trois (3) essais de chaque étage. Le tableau 7 donne la caractérisation de la balle de riz et des coques du palmer doum brute. Le PCS est donné sur base sec (anhydre).

Tableau 7: Résultats de l'analyse immédiate et du PCS anhydre de la balle de riz et des coques du palmier doum brute comparés au bois.

Type de combustible	Taux d'humidité (%)	Taux de cendre(%)	Taux de matière volatile(%)	Carbone fixe(%)	Pouvoir calorifique supérieure (MJ/kg)
Balle de riz	5,07	19,47	71,28	9,25	16
Coque de palmier doum	6,25	5,56	80,75	13,69	19
Bois (BASU, 2013)	30-60	-	70-80	15-25	-

L'analyse immédiate des matières brutes du palmier doum et de la balle de riz résumée dans le tableau 7 nous donne un taux de carbone fixe de 13,69 % et de pouvoir calorifique supérieur de 19 MJ/kg pour le palmier doum contre 9,25% et 16 MJ/kg pour la balle de riz. Cette première analyse nous donne une idée sur les qualités énergétiques de chacune des biomasses. Il ressort de cette comparaison que le palmier doum possède un pouvoir énergétique plus élevé que la balle de riz du fait de sa teneur élevée en carbone fixe. En comparant le taux de carbone fixe des deux types combustibles à ceux du bois, on remarque que le bois possède un contenu énergétique plus élevé que ces derniers du fait de son taux de carbone fixe plus élevé (Basu, 2013).

Le tableau 8 représente le résultat de l'analyse immédiate et du PCS anhydre par étage du charbon à base de la balle de riz et des coques du palmier doum obtenu suite à la carbonisation.

*Tableau 8: Résultats de l'analyse immédiate et du PCS du charbon de la balle de riz et des coques du palmier doum par étage et les valeurs moyennes*

Type de combustible	Etage	Taux d'humidité (%)	Taux de cendre(%)	Taux de matière volatile(%)	Carbone fixe(%)	Pouvoir calorifique supérieure (MJ/Kg)
Charbon de balle de riz	Etage 3	2,41	38,41	29,03	32,55	19,12
	Etage 2	2,32	34,54	35,01	30,43	17,76
	Etage 1	3,31	37,75	31,48	30,75	17,18
	Moyenne	2,68	36,9	31,84	31,24	18,02
Charbon des coques de palmier doum	Etage 3	3,47	10,77	53,91	35,32	23,57
	Etage 2	2,47	11,371	44,21	44,42	25,44
	Etage 1	2,35	18,30	29,38	52,32	27,27
	Moyenne	2,76	13,48	42,5	44,02	25,42

Les résultats montrent que le taux d'humidité et taux des matières volatiles après carbonisation des deux biomasses ont diminué par rapport à ceux de la biomasse brute. Par contre le taux de cendre, de carbone fixe et du PCS ont augmenté suite à la carbonisation.

Le tableau 9 résume les résultats des rendements massiques et énergétiques obtenus sur base anhydre lors de la carbonisation de la balle de riz et des coques du palmier doum par étage.

*Tableau 9: Résultats des rendements massiques et énergétiques de la carbonisation de la balle de riz et de la coque de palmier doum par étage*

Type de combustible	Etage	Rendement massique (%)	Rendement énergétique (%)
Charbon de balle de riz	Etage 3	46,94	56,1
	Etage 2	67,19	74,58
	Etage 1	24,83	26,66
	Moyenne	46,32	52,44

Charbon des coques de palmier doum	Etage 3	66,41	82,41
	Etage 2	42,60	57,05
	Etage 1	21,57	30,97
	Moyenne	43,52	56,81

La figure 6 nous donne les différents charbons obtenus par types combustibles et par étages.

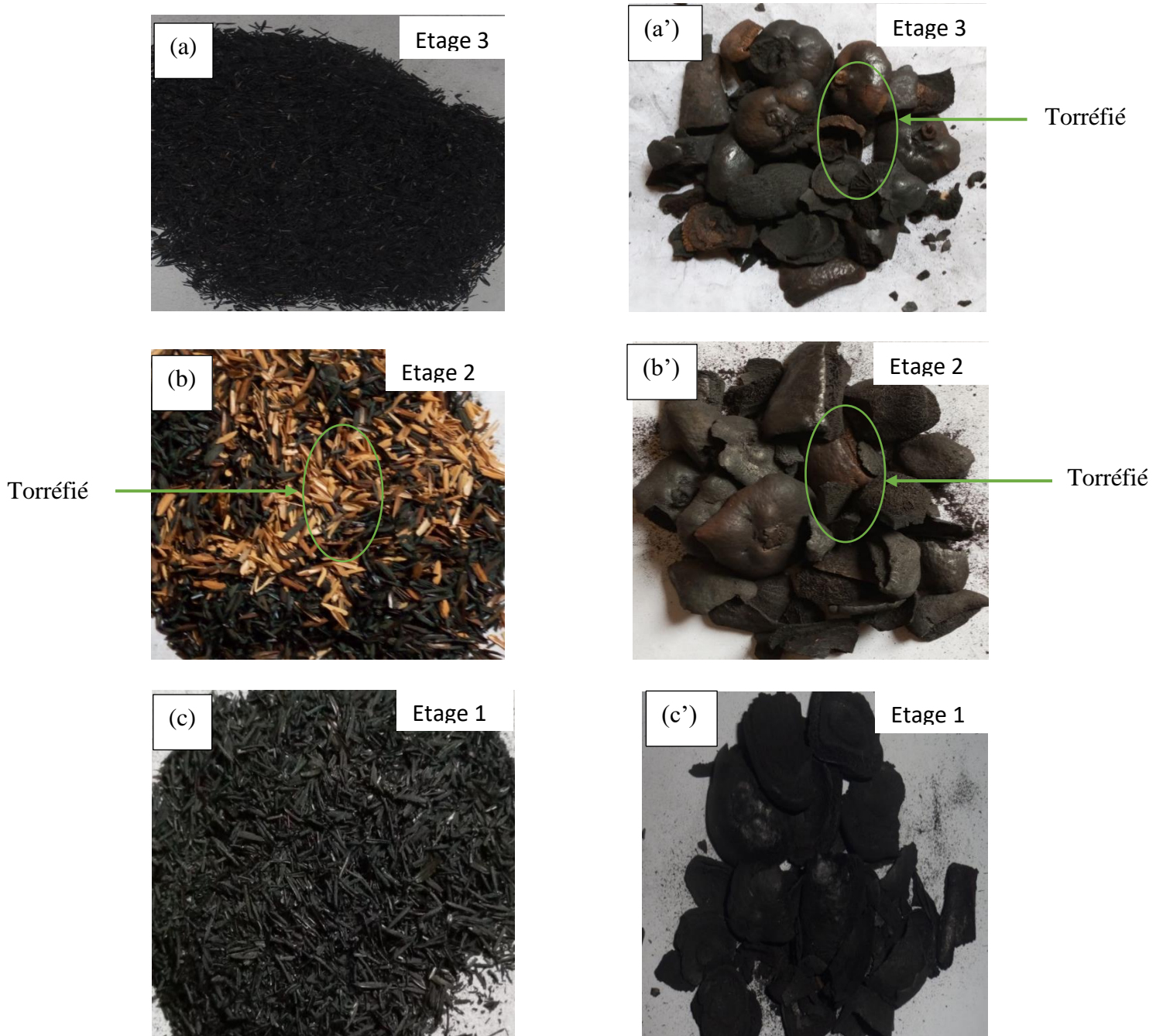


Figure 6 : charbons obtenus pour la balle de riz et le palmier doum, (a, a') étage 3 ; (b, b') étage 2 ; (c, c') étage 1.

On remarque une diminution du taux de matières volatiles et de l'humidité en passant de l'étage supérieur à l'étage inférieur du carbonisateur lors de la carbonisation des coques du palmier doum. Ceci se traduit par une augmentation de la qualité du charbon avec notamment une augmentation de son PCS et de son taux de carbone fixe. Par contre, une baisse du rendement massique et énergétique de haut en bas du carbonisateur est observée du fait de la combustion d'une plus grande quantité de biomasse de bas en haut du carbonisateur (tableau 9). Ceci est expliqué par l'augmentation du pic de la température qui résulte d'une meilleure alimentation en air du bas vers le haut du carbonisateur. En effet, plus la température augmente, plus la matière volatile et le rendement diminuent. La baisse du rendement massique et la hausse du taux de carbone fixe sont similaires au comportement du bois pendant sa carbonisation. Les travaux de Antal (2005), pour le bois montre que l'augmentation de la température provoque une diminution du rendement massique et une augmentation du taux de carbone fixe. Les résultats obtenus par étage confirment ceci, car l'étage 1 ayant été exposé à une forte température plus que les deux autres étages ( 2 et 3 ) présente un rendement faible par rapport à eux et un taux de carbone plus élevé, respectivement étage 2 par rapport à l'étage 3. Cette caractérisation du charbon obtenu nous permet aussi de nous prononcer par rapport à sa qualité au niveau des différents étages. Le charbon obtenu à l'étage 1 peut servir pour l'usage domestique et pour la gazeification, avec un taux de matière volatile situé dans l'intervalle 20 à 30% (Harouna, 2014). Quant aux charbons des deux autres étages 2 et 3 on peut les utiliser pour la gazéification. En comparant les résultats de l'étage 3 ayant subi moins de perte massique au tableau 2 présentant quelques données sur les différentes torrefactions. On remarque que les résultats de l'étage 3 pour le rendement massique, énergétique, la matière volatile, le carbone fixe, le taux de cendre et le PCS se situent dans les différents intervalles de la torrefaction sévère, ce qui nous permet de conclure que l'étage 3 a subi une torrefaction sévère. En se référant aux travaux de Blin (2005), qui stipule qu'on peut classer le charbon en fonction du taux de matière volatile et sa teneur en carbone fixe, nous pouvons comparer le résultat du charbon de l'étage 1 à ceux obtenus dans les travaux de Zeïda (2017) pour la carbonisation des tourteaux d'anacarde. Zeïda (2017), a obtenu un taux de matière volatile de 40,75% et 51,64% de carbone fixe, respectivement pour notre étage 1 des valeurs de 29,38% et 52,32%, l'analyse de ces résultats permet de dire que le charbon obtenu à l'étage 1 est meilleur que celui obtenu par Zeïda (2017) pour le tourteau d'anacarde.

Les résultats de la caractérisation du charbon de la balle de riz montrent tout comme ceux du palmier doum (Tableau 8), une diminution des taux d'humidité et des matières volatiles par rapport à la balle de riz brute et une augmentation des pourcentages de cendre et carbone fixe, ainsi que le PCS. Pour la balle de riz l'étage 1 subit plus de perte de masse que les deux autres, ensuite vient l'étage 3 par rapport à l'étage 2. Ceci s'explique par le fait que l'étage 1 a été exposé à une forte température plus que les deux autres étages. Le rendement de l'étage 3 est aussi meilleur que celui de l'étage 2 contrairement aux pics des températures observés. Les résultats de la caractérisation nous donnent un taux de carbone fixe proches pour les trois étages, alors que les rendements sont différents. Ces taux peuvent s'expliquer par le fait que l'étage 1 de la balle de riz a subi une combustion excessive, ce qui a engendré comme conséquence la production de cendre et un rendement faible, ce dernier ayant atteint son degré maximum de carbone fixe, alors même si on continue à brûler la valeur ne va pas augmenter, au contraire on provoque la production de cendre. En effet, les cendres obtenues ont été séparées du charbon et ne sont donc pas prises en compte dans la masse du charbon et le rendement massique et énergétique. Le charbon de la balle de riz issu du premier et troisième étage du carbonisateur peut servir à l'utilisation domestique du fait du taux des matières volatiles appartenant à l'intervalle de 20 à 30%, mais aussi et à la gazéification. Les charbons de la balle de riz obtenu à l'étage 2, peuvent être utilisés pour la gazéification.

Les charbons obtenus aux différents étages pour les deux (2) types combustibles montrent que le charbon issu des coques du palmier doum sont meilleurs que ceux de la balle de riz avec un taux de carbone fixe moyen de 44,02% contre 31,24% respectivement. Néanmoins, on remarque que les deux (2) types combustibles présentent des meilleurs charbons au niveau de leur étage 1 mais aussi au niveau de l'étage 3 de la balle de riz. La qualité du charbon obtenu au niveau de l'étage 1 est due à sa meilleure aération par rapport aux deux (2) derniers. En regardant l'aspect de la figure 6 ( a', b, b'), on remarque que la couleur des charbons obtenus au niveau des étages 2 et 3 du palmier doum et l'étage 2 de la balle de riz est un peu grise, cela montre l'aspect torréfié de ces derniers dû à la combustion incomplète. Ainsi pour améliorer la qualité du charbon au niveau des étages 2 et 3, il est important de revoir l'aération en rapprochant plus les entrées d'air juste au-dessous de leur lit combustible et en augmentant leurs diamètres. Cette modification du dispositif peut permettre d'envisager l'amélioration de la qualité du charbon au niveau de ces derniers (étages 2 et 3).

### **Conclusion**

Ce chapitre nous a permis d'étudier l'évolution des courbes de température, les différents rendements ainsi que les résultats de l'analyse immédiate, ce qui nous a permis d'apprécier la qualité du charbon obtenu et d'effectuer une comparaison entre le charbon du palmier doum et celui de la balle de riz.

*Conclusion générale*

La présente étude a porté sur la carbonisation des résidus d'agroforesterie et plus précisément la coque du palmier doum et la balle de riz. L'étude a été effectuée avec un dispositif métallique constitué de trois (3) étages et a consisté à déterminer les différents rendements, la qualité du charbon par étage ainsi que les durées des cycles pour chaque biomasse étudiée. Cette étude a permis de voir que la coque du palmier doum met moins de temps à se carboniser que la balle de riz avec un temps de 9,03 heures contre 11,22 heures. Ces durées sont meilleures que celles obtenues par les carbonisateurs traditionnels qui peuvent durer des jours voire des semaines. Les durées des cycles pour les deux types combustibles peuvent permettre d'envisager deux (2) tours de carbonisation par jour. Les rendements obtenus sont aussi acceptables, avec un rendement massique moyen de 43,52% contre 46,32%, un rendement énergétique de 56,81% contre 52,44% et la qualité du charbon 44,02% contre 31,24% respectivement pour les coques du palmier doum et la balle de riz. On note à ce niveau un meilleur rendement pour le palmier par rapport à la balle de riz et la qualité de son charbon est aussi meilleure que pour la balle de riz. Nous proposons comme perspectives :

- ✓ Une amélioration du dispositif en supprimant l'étage 2, en rapprochant les entrées d'air de chaque étage et en augmentant leur diamètre. Ceci permettrait d'améliorer l'alimentation en air et la qualité du charbon.
- ✓ Faire le briquetage du charbon obtenu pour une meilleure utilisation du fait de l'augmentation de la masse volumique du charbon;
- ✓ Effectuer une étude économique pour voir la rentabilité du charbon sur le marché ;
- ✓ Elargir l'étude avec d'autres types combustibles comme les tiges de mil etc.

## **Bibliographie**

- AFD & BAD.** Energie en Afrique à l'horizon 2050. Euro group consulting. Rapport d'étude. p84. 2009.
- Alexandre P.** Etude de la pyrolyse de composés lignocellulosique et modélisation de ce processus. Université de Lorraine. Thèse de doctorat. p141. 2007.
- Amir S.** Etat des lieux de la riziculture au Niger. Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture. p76. 2011.
- Adamon G.** Modélisation de la cinétique de gazéification étagée de la biomasse tropicale : cas des balles de riz et des rafles de maïs. Université de technologie de Compiègne et Université d'Abomey-calavi. Thèse de doctorat en cotutelle. p174. 2017.
- Antal M., Várhegyi G., Jakab E.** Cellulose Pyrolysis Kinetics. Resisited. Ing.Eng.Chem.Res.Journal of American Chemical Society.p18. 1998.
- Bambara L.** Développement de charbons actifs à base des coques de balanites en vue de la purification du biogaz. Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement. Mémoire de master. p59. 2014.
- Basu P.** Chapter 4 - Torrefaction, in Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction. Second Edition: p87-145. 2013.
- Benjamin V.** Torréfaction rapide à l'échelle pilote de biomasses de différentes natures et caractérisation des produits. Université de Lorraine. Mémoire de master. p70. 2012.
- Blin J.** La carbonisation-Formation-sensibilisation à la biomasse énergie. 2IE. Ouagadougou.p58. 2005.
- Bridgeman T., Jones J., Shield I., Williams P.** Torrefaction of reed canary grass, wheat straw and willow to enhance solid fuel qualities and combustion properties. Fuel 87: p844–856. 2008.
- Diedhiou A.** Étude hydrodynamique et valorisation énergétique par transformation thermochimique de déchets de biomasse pour l'alimentation d'une briqueterie. Université Assane Seck de Ziguinchor (UASZ) et de l'Université de technologie de Compiègne (UTC). Thèse en cotutelle. p193.2017.

- Eseltine D., Thanapal S., Annamalai K., Ranjan D.** Torrefaction of woody biomass (Juniper and Mesquite) using inert and non-inert gases. *Fuel* 113: p 379–388. 2013.
- FAO.** Simple Technologies for Charcoal Making. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rapport d'activités p30. 1987.
- FAO.** Situation des forêts du monde. Rapport d'activités. P156. 2007.
- **Girard P., Napoli A.** Les techniques de transformation. Dans Schenkel Y., Benabdallah B. Guide de la biomasse 2eme édition. IEFP. p133-236. 2005.
- **Harouna GADO I.** Amélioration et étude du cout de production du charbon des tiges de cotonnier. Université de Ouagadougou. Mémoire de Master. p52. 2010.
- **Harouna GADO 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. p199. 2014.
- **IEA.** World energy outlook. International Energy Agency.p21. 2007.
- Kemou G.** Analyse des contraintes à la reproduction sexuée (régénération artificielle) du palmier doum (*Hyphaene thebaica*) : cas d'une étude à la pépinière expérimentale du Centre National des Semences Forestières (CNSF). Niger. Université Abdou Moumouni de Niamey. Mémoire de Licence. p42. 2017.
- Melle F.** Production de gaz de synthèse par interactions à haute température du gaz, des goudrons et du résidu carboné issus de la pyrolyse de biomasses. Institut national polytechnique de Toulouse. Thèse de doctorat. p319. 2008.
- **Moussa H.** Germination du palmier Doum (*Hyphaene thebaica*) et analyse de son interaction avec le mil en zone semi-aride du Niger. Université Laval. Thèse de doctorat.p181 1997.
- Ndiaye I., Affoudji M., Niang I.** Carbonisation et aggro-briquetage. SENEGAL Atelier régional de capitalisation de l'expérience sahéenne en matière de carbonisation et aggro-briquetage au sahel. p11. 2004.
- Ndiaye F.** Pyrolyse de la biomasse en réacteur cyclone – recherche des conditions optimales de fonctionnement. Institut National Polytechnique de Lorraine, Thèse de doctorat. p295. 2008.

- Onana L.** Production de biochar à partir de la balle de riz : de l'étude de la ressource à la valorisation du produit. Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement. Mémoire de master.p50. 2011.
- PANA-BENIN.** Convention-cadre des nations unies sur les changements climatiques, programme d'action national d'adaptation aux changements climatiques du Bénin. Cotonou-République du Bénin.p41. 2008.
- Schenkel Y, Bertaux P, Vanwijnsberghe S, Carre J.** An evaluation of the mound kiln carbonization technique. Biomass and Bioenergy 14: p12. 1998.
- XP CEN/TS 14774-3.** Biocombustibles solides-Méthode de détermination de la teneur en humidité-Méthode par séchage à l'étuve-Partie 3 : humidité de l'échantillon pour analyse générale. Commission de normalisation AFNOR ; 2005.
- XP CEN/TS 14775.** Biocombustibles solides-Méthode de détermination de la teneur en cendre. Commission de normalisation AFNOR ; 2005.
- XP CEN/TS 14918.** Biocombustibles solides-Méthode de la détermination du pouvoir calorifique. Commission de normalisation AFNOR ; 2005.
- XP CEN/TS 15104.** Biocombustibles solides- Détermination de la teneur totale en carbone, hydrogène et azote-Méthode instrumentales. Commission de normalisation AFNOR ; 2005.
- XP CEN/TS 15148.** Biocombustibles solides-Méthode pour la détermination de la teneur en matières volatiles. Commission de normalisation AFNOR ; 2006.
- Zeïda B.** Etude de la carbonisation et du briquetage des tourteaux des coques d'anacarde: impact de la température et du taux de liant à base d'amidon. Université de Ouagadougou. Mémoire de master. p70. 2017.
- Zellagui S.** Pyrolyse et combustion de solides pulvérisés sous forts gradients thermiques. Caractérisation de la dévolatilisation des matières particulaires générées et modélisation. Université de haute-alsace. Ecole doctorale des sciences chimiques. Thèse de doctorat. p215. 2016.
- Zhu X., Venderbosch R.** A correlation between stoichiometric ratio of fuel and its higher heating value. Fuel. Vol. 84. p1007-1010.2005.

# **Annexes**

### Annexe A : Figures des étapes de la carbonisation

Les coques du palmier doum ont été d'abord séchées au soleil pendant trois (3) jours avant toute utilisation (Figure 7). L'initiation de la carbonisation commence par le bas. Pour ce faire une masse de 1 à 2 kg de charbon est utilisée pour l'ensemble du procédé. Cette quantité de charbon est allumée jusqu'à incandescence (figure 8).



**Figure 7 :** Séchage du palmier doum



**Figure 8:** Allumage du charbon

On introduit sur la grille de l'étage inférieur (étage 1) du carbonisateur une quantité de 0,5kg du charbon allumé, puis une quantité de biomasse de 100 à 300g est utilisée pour initier la réaction (figure 9). Une fois la réaction initiée, le combustible est versé progressivement jusqu'au remplissage de l'étage 3 (figure 10).



**Figure 9 :** Combustion de la quantité initiale



**Figure 10:** Remplissage de l'étage n°3

On place ensuite la grille de l'étage du milieu (étage 2) comme indiqué sur la figure 11, on procède de la même manière pour tous les étages, puis on ferme le carbonisateur. Une fois le dispositif fermé, de l'eau est utilisée pour assurer l'étanchéité (figure 12).



**Figure 11 :** Mise en place de la grille de l'étage n°2



**Figure 12:** Etanchéité en utilisant l'eau

On ferme progressivement les entrées d'air primaires respectivement secondaires en fonction de la montée des températures (figure 13). Après 7,17h et 7,72h de refroidissement respectivement pour la coque du palmier doum et la balle de riz, les températures dans l'ensemble du carbonisateur sont inférieures à 50°C. On procède au déchargement par étage, respectivement l'étage supérieur (figure 14), l'étage du milieu (figure 15) et l'étage inférieur (figure 16).



**Figure 13:** Fermeture des entrées d'air



**Figure 14 :** Déchargement de l'étage n°3



*Figure 15: Déchargement de l'étage n°2*

*Figure 16: Déchargement de l'étage n°1*

La figure 17 représente celle du charbon obtenu à la base des coques d'hyphaene thebaica lors de la carbonisation.



*Figure 17: Charbon obtenu à base des coques de l'hyphaene thebaica*

*Annexe B : Conception du carbonisateur*

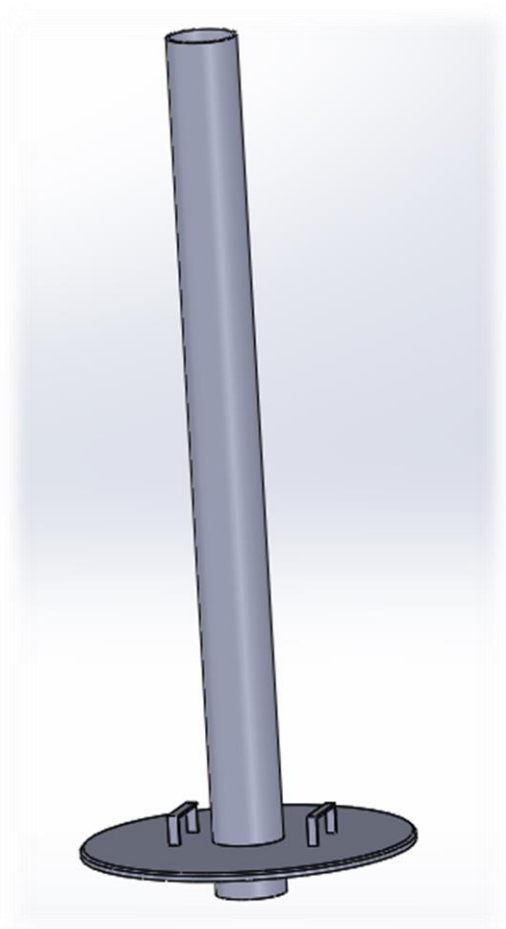


Figure 18 : Fermeture

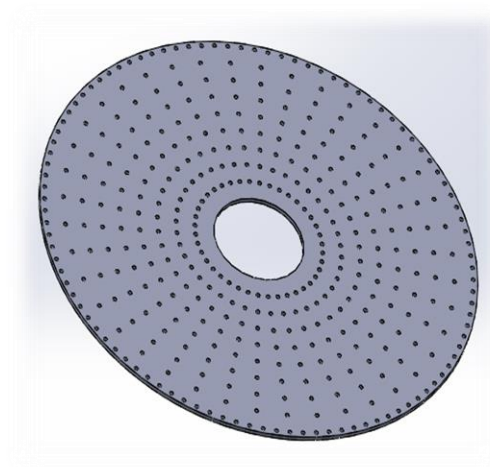


Figure 19 : Grille

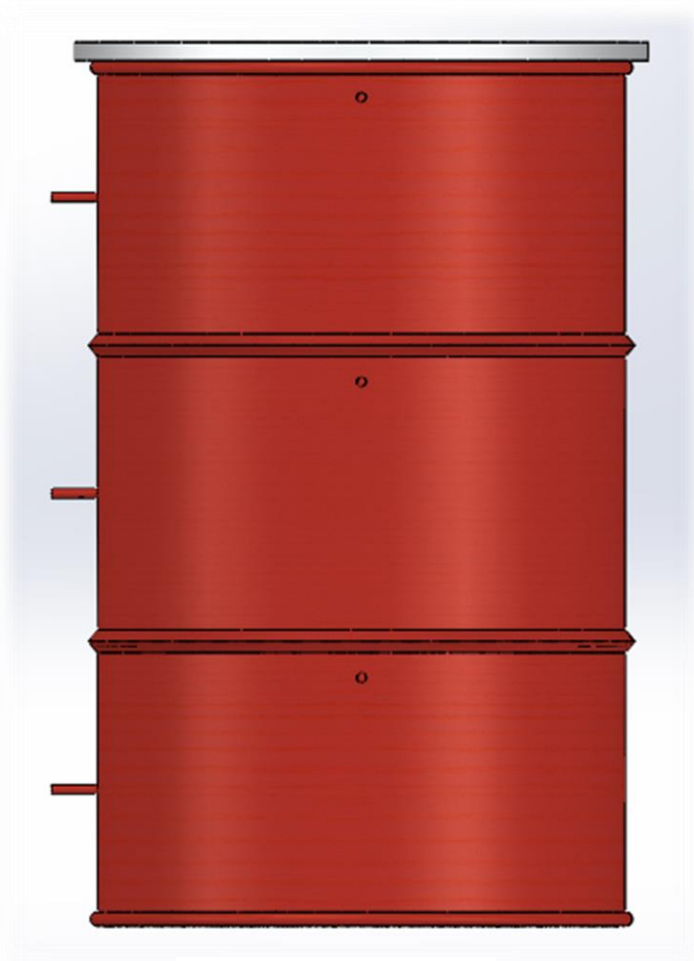


Figure 20 : Fût



Figure 21 : Cheminée

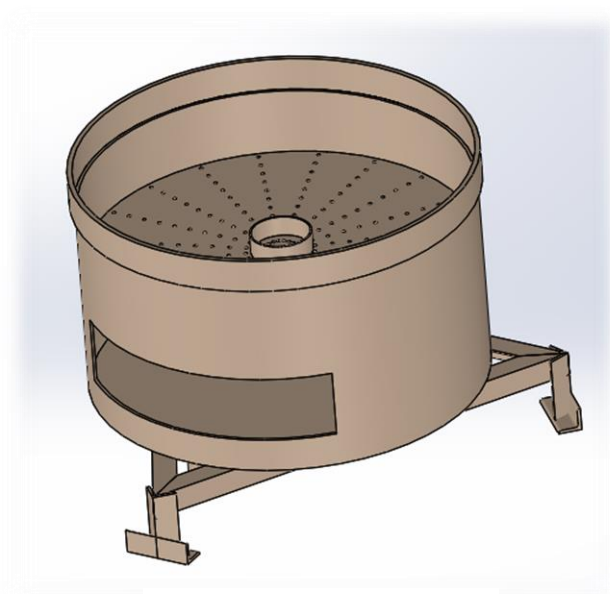


Figure 22 : Fourneau

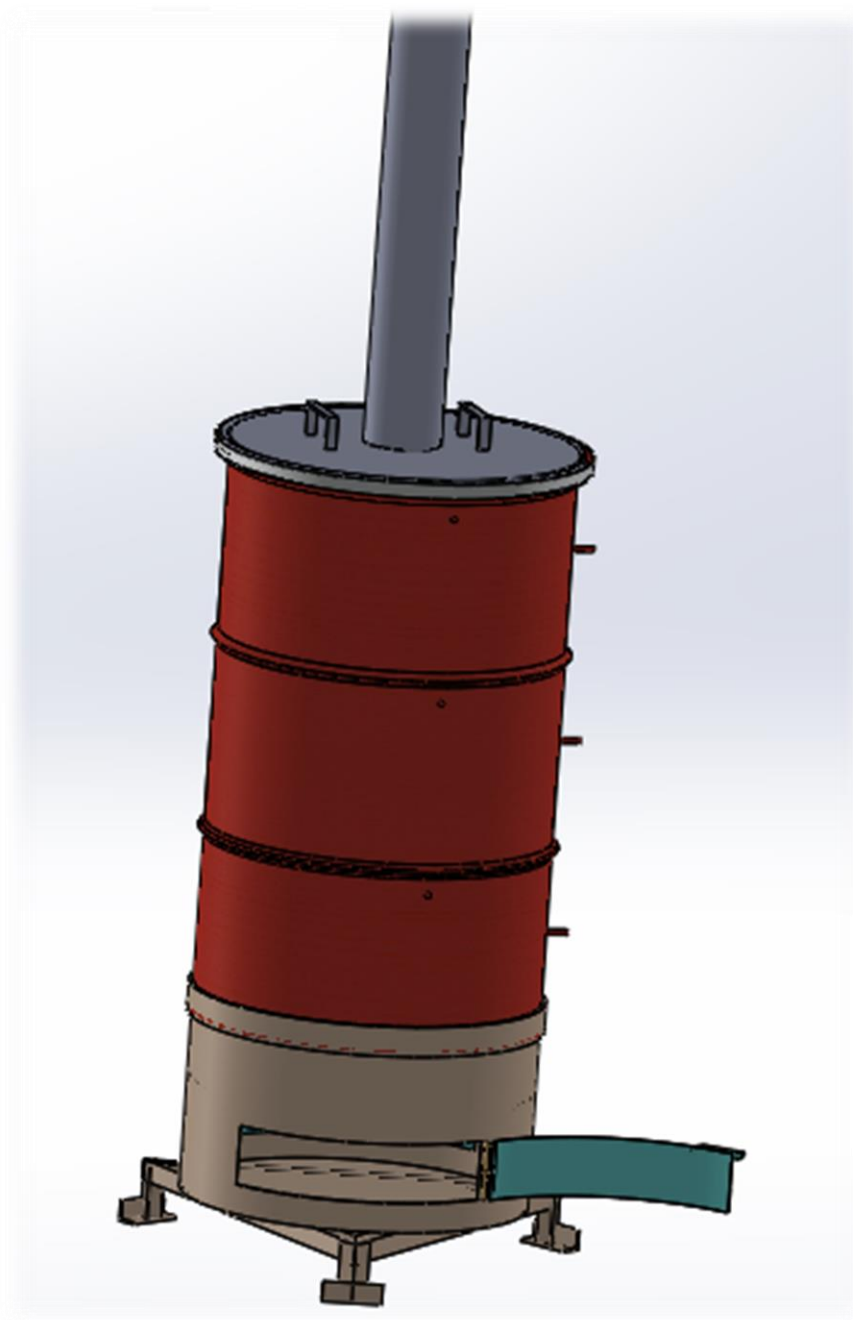


Figure 23: Carbonisateur (Assemblage)