



**PRODUCTION DE BIOCHAR A PARTIR DE LA BALLE
DE RIZ : DE L'ETUDE DE LA RESSOURCE A LA
VALORISATION DU PRODUIT**

**MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU MASTER SPECIALISE GENIE
ELECTRIQUE, ENERGETIQUE ET ENERGIES RENOUVELABLES (GEER)**

OPTION : ENERGIES RENOUVELABLES

Présenté et soutenu publiquement le 26 Septembre 2011 par

Sévérin Achille ONANA LEBONGO

Travaux dirigés par : **Dr Joël BLIN**
Enseignant Chercheur
UTER, GEI, LBEB, CIRAD

Jury d'évaluation du stage :

Président : Dr Mariam PABYAM

Membres et correcteurs : Dr Yohan RICHARDSON

M. Nathalie WEISMAN

Promotion 2010/2011

DEDICACE

*Je dédie ce travail à ma très chère maman **Stéphanie BISSOUGUI** et à ma chère grande sœur **Félicité Mbono** pour leur affection, leur sacrifice et leur amour pour moi.*

REMERCIEMENTS

Je remercie l'éternel Dieu tout puissant pour m'avoir permis de terminer ce travail.

Je remercie le Service de Coopération et d'Action Culturelle (SCAC) de l'Ambassade de France pour le financement accordé à ma formation d'ingénieur.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements au Dr Joël BLIN, responsable du Laboratoire Biomasse, Energie et Biocarburant (LBEB) au 2iE pour m'avoir accueilli dans son équipe, d'avoir accepté de diriger et d'examiner ce travail. Qu'il trouve ici le témoignage de ma respectueuse gratitude.

Je remercie tous les membres du jury pour avoir accepté de juger ce travail.

Je remercie mon maître de stage M. Justin LEKOTO, responsable de la plate forme Energies Renouvelables au Centre Songhaï de Porto-Novo Bénin pour sa disponibilité, ses conseils et suggestions.

Je remercie tous les enseignants de l'UTER GEI du 2iE pour leur précieux encadrements et conseils tout au long de notre enrichissante formation en particulier Dr Yao AZOUMAH.

Je remercie M. Guy LOUEKE responsables administratif au Centre Songhaï de Porto-Novo Bénin pour ses conseils et son soutien moral durant toute la période de stage.

Je remercie Dr Yohan RICHARDSON et le Doctorant Michael MELAZER pour leurs lectures, conseils, et propositions durant la rédaction de ce travail.

Je remercie M. Bruno PECHINE et M. Eric NANTEAU pour les conseils et surtout pour la formation sur l'instrumentation et suivi d'un moteur biocarburant in-situ qu'ils nous ont dispensés au cours de ce stage.

Je remercie tous mes camarades de promotion, pour les moments de joie et de dures épreuves que nous avons partagées ensemble, je pense à Fernandez, Magloire, Benjamin, Ouedraogo, Brigitte, Jérémy, Manu pour ne citer que ceux-là.

RESUME

L'objectif de cette étude, est la valorisation des balles de riz issues de l'unité de décortiquage de riz du Centre Songhaï de Porto-Novo (Bénin) pour la production du biochar, sur un réacteur de pyrolyse "BEC Batch Unit". Après séchage au soleil pendant deux semaines et caractérisation de la matière première, plusieurs tests techniques de fonctionnement ont été faits sur le réacteur dans le but de déterminer son régime de fonctionnement optimal pour la production privilégiée du biochar. Il en ressort que ce régime est caractérisé par une ouverture d'admission d'air global de 25%, combinée avec une ouverture d'admission d'air supérieur de 50%, pour les positions 7, 8 et 9 du variateur de vitesse du souffleur. La caractérisation du biochar obtenu donne un matériau fortement microporeux ayant un pH compris entre 8 et 9. Ce biochar a un taux de matières minérales de 61%, une densité de 0,43g/cm³ et une surface spécifique de 1448m²/g. Ces différents résultats montrent que le biochar produit peut être utilisé comme un amendement pour les sols. Une analyse économique comparative portant sur le coût de production du kilogramme de biochar entre un réacteur de pyrolyse type BEC Batch Unit fabriqué localement et celui fabriqué aux Etats-Unis, donne un coût de 45 FCFA/kg pour une fabrication locale contre 85 FCFA/kg pour une fabrication aux Etats-Unis.

Mots clés: Biochar, réacteur de pyrolyse, admission d'air, surface spécifique, porosité.

ABSTRACT

The objective of this study is the valorization of rice husk from the rice husking unit of the Centre Songhaï in Porto-Novo (Benin) for the production of biochar, a pyrolysis reactor "BEC Batch Unit". After drying in the sun for two weeks and characterization of the raw material, several technical tests have been made operational on the reactor in order to determine its optimal operating regime for the production of biochar. It appears that this regime is characterized by 25% of open air intake overall, combined with 50% of higher open air intake for 7, 8 and 9 positions of the blower's speed. The characterization of the biochar product provides a highly microporous material with a pH between 8 and 9. This biochar has 61% of minerals material, a density of 0.43g/cm³ and a surface area of 1448m²/g. These results show that this biochar can be used as a soil conditioner. A comparative economic analysis on the cost of production per kilogram of biochar from a pyrolysis reactor, type BEC Batch Unit manufactured locally and which manufactured in United States gives a cost of 45 FCFA/kg for a locally made against 85 FCFA/kg for the United States one.

Keywords: Biochar, pyrolysis reactor, air intake, surface area, porosity.

LISTE DES ABREVIATIONS

2iE : Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

BEC : Biochar Engineering Corporation

BET : Brunauer, Emmet et Teller

BRF : Bois Raméaux Fragmentés

CA : Capacité d'Absorption

CEC : Cation Exchange Capacity

CIRAD : Centre de Coopération International en Recherche Agronomique pour le Développement

EDF : Electricité de France

ESF : Electricien Sans Frontière

LBEB : Laboratoire Biomasse, Energie et Biocarburants

ONG : Organisation Non Gouvernementale

TABLE DES MATIERES

DEDICACE	i
REMERCIEMENTS	ii
RESUME	iii
ABSTRACT	iii
LISTE DES ABREVIATIONS	iv
LISTE DES TABLEAUX	vii
LISTE DES FIGURES	viii
<i>I. INTRODUCTION</i>	<i>1</i>
I.1. Contexte	1
I.2. Problématique	1
I.3. Démarche suivie	3
<i>II. OBJECTIFS DU TRAVAIL</i>	<i>5</i>
II.1. Généralités sur le biochar	5
II.2. Propriétés du biochar	5
II.3. Technique de production du biochar	6
II.3.1. Procédés de pyrolyse de la biomasse	7
II.3.2. Conditions optimales de production du biochar.....	7
<i>III. MATERIELS ET METHODES</i>	<i>9</i>
III.1. Ressources en biomasse	9
III.2. Propriété des balles de riz	9
III.3. Opération de traitement préalable des balles de riz	10
III.4. Dispositif expérimental	10
III.4.1. Description et principe de fonctionnement	10
III.4.2. Mode opératoire.....	13
III.5. Paramètres du réacteur à contrôler	14
III.6. Méthodologie de caractérisation	15

IV. RESULTATS	17
IV.1. Résultats des analyses immédiates	17
IV.2. Résultats des analyses élémentaires de la balle de riz	17
IV.3. Résultats de tests techniques de fonctionnement du réacteur	18
IV.4. Production de Biochar à partir des balles de riz	19
IV.5. Caractéristiques physico-chimiques du biochar obtenu	20
IV.5.1 Résultat des analyses immédiates du biochar	20
IV.5.2. Détermination du pH du biochar	21
IV.5.3. Détermination de la densité du biochar	21
IV.5.4. Détermination de la texture poreuse biochar	21
IV.6. Analyse économique	23
V. Impact environnemental	25
VI. DISCUSSION ET ANALYSES	27
VII. CONCLUSIONS	32
VIII. RECOMMANDATIONS - PERSPECTIVES	33
BIBLIOGRAPHIE	34
ANNEXES	38
Annexe I : Consignes de sécurité	38
Annexe II : Protocole expérimental pour la mesure du pH du biochar	39
Annexe III : Système de valorisation de la chaleur dégagée lors de la production du biochar par le réacteur de pyrolyse	40
Annexe IV : Coupe du système de valorisation de la chaleur dégagée lors de la production du biochar par le réacteur de pyrolyse	41

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Composition élémentaire de la balle de riz	9
Tableau 2: Spécifications de l'équipement	11
Tableau 3: Caractérisation de la balle de riz	15
Tableau 4: Caractérisation du biochar produit	16
Tableau 5: Appareil d'adsorption/désorption d'azote Micromeritics ASAP 2020	16
Tableau 6: Analyse immédiate des balles de riz	17
Tableau 7: Analyse élémentaire de la balle de riz.....	18
Tableau 8: Rendements massiques de production de biochar	20
Tableau 9: Analyse immédiate du biochar	20
Tableau 10: Récapitulatif des charges annuelles de l'unité de production	24

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Porosité du biochar (Downie et al., 2009)	6
Figure 2: Impact de la variation de la température sur les caractéristiques clés du biochar en agriculture.....	8
Figure 3: BEC Batch Unit	10
Figure 4: Schémas du BEC Batch Unit (Odesola et al., 2010)	11
Figure 5: Vue éclatée du réacteur de pyrolyse	13
Figure 6: Ouverture à 50% d'admission d'air dans la partie supérieur du réacteur.....	18
Figure 7: Différentes position d'ouverture d'admission d'air global.....	19
Figure 8: Bilan massique de production du biochar.....	19
Figure 9: Isotherme d'adsorption – désorption d'azote à 77 K d'un biochar	21
Figure 10: Distribution des micropores sur l'échantillon de biochar.....	23
Figure 11: Séquestration du carbone dans le biochar (Lehmann, 2009).....	25
Figure 12: Système de valorisation de la chaleur dégagée lors de la production du biochar par le réacteur de pyrolyse BEC Batch Unit	40
Figure 13: Coupe du système de valorisation de la chaleur dégagée lors de la production du biochar par le réacteur de pyrolyse BEC Batch Unit	41

I. INTRODUCTION

I.1. CONTEXTE

Le Centre Songhaï est une Organisation Non Gouvernementale (ONG) créée en 1985 par un groupe d'amis africains qui prône le développement de l'Afrique sur la base de la promotion de l'agriculture, l'élevage et la pisciculture à travers un modèle de développement décentralisé réparti dans 13 pays du continent. Songhaï développe une gamme d'activités assez variées et diversifiées qui touchent principalement trois secteurs de développement à savoir les secteurs primaires (production végétale, production animale et pisciculture), secondaires (agro-industrie, mécanique-fabrication) et tertiaires (commercialisation, marketing). Basé sur le principe de synergie, (interaction entre trois pôles : agriculture-élevage-pisciculture), le système intégré de production de ce centre recycle et valorise tous les sous-produits et déchets générés par ses diverses activités.

Dans le cadre d'une coopération technique engagée entre Electricité de France (EDF) Recherche et Développement et le Centre Songhaï de Porto-Novo au Bénin pour la mise en place d'un parc technologique d'énergies renouvelables décentralisées, s'inscrit entre autre la mise en place d'un système de renforcement du traitement et de valorisation des différents déchets. Ce renforcement passe par un apport des nouvelles technologies dans le but de compléter celles déjà existantes sur le site, voire même les comparer.

En effet, le secteur agricole et l'agro-industrie génèrent une quantité de déchet très importante au sein du site. Les déchets générés par l'activité agricole sont tout simplement broyés au moyen d'un broyeur et directement utilisés en agriculture comme fertilisant. On parle d'une utilisation BRF (Bois Raméaux Fragmenté). Pour ce qui est des déchets produits par l'agro-industrie principalement l'usine de production de riz, ils ne sont pas tous traités et réutilisés.

I.2. PROBLEMATIQUE

L'usine de production de riz à travers l'unité de décorticage génère deux types de déchets à savoir le son de riz et les coques de riz. Le son de riz est utilisé pour la fabrication de la provende pour la volaille tandis que les coques de riz sont déversées dans la nature et abandonnées en pure perte. En effet, la production moyenne de riz est estimée à 30.000 tonnes par ans. La balle de riz représente un poids de 20% du riz produit, soit une quantité de 6.000 tonnes de balles de riz en moyenne par an.

Cette importante quantité de matière non valorisée jusqu'ici constitue une ressource importante en biomasse valorisable à des fins énergétiques et même agricoles donnant ainsi un soulagement aux différents secteurs y afférents.

C'est dans cet optique que le Centre Songhaï de Porto-Novo-Bénin et ses partenaires (EDF R&D, ESF), en collaboration l'Institut Internationale d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) à travers le Laboratoire Biomasse Energie et Biocarburants (LBEB) ont proposé le thème de stage portant sur la production du biochar à partir de la biomasse sèche : de l'étude de la ressource à la valorisation du produit.

Le terme 'biochar' est l'abréviation du mot anglais 'bio-charcoal' qui désigne un charbon d'origine végétale obtenu par pyrolyse de la biomasse végétale d'origine diverse, généralement des déchets de scierie ou des résidus agricoles (Lehmann, 2009). Il se présente sous forme de petits fragments noirs, légers et extrêmement poreux. Composé en majeure partie de carbone, sa composition n'est pas exactement définie car elle va dépendre de la nature de la biomasse utilisée ainsi que du processus de pyrolyse (Warnock et al., 2007).

L'intérêt de ce sujet réside dans le fait que le produit biochar, de part ses caractéristiques (composition chimique, porosité) serait un amendement permettant d'améliorer la fertilité et la stabilité des sols cultivés d'une part et d'autre part de stocker du carbone dans les sols à moyen et à long terme, réduisant ainsi la nécessité de l'utilisation de certains intrants chimiques et d'engrais en agriculture (Glaser et al., 2002). Sur cette base, nous voulons produire au terme de cette étude, un biochar de "bonne qualité" obtenu à partir des balles de riz collectionnées directement sur le site dont nous connaissons en amont la composition chimique élémentaire tout en déterminant le régime de fonctionnement optimal pour la carbonisation du réacteur de pyrolyse utilisé (BEC Batch Unit).

Des études réalisées par Lehmann et al. en 2003 ainsi que Glaser et al. en 2002 ont révélé que l'apport du biochar dans le sol montre des améliorations significatives en terme de rendement de production des cultures. Actuellement, cette technologie est en pleine expansion dans de nombreux pays notamment au Sénégal, où l'ONG Pro-Natura International a installé un réacteur pilote « Pyro-6F » dans la région Ross Béthio, un village situé à 300 km au Nord de Dakar depuis 2008. Des études menées sur ce réacteur révèlent que son rendement (poids de biochar produit par rapport au poids de la biomasse à 15% d'humidité) atteint 30% à 40% selon le type de biomasse (Lehmann J. et al., 2006).

Des études ont été réalisées par Mullen et al. (2009), sur la production de biochar et bio-huile à partir des déchets de maïs (tiges, feuilles et épis) par pyrolyse rapide en utilisant un réacteur

pilote à lit fluidisé. Ces résultats révèlent un rendement de 60% de bio-huile ; pour ce qui est du rendement en biochar, il trouve que celui-ci diffère en fonction de la biomasse introduite ; ainsi le rendement en biochar est de 18,9% en utilisant comme biomasse épis des maïs et 17% en utilisant les tiges et les feuilles.

Demirbas (2006) a mené une étude sur la pyrolyse lente de déchets de bois et des résidus agricoles tels que les coquillettes de noisettes et des pailles de blé à haute température (950 – 1250 K) dans un réacteur cylindrique, révélant l'influence des facteurs tels que la température, la taille des particules et le contenu en matière inorganique de la biomasse sur le rendement en biochar. Il en ressort que lorsque la température de pyrolyse est élevée avec de petites particules de biomasse, le rendement en biochar diminue. De plus, lorsqu'une biomasse a une teneur élevée en lignine, son rendement en biochar est plus élevé. C'est le cas pour les coquillettes de noisettes (taux de lignine élevé) par rapport aux déchets de bois (taux de lignine moins élevé).

Ces différents résultats nécessitent d'être confrontés à d'autres, raison pour la quelle nous travaillons sur la mise en place des tests technico-économiques sur un réacteur de pyrolyse (BEC Batch Unit) afin de non seulement déterminer le régime thermique optimal de fonctionnement pour la production privilégiée du biochar, mais aussi de comprendre pratiquement les différents procédés mis en œuvres lors du déroulement de la réaction de pyrolyse, notamment, la demande en énergie.

1.3. DEMARCHE SUIVIE

La méthodologie retenue dans ce travail de mémoire de fin d'étude est basée uniquement sur une approche expérimentale et s'est déroulée selon la chronologie ci-après :

- Etude bibliographique détaillée des technologies de production de biochar et leurs différentes applications ainsi que les technologies existantes.
- Evaluation du potentiel biomasse disponible sur le site du Centre Songhaï de Porto-Novo, étude du mode de fonctionnement de la machine BEC Batch Unit à travers les fiches techniques, installation du réacteur sur la plate forme.
- Début des différents tests sur le réacteur avec la ressource appropriée disponible.

Dans ce document, nous allons dans un premier temps donner les objectifs à atteindre à la fin de nos différents tests. Ensuite nous décrivons le réacteur de pyrolyse "BEC Batch Unit", ses différents accessoires, ainsi que son mode de fonctionnement et d'utilisation. Enfin nous présenterons les différents résultats obtenus. A l'issue des différents tests, nous ferons une discussion et une analyse des différents résultats et nous terminerons par une conclusion et des perspectives/recommandations.

II. OBJECTIFS DU TRAVAIL

II.1. GENERALITES SUR LE BIOCHAR

Le biochar (aussi appelé biocharbon) est un charbon végétale produit par pyrolyse de biomasse qui possède des propriétés lui donnant comme principale utilité l'amendement des sols. L'intérêt récent pour l'usage du biochar en agriculture résulte de l'étude des sols anthropogéniques, c'est-à-dire formés par l'accumulation des résidus de combustion lente des déchets organiques, dans le bassin amazonien incluant le Brésil, le Pérou et la Colombie. Ces sols, dits *Terre Preta*, ou « Terre noire », sont beaucoup plus fertiles que les sols environnants, même des siècles après qu'on ait cessé d'appliquer le charbon (Lehmann et al. 2003b).

II.2. PROPRIETES DU BIOCHAR

Les éléments constituant le biochar sont produits par carbonisation de la biomasse. En fonction des températures atteintes lors de la pyrolyse et de la nature de la biomasse initiale, les propriétés physiques et chimiques du produit biochar obtenu peuvent varier (Keech et al. 2005, Gundale et Deluca, 2006). Le biochar a plusieurs caractéristiques physiques qui font de lui un élément bénéfique pour les terres agricoles. Les caractéristiques principales sont :

➤ La Densité

La densité du biochar est faible par rapport à celle du charbon de bois utilisé pour la cuisson des aliments. Les travaux de Downie et al., (2009) ont montré que la densité du biochar dépend de la nature de la biomasse ainsi que de la température à laquelle il est produit. Mais d'une manière générale, elle varie entre 0,2 et 0,8g/cm³. L'ajout d'un biochar de faible densité au sol permet de l'améliorer sur deux plans : premièrement, il réduit la densité massique du sol permettant aux racines des plantes de pénétrer dans le sol pour mieux se développer ; deuxièmement, il favorise une forte rétention d'humidité.

➤ La surface spécifique et la porosité

Le biochar présente une grande surface spécifique qui peut varier entre quelques centaines à 3000m²/g (Downie et al., 2009). Cette grande surface spécifique constitue un abri pour les microorganismes et un lieu de stockage des nutriments du sol (Chan et Xu, 2009).

Le biochar est constitué de milliers de pores qui sont formés lors de la pyrolyse. Pour cette raison, il est en mesure d'absorber jusqu'à cinq fois son poids propre en eau ainsi que les éléments nutritifs qui s'y trouvent sous forme diluée (Prins et al., 2011). On appelle cette caractéristique la capacité d'absorption (CA) du biochar. Cette capacité est fonction du type de biomasse pyrolysé et de la température de pyrolyse. (Mullen et al., 2010).

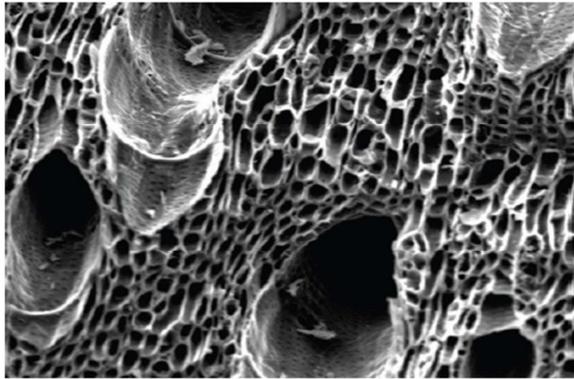


Figure 1: Porosité du biochar (Downie et al., 2009)

La figure 1 ci-dessus présente un cliché de microscopie électronique à balayage d'un biochar dont la surface spécifique créée par la combinaison des macropores et micropores est comprise entre $200\text{m}^2/\text{g}$ et $400\text{m}^2/\text{g}$ (Downie et al., 2009).

➤ Le pH et la capacité d'échange en cations (CEC)

Bien que la plupart du biochar ait un pH basique (entre 8 et 9,5), certains biochars ont un faible pH (entre 7,2 et 8) lié au taux de minéraux contenu dans la biomasse (Chan et Xu, 2009). Il aide par conséquent à la neutralisation des sols acides (Wani, 2010).

Le biochar est chargé négativement. Ceci lui permet de fixer des cations du sol et d'avoir ainsi une grande capacité d'échange en cation (CEC). Il retient les cations du sol par adsorption électrostatique et en restitue l'essentiel (potassium, magnésium, calcium etc.) nécessaire à la croissance de la plante (Liang et al., 2006).

II.3. TECHNIQUE DE PRODUCTION DU BIOCHAR

La pyrolyse de la biomasse est la base de la production du biochar. Il existe cependant plusieurs types de procédés.

II.3.1. Procédés de pyrolyse de la biomasse

La pyrolyse correspond à la décomposition de la biomasse sous l'action de la chaleur en l'absence d'oxygène pour donner des produits solides (biochar), liquides (vapeurs condensables) et gazeux (H_2 , CO, CO_2 , hydrocarbures légers). Les fractions de ces différents produits dépendent fortement des conditions opératoires (température, conditions de chauffage) et du type de produit recherché.

On distingue deux grands types de pyrolyse à savoir (Mermoud, 2006) :

➤ **La pyrolyse lente** dont l'ultime objectif est la production du charbon, d'où son appellation de procédé de carbonisation. On distingue trois modes opératoires de carbonisation (Ndiaye, 2008) :

- La carbonisation par combustion partielle : l'énergie nécessaire à la carbonisation est fournie par la combustion d'une partie de la charge. C'est ce procédé qui sera 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 chauds : l'énergie est fournie par la mise en contact direct de la charge et d'un gaz chaud provenant d'un foyer externe.

➤ **La pyrolyse rapide ou flash** nécessite un transfert rapide d'énergie entre la biomasse et le milieu environant dans un temps caractéristique de l'ordre de la seconde. Trois types de moyens de transfert existent (Couhert, 2007) :

- chauffage par gaz ou matériau caloporteur : gaz inerte ou vapeur d'eau, billes métalliques, sable, métaux fondus, sels fondus ;
- chauffage direct par contact à la paroi : le transfert de chaleur se fait à travers les parois du réacteur ;
- oxydation partielle : un débit d'oxygène assure une combustion partielle de la biomasse.

Ce type de pyrolyse favorise la production de liquide (bio-huile). Le rendement en terme de quantité de biochar produit n'est pas important, mais sa teneur en carbone est très élevée.

II.3.2. Conditions optimales de production du biochar

La production du biochar dans les conditions optimales dépend fortement non seulement de la température de pyrolyse mais aussi de certains paramètres caractéristiques de la biomasse.

Lehmann (2003), dans ses travaux a étudié l'impact de la variation de la température de pyrolyse sur quatre paramètres clés, conférant au biochar des caractéristiques favorables pour leur utilisation comme un amendement pour les sols (voir figure 3). Ces paramètres sont : la capacité d'échange cationique (CEC), la surface spécifique, le pH, le carbone contenu dans le biochar. Signalons que ce biochar a été produit à partir des résidus forestiers.

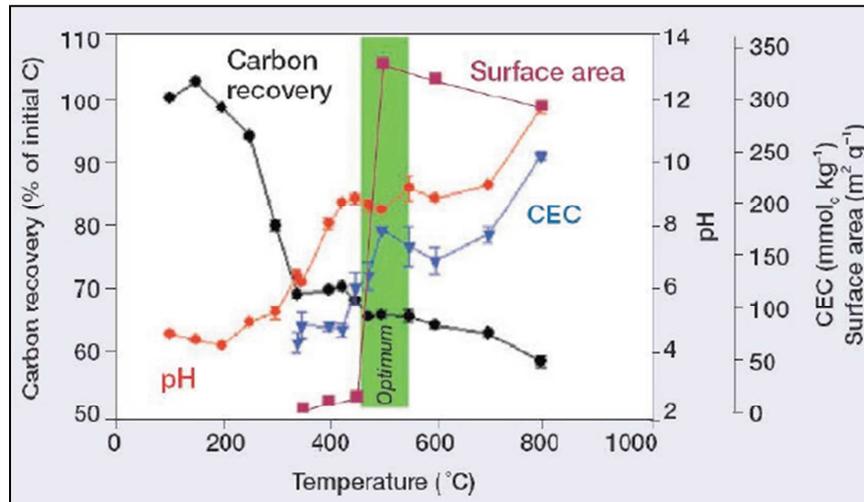


Figure 2: Impact de la variation de la température sur les caractéristiques clés du biochar en agriculture obtenu à partir de résidus forestier (Lehmann, 2003)

Sur cette figure, il ressort une zone dite “zone de production optimale du biochar” qui se caractérise par une température comprise entre 450°C et 550°C, une surface spécifique comprise entre 315m²/g et 325m²/g, une capacité d'échange cationique comprise entre 125mmol/kg et 175mmol/kg et un pH compris entre 8,5 et 9. En effet, le facteur indicatif pour la délimitation de cette zone est la surface spécifique la plus élevée. La teneur en carbone contenu dans le biochar dans cette zone est presque constante ; soit environ 65%.

Le présent mémoire est orienté vers les objectifs suivants :

- Montage et mise en œuvre du réacteur de pyrolyse BEC Batch Unit sur la plate forme énergie renouvelable du Centre Songhai de Porto-Novo;
- Identification des différents types de biomasses disponibles sur le site adaptées pour le fonctionnement du réacteur ;
- Tester la ou les biomasses appropriées dans le réacteur et établir un bilan technico-économique pour la production du biochar ;
- Déterminer les caractéristiques physico-chimiques du biochar obtenu essentiel pour son utilisation en agriculture.

III. MATERIELS ET METHODES

Il est question dans cette partie de recenser les différentes matières premières disponibles au sein du centre Songhaï de Porto-Novo et d'identifier celles adaptées pour la production du biochar, de décrire le dispositif expérimental utilisé ainsi que le mode opératoire.

III.1. RESSOURCES EN BIOMASSE

Les résidus agricoles constituent la principale ressource en biomasse disponible sur le site. Elles existent en grande quantité et sont récoltées tous les jours (environ 2 tonnes/jour) dans les différentes sections de production agricole. Jusqu'à présent, le seul mode de valorisation est le broyage et le compostage pour une utilisation BRF en agriculture.

Les balles de riz existent en grande quantité et sont entassées sur place depuis plusieurs années. En effet, la production moyenne de riz est estimée à 30.000 tonnes par ans. La balle de riz représente un poids de 20% du riz produit, soit une quantité de 6.000 tonnes de balles de riz en moyenne par an ; une quantité énorme donc le produit de la valorisation serait non négligeable.

III.2. PROPRIETE DES BALLEES DE RIZ

La balle de riz est principalement constituée de polysaccharides ; mais, peu de travaux existent sur sa composition chimique exacte. Certains scientifiques rapportent cependant l'analyse élémentaire de cette dernière ainsi que la nature des éléments minéraux présents (voir tableau ci-dessous).

Tableau 1: Composition élémentaire de la balle de riz

Teneurs pondérales							PCI (MJ/kg)
Références	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)	Cendres (%)	
Kaupp*	41	5	37,6	0,6	-	15,5	15,5-16,2
Cruz*	35,8	5,2	35,8	-	-	23,5	14
Beagle*	42,12	5,35	31,72	0,49	0,07	-	-
Mansaray et Ghaly (1997)	37,6-44,5	5,1-5,42	31,5-35,2	0,38-0,51	0,015-0,034	-	14,7-18,3

* in Neya (2002).

Ces résultats montrent un teneur en carbone moyenne au sein de la balle de riz d'environ 40%. Leur utilisation comme matière première pour la production du biochar utilisable en

agriculture peut s'avérer intéressant puisque d'après Lehmann (2007), le fait de soumettre une biomasse à la pyrolyse implique une perte de 50% du carbone initialement présent. Le carbone restant une fois dans le sol absorbe des substances phénoliques générés par la décomposition de la matière organique ; ce qui a un impact favorable sur les micro-organismes qui facilite la disponibilité de l'azote dans le sol.

III.3. OPERATION DE TRAITEMENT PREALABLE DES BALLEES DE RIZ

Les balles de riz ont été déplacées de l'unité de décorticage, puis séchées au soleil pendant 14 jours puisque sa teneur en humidité était de 18%, pour avoir un taux d'humidité assez faible (autour 10%). Elles ont ensuite été mises dans des sacs et conservées dans un magasin (à l'abri de la pluie et de l'humidité) en attendant leur utilisation dans le réacteur de pyrolyse.

III.4. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

III.4.1. Description et principe de fonctionnement

Pour ce travail, nous avons utilisé un réacteur de pyrolyse fabriqué par une compagnie américaine du Golden Colorado aux Etats Unis au nom de *Biochar Engineering Corporation*. Le « BEC Batch Unit », c'est son nom (Voir figure 4), est un réacteur de pyrolyse qui a pour principale fonction la production du biochar.

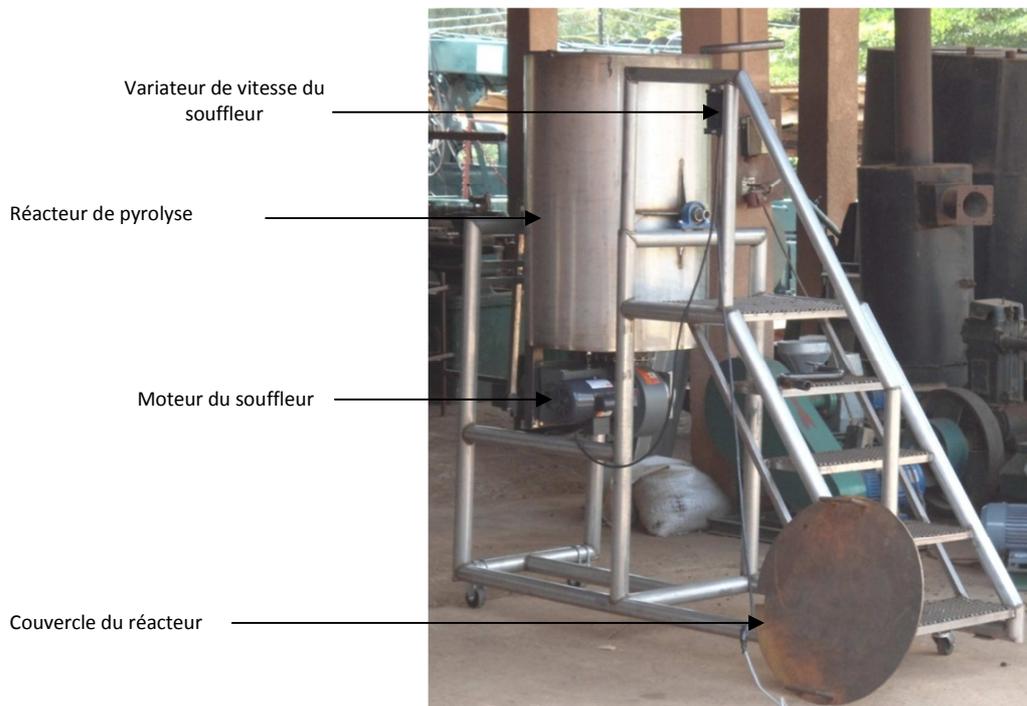


Figure 3: BEC Batch Unit

Nous l'avons installé sur le site du Centre Songhaï de Porto Novo au Bénin. Il peut convertir les copeaux de bois, les coques d'arachides, les balles de riz, les petits ballots de pailles (pailles compactées) et les résidus agricoles séchés en biochar. Il a une capacité de production moyenne de 5kg/h de biochar ; d'une manière générale, les caractéristiques de la biomasse à l'entrée (nature de la biomasse, taux d'humidité) détermineront les conditions d'exploitations et les produits en sorties (quantité et qualité du biochar obtenu).

Le tableau ci-dessous donne les spécifications globales de l'équipement données par le constructeur.

Tableau 2: Spécifications de l'équipement

Longueur	2 mètres
Largeur	1 mètre
Hauteur	2,1 mètres
Masse	350 kilogrammes
Puissance électrique	75 Watts

Son principe de fonctionnement est illustré par la figure ci-dessous (Figure 5). La pyrolyse au sein du réacteur se fait sous atmosphère contrôlée. Pendant la pyrolyse, le réacteur est complètement fermé.

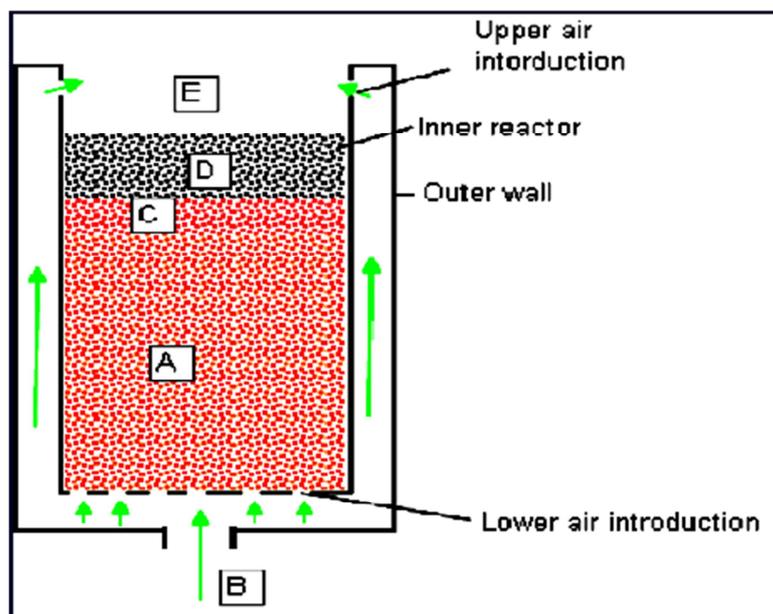


Figure 4: Schémas du BEC Batch Unit (Odesola et al., 2010)

Description :

Zone A : Le réacteur de pyrolyse est rempli de biomasse sèche.

Zone B : L'air est soufflé en direction du réacteur où elle pénètre dans celui-ci dans les parties inférieure et supérieure. La biomasse est enflammée dans la partie supérieure du réacteur en utilisant un chalumeau au propane pour commencer la pyrolyse.

Zone C : L'air entrant de la partie inférieure réagit avec la biomasse dans la zone de pyrolyse.

Zone D : La réaction se produit pour donner du biochar ainsi que les gaz combustibles.

Zone E : Les gaz combustibles réagissent avec l'air introduite dans la partie supérieure du réacteur pour brûler, entraînant ainsi la combustion de la biomasse jusqu'à ce que la zone de pyrolyse (Zone C) atteigne le fond (fin de la réaction et l'air doit être coupée).

Le réacteur doit alors être vidé, refroidit et rempli à nouveau ; le processus peut reprendre. Il est clair de noter ici que l'évolution de la pyrolyse dans le réacteur se fait du haut vers le bas et les gaz incondensables s'échappent du réacteur par le haut.

La source d'air au sein du réacteur est gérée par un système d'admission d'air comportant un souffleur entraîné par un moteur électrique de marque Dayton ayant une vitesse de rotation maximale de 1425tr/min (voir figure 3) et d'un dispositif qui permet de contrôler l'admission globale de l'air (voir figure 5). Le système d'admission d'air est commandé par un variateur de vitesse du souffleur gradué de 1 à 10 (voir figure 3).

L'air introduit dans la partie supérieure du réacteur est contrôlé par un variateur de flux d'air qui est constitué d'une couronne comportant des petits trous et que l'on peut faire pivoter à l'aide d'un poignet (voir figure 5). Lorsque les trous du variateur de flux d'air coïncident avec les trous situés sur le cylindre intérieur du réacteur, le flux d'air dans la partie supérieure est maximal et on tend à avoir un excès d'air pour la combustion au sein du réacteur. Il est indiqué de ne pas faire coïncider les trous du variateur de flux d'air avec ceux situés sur le cylindre intérieur.

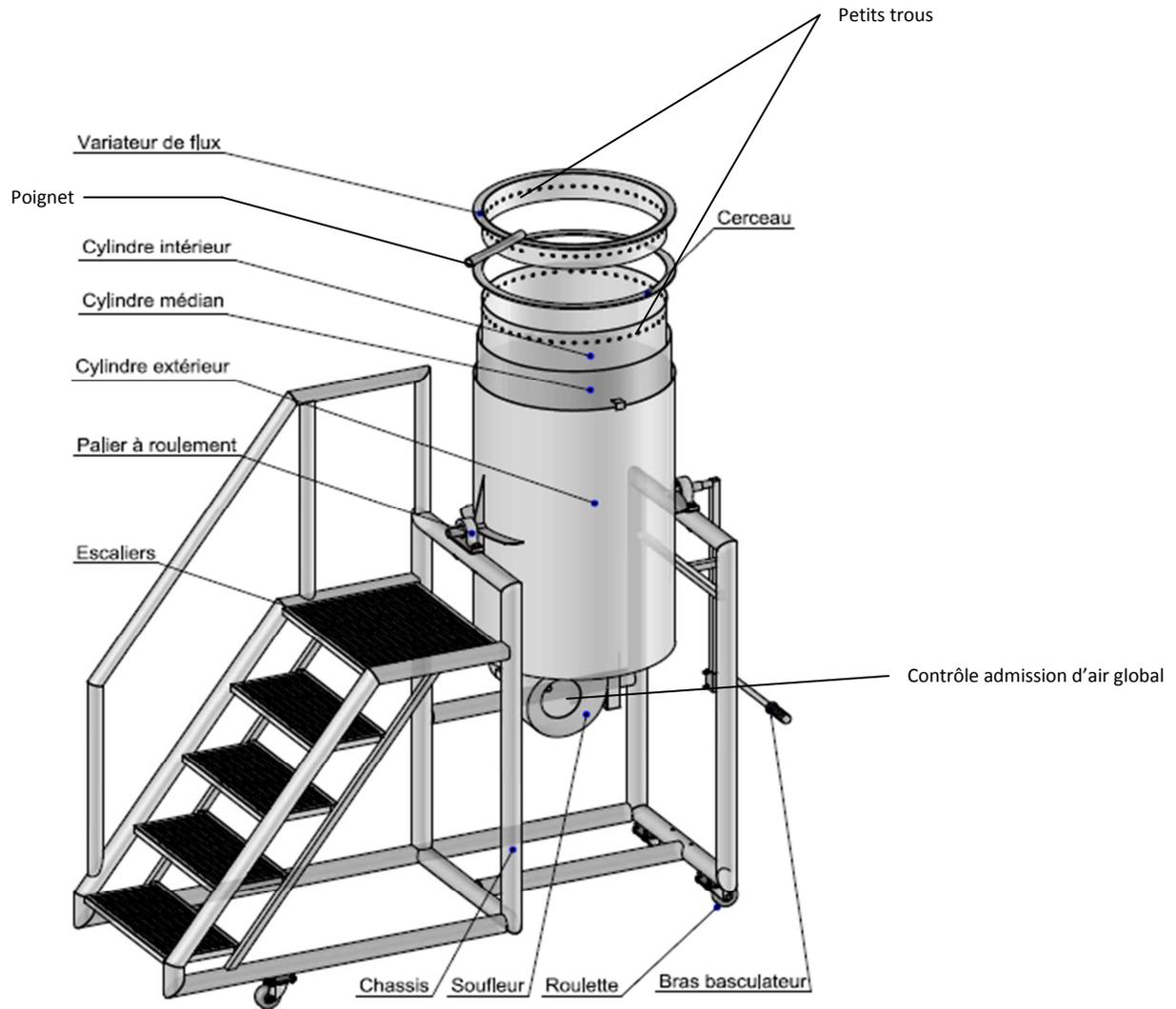


Figure 5: Vue éclatée du réacteur de pyrolyse

III.4.2. Mode opératoire

Tous les tests effectués ici sur la production de biochar sont faits avec des biomasses ayant une granulométrie comprise environ entre 7mm et 10mm. Ils sont décrits selon le protocole suivant :

- Placer l'appareil loin de tout objet inflammable (environ 5 mètres), connecter le à une prise électrique et le maintenir dans sa position verticale en vissant le bras basculant sur le châssis.

- Introduire une masse de 23kg de balles de riz préalablement séchées dans le réacteur de pyrolyse. Dans ces conditions, il est presque plein.
- Mettre en marche le système d'admission d'air en appuyant sur le bouton "ON" situé près du variateur de vitesse du souffleur.
- Régler le variateur de vitesse sur une position désirée.
- Ajuster le dispositif de contrôle d'admission d'air globale au sein du réacteur à une ouverture adéquate ainsi que le variateur de flux d'air supérieur sur la position désirée en tournant le poignet.
- Enflammer la biomasse à partir du haut en utilisant un chalumeau au propane pour commencer la pyrolyse pendant une à deux minutes.
- Refermer complètement le réacteur à l'aide de son couvercle.
- Attendre pendant un certain temps pour que les balles de riz introduites dans le réacteur soient entièrement carbonisées.
- Arrêter le système d'admission d'air en appuyant sur le bouton **OFF** et dévisser le boulon reliant le bras basculant au châssis.
- Faire pivoter le réacteur pour déverser le biochar produit dans un fût métallique placé juste en dessous du réacteur. Refermer le fût et laisser le biochar se refroidir jusqu'à la température ambiante.
- Laisser le réacteur de pyrolyse se refroidir avant d'ajouter à nouveau de la biomasse. On peut accélérer le refroidissement du réacteur en utilisant le souffleur d'air. Les consignes de sécurité à respecter lors de l'utilisation du réacteur sont mentionnées en annexe (voir annexe 1).

III.5. PARAMETRES DU REACTEUR A CONTROLER

Pendant le déroulement de la réaction, il existe un certain nombre de paramètre à contrôler pour que l'on ait en sortie le biochar comme principal produit. Ces paramètres sont :

◆ L'admission d'air

Elle est gérée ici à deux niveaux : l'admission d'air globale qui est contrôlée par un dispositif que l'on peut ouvrir ou fermer et l'admission d'air dans la partie supérieure du réacteur qui est contrôlée par un variateur de flux d'air.

D'une manière générale, l'admission d'air dépend fortement de la vitesse du souffleur. Un

compromis doit être établi ici entre les différentes admissions d'air et la vitesse du souffleur pour produire le biochar dans les conditions optimales.

◆ Temps de séjour de la biomasse

Le temps est un facteur important qu'il faut prendre en compte lors de la production du biochar surtout si elle se fait à grande échelle. Pour le contrôle de ce paramètre délicat, nous avons installé un capteur de température sur la partie inférieure du cylindre extérieur du réacteur (à 10cm du fond) pour pouvoir à partir d'une certaine valeur de la température (40°C) arrêter le fonctionnement du réacteur.

◆ Température

C'est un facteur déterminant qui dépend de la qualité de la biomasse et a une grande influence sur le rendement en biochar.

Conformément aux normes françaises (AFNOR, 1984), le biochar résulte de la pyrolyse réalisée entre 600°C et 800°C ; elle appartient à la classe A (Antal M.J. et al., 2005 ; Encinar J.M, et al., 1996 ; Fassinoua W.F et al., 2009). Dans le cas de nos tests, nous déterminerons à l'aide d'un thermocouple notre plage de température pour voir si notre production est conforme à la norme.

III.6. METHODOLOGIE DE CARACTERISATION

Les différentes caractérisations des échantillons (biomasses – biochar) ont été effectuées suivant la méthodologie suivante :

✓ Biomasse initiale

Tableau 3: Caractérisation de la balle de riz

Types d'analyses	Références (normes)	Lieu de l'analyse
Analyses immédiates	PR 2-PA-BH LBEB-ABH2 AFNOR NF EN 1860-2 XP CEN/TS 15148 MO3-004	LBEB – 2iE
Analyses élémentaires	XP CEN/TS 15104	CIRAD - Montpellier

✓ **Produit biochar obtenu**

Tableau 4: Caractérisation du biochar produit

Types d'analyses	Référence (normes)	Lieu de l'analyse
Analyse immédiate	PR 2-PA-BH LBEB-ABH2 AFNOR NF EN 1860-2 XP CEN/TS 15148 MO3-004	LBEB – 2iE
pH	Wani, 2010	Centre Songhaï
Densité	Hermosilla-Lara, 2007	LBEB – 2iE
Porosité – surface spécifique	Sing et al., 1985	LBEB – 2iE

La porosité et la surface spécifique ont été déterminées par la manométrie d'adsorption d'azote à l'aide de l'équipement Micromeritics ASAP 2020 illustré sur la figure ci-dessous.



Tableau 5: Appareil d'adsorption/désorption d'azote Micromeritics ASAP 2020

IV. RESULTATS

Dans cette partie, nous présenterons l'ensemble des résultats que nous avons obtenu tout au long de ce travail.

IV.1. RESULTATS DES ANALYSES IMMEDIATES

L'analyse immédiate des balles de riz prélevés sur le site a été faite au Laboratoire Biomasses, Energie et Biocarburants du 2iE. Les calculs du taux de cendre et du taux de matières volatiles ont été faits sur la base de matières sèches. Le carbone fixe a été déterminé par différence. Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 6: Analyse immédiate des balles de riz

<i>Paramètre</i>	<i>Balles de riz</i>
<i>Analyse immédiate</i>	(%)
<i>Humidité</i>	12,88
<i>Cendres</i>	21,47
<i>Matières volatiles</i>	66,32
<i>Carbone fixe</i>	12,21

Au regard de ces résultats, on constate que nos balles de riz sont constituées en majorité de matières volatiles de plus ce qui implique probablement un fort dégagement de gaz pendant la pyrolyse.

IV.2. RESULTATS DES ANALYSES ELEMENTAIRES DE LA BALLE DE RIZ

La détermination de la teneur en C, H et N des balles de riz a été faite au Laboratoire du CIRAD à Montpellier en France suivant la norme XP CEN/TS 15104 (détermination de la teneur totale en C, H, et N dans les Biocombustibles solides). Le calcul des différentes teneurs a été fait sur la base de matière sèche. Le tableau ci-dessous présente les résultats obtenus:

Tableau 7: Analyse élémentaire de la balle de riz

<i>Paramètres</i>	<i>Balles de riz</i>
<i>Analyse C,H,N</i>	<i>(%)</i>
<i>Teneur en Carbone</i>	<i>36,35</i>
<i>Teneur en Hydrogène</i>	<i>5,07</i>
<i>Teneur en Azote</i>	<i>0,31</i>

Les résultats de l'analyse révèlent une très faible teneur en azote dans les balles de riz par rapport à la teneur en carbone et la teneur en hydrogène.

IV.3. RESULTATS DE TESTS TECHNIQUES DE FONCTIONNEMENT DU REACTEUR

La quantité d'oxygène admise dans la partie supérieur du réacteur est un paramètre clé à contrôler au cours de la pyrolyse pour la production du biochar. Elle est fonction de l'air global admise dans le réacteur ainsi que de la vitesse du souffleur.

Après plusieurs essaies en fixant l'ouverture pour l'admission d'air supérieur à l'aide du variateur de flux d'air à **50% pour chaque petits trous** (de manière à ce que les petits trous du cylindre intérieur du réacteur soient ouverts de moitié) (voir figure 6) et en modifiant les différentes positions pour l'ouverture d'admission d'air global (voir figure 7) ainsi que les différentes vitesses du moteur, on est arrivé au fait que l'admission global doit être réglée à **25% de son ouverture totale** (voir figure 8 (c)) pour avoir une quantité d'oxygène approprié pour une combustion incomplète au sein du réacteur pour la production du biochar.



Figure 6: Ouverture à 50% d'admission d'air dans la partie supérieur du réacteur



Figure 7: Différentes position d'ouverture d'admission d'air global

IV.4. PRODUCTION DE BIOCHAR A PARTIR DES BALLEES DE RIZ

Les différents résultats présentés ici ont été obtenus en fixant les paramètres du réacteur de pyrolyse comme nous l'avons indiqué précédemment (ouverture admission global d'air 25% et ouverture admission d'air supérieur 50%). Pour chaque position du variateur de vitesse du souffleur, nous avons effectué quatre essais. Le tableau suivant donne une moyenne des différents résultats. Les températures mentionnées dans le tableau ci-dessous représentent les températures proches de la zone de pyrolyse. Les rendements massiques ont été calculés suivant le bilan massique ci-dessous sur la base de matière sèche par la relation suivante :

➤ Bilan Massique

La figure ci-dessous présente le bilan massique de production du biochar.

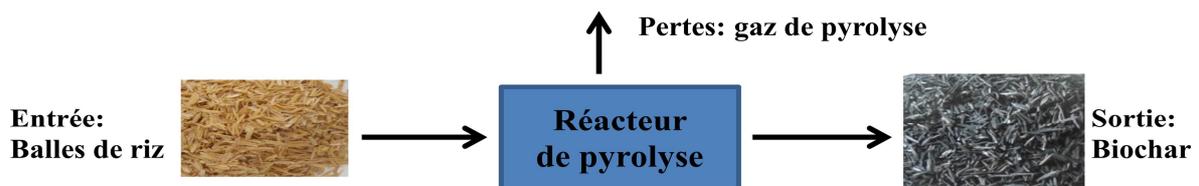


Figure 8: Bilan massique de production du biochar

$$\eta = \frac{m_{biochar}}{m_{balles\ anh}} \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

m_{bioch} : Masse de biochar produit (kg) ;

$m_{balle\ anh}$: Masse de balles de riz anhydre introduite (kg).

Tableau 8: Rendements massiques de production de biochar

<i>Position variateur de vitesse du souffleur</i>	<i>Rendement massique (%)</i>	<i>Durée de carbonisation (min)</i>	<i>Température (°C)</i>
4	42.42	123	600
5	39.92	120	650
6	35.93	110	683
7	37.43	80	655
8	36.93	85	675
9	32.44	88	700
10	29.4	65	702

Mentionnons ici que le souffleur ne réagit pas pour les positions 1, 2, 3, du variateur de vitesse, raison pour laquelle nous commençons nos essais à la position 4.

Au vu de ces résultats et en tenant compte des paramètres rendement massique et durée de carbonisation, il en ressort que ce sont les positions 7, 8 et 9 du variateur de vitesse du souffleur qui sont appropriées pour la production du biochar sur ce réacteur ; la température des gaz de pyrolyse qui s'échappent du réacteur par le haut atteint en moyenne **800°C**.

IV.5. CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DU BIOCHAR OBTENU

Dans cette partie, nous présentons les résultats analyses et expériences faits sur le biochar que nous avons produit.

IV.5.1 Résultat des analyses immédiates du biochar

Des échantillons de biochar produit à partir des balles de riz à la température de 655°C ont été prélevés et analysé au LBEB du 2iE. Le tableau ci-dessous présente les résultats des analyses immédiates. Les calculs du taux de cendre et du taux de matières volatiles ont été faits sur la base de matières sèches. Le carbone fixe a été déterminé par différence.

Tableau 9: Analyse immédiate du biochar

<i>Paramètre</i>	<i>Biochar</i>
<i>Analyse immédiate</i>	<i>(%)</i>
<i>Humidité</i>	5,14
<i>Cendres</i>	61,22
<i>Matières volatiles</i>	10,62
<i>Carbone fixe</i>	28,16

IV.5.2. Détermination du pH du biochar

La mesure du pH a été effectuée suivant le protocole décrit par Wani (2010) (voir annexe 1). Les résultats nous ont donné un pH compris entre **8 et 9**. On constate d'après ce résultat que le biochar produit est basique ; il pourrait être utilisé sur des sols acides et aurait pour effet de réduire leur acidité.

IV.5.3. Détermination de la densité du biochar

La détermination de la densité du biochar a été faite suivant le protocole décrit par Hermosilla-Lara, (2007) dans sa thèse. Les résultats donnent une densité moyenne de **0,43g/cm³**.

IV.5.4. Détermination de la texture poreuse biochar

➤ **Analyse de l'isotherme d'adsorption-désorption de N₂**

La figure ci-dessous représente l'isotherme d'adsorption-désorption d'azote d'un biochar obtenue par manométrie d'adsorption d'azote à 77 K (appareil Microméritics ASAP 2020).

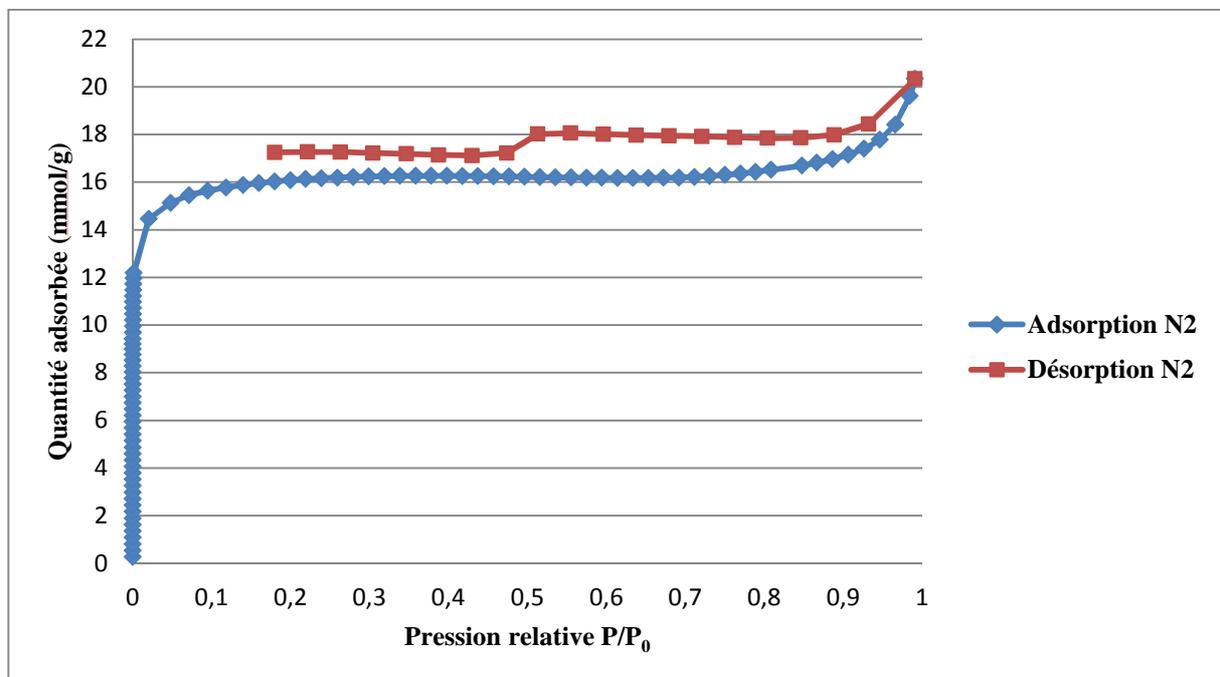


Figure 9: Isotherme d'adsorption – désorption d'azote à 77 K d'un biochar

L'isotherme d'adsorption d'azote obtenue est une isotherme de type 1 (Sing et al., 1985). Elle est typiquement obtenue des adsorbants essentiellement microporeux. Elle présente deux principales zones : La zone 1 dont la pression relative (P/P_0) est comprise entre 0 et 0,05 qui correspondent au remplissage des micropores à des pressions relatives d'autant plus basses que leur largeur est faible. La zone 2, caractérisée par un plateau quasi horizontal dont la pression relative (P/P_0) est comprise entre 0,05 et 0,95. Elle correspond à une adsorption multicouche sur la surface externe et/ou dans la méso et la macroporosité très faible de l'échantillon dans des proportions négligeables. La courbe de désorption présente une boucle d'hystérésis de type H4 (Sing et al., 1985). Elle est généralement observée pour des adsorbants microporeux ayant des feuillets liés entre eux de façon plus ou moins rigide et entre lesquels peut se produire une condensation capillaire. Elle vient ainsi confirmer la texture microporeuse de notre échantillon de biochar avec probablement la présence des pores en fente.

➤ Estimation de la surface spécifique

L'estimation de la surface spécifique a été faite suivant deux modèles à savoir le modèle BET et le modèle de Dubinin-Astakhov. La surface spécifique équivalente S_{BET} a été déterminée par la méthode BET appliquée dans le domaine de pressions relatives compris entre 0,01 et 0,1, domaine correspondant au remplissage des micropores.

Selon le modèle de BET la surface spécifique équivalente est estimée à **1201m²/g** alors que selon celui de Dubinin-Astakhov, elle est estimée à **1448m²/g**. Ces valeurs confirment que la surface spécifique équivalente S_{BET} donne une valeur de surface spécifique sous-estimée, puisque dans le modèle BET, on considère qu'une couche monomoléculaire de N₂ se forme dans les micropores de la même façon que sur une surface plane. Le modèle de Dubinin-Astakhov donne une meilleure estimation de la surface spécifique microporeuse.

Des études menées par Guo et al., 2003 sur la production du charbon actif à partir des balles de riz ont données des surfaces spécifiques comprises entre 1413 - 3014m²/g. Mais ces résultats ont été obtenus par activation chimique de la biomasse initiale dans des solutions de KOH et de NaOH et produit à des températures comprises entre 650°C et 800°C.

Ces résultats sont en conformités avec ceux rencontrés dans la littérature (Downie et al., 2009) pour une utilisation de ce biochar en agriculture. Néanmoins, nous devons dire que les analyses de porosité et de surfaces spécifiques doivent être réalisées plusieurs fois

(3 essais) pour faire une moyenne et confirmer nos résultats car dans cette étude, nous n'avons enregistré qu'une seule isotherme.

➤ **Estimation de la taille des pores**

La taille des pores est déterminée suivant le modèle de Dubinin-Astakhov car ce modèle est adapté pour des échantillons microporeux. La figure 10 suivante nous montre la distribution des micropores sur l'échantillon de biochar. On se rend compte que les micropores présents dans l'échantillon biochar sont plus précisément des super micropores car leur taille est comprise entre 7 et 20 Å.

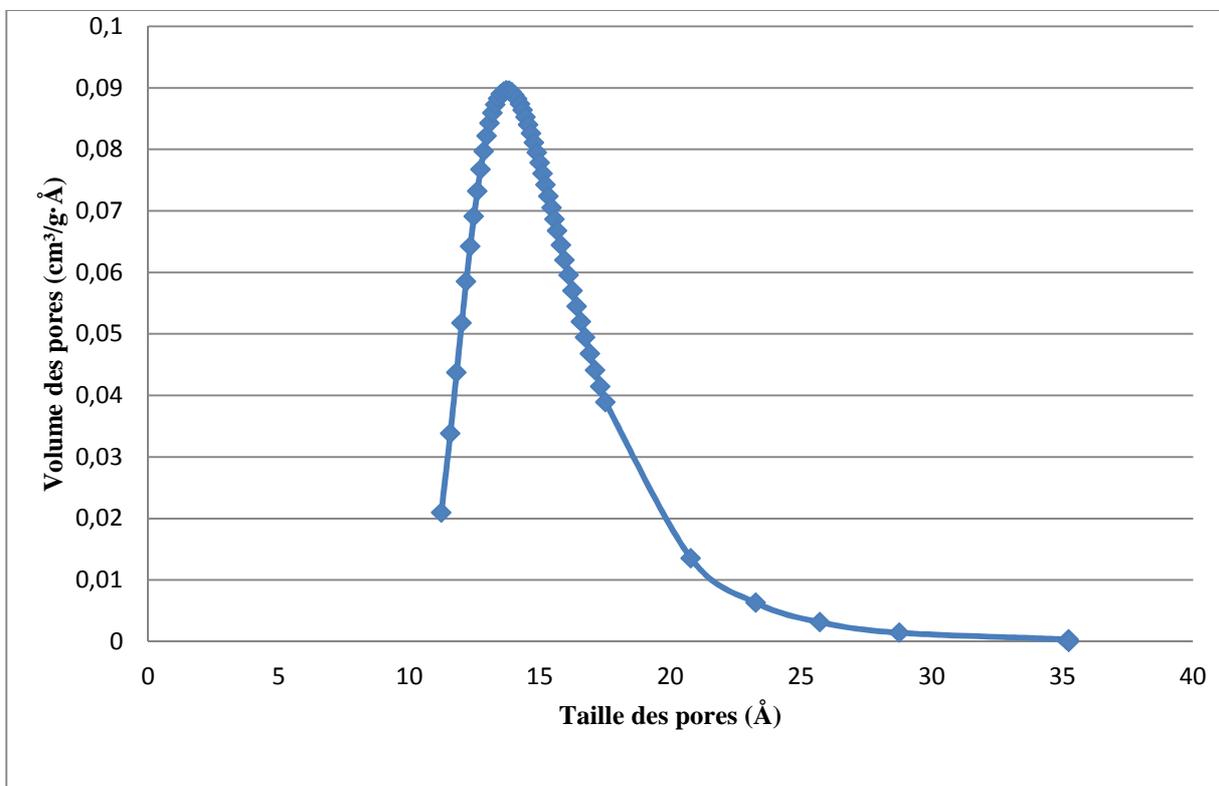


Figure 10: Distribution des micropores sur l'échantillon de biochar

IV.6. ANALYSE ECONOMIQUE

Dans cette partie, nous abordons l'aspect économique de la production du biochar à partir des coques de riz à travers le réacteur de pyrolyse BEC Batch Unit. L'accent sera porté ici sur son utilisation comme un engrais vert commercialisé. L'analyse économique est faite sur la base de la position 7 du variateur de vitesse du souffleur. Nous avons deux cas de figure :

❖ Réacteur fabriqué à l'étranger

Investissement

Réacteur de pyrolyse : 4.500.000 FCFA (frais de douane y compris) avec une durée d'amortissement de 7 ans. On admet l'hypothèse que les locaux qui abritent le réacteur sont utilisés gratuitement.

Capacité de production

Le réacteur fonctionne 6 heures par jour, et six jours par semaine avec un arrêt mensuel de 3 heures pour l'entretien. On a donc un temps de production annuelle qui est de :

$$(6 \times 6 \times 4 - 3) \times 12 = 1692 \text{ heures.}$$

Le réacteur produit 5kg/h de biochar soit une production annuelle **8.460kg/an**.

Coût de la maintenance : 36.000 FCFA/an.

Coût annuel de l'emballage : 42.300 FCFA/an

Electricité

A l'aide d'un compteur électrique monophasé que nous avons branché entre la prise de courant et le réacteur, nous avons obtenu la consommation horaire de l'équipement qui est de 0,073kWh. Le prix du kilowatt heure pour le Centre Songhaï est 112 FCFA. Le coût annuel de l'énergie consommée est de : $0,073 \times 1692 \times 112 = 13.833,792 \text{ FCFA}$

Les dépenses annuelles étant constantes, elles sont considérées comme une annuité constante.

Le tableau suivant regroupe toutes les charges de l'unité de production.

Tableau 10: Récapitulatif des charges annuelles de l'unité de production

Coût d'investissement	4.500.000 FCFA
Frais de fonctionnement annuel	92.133,792 FCFA
Quantité du biochar annuelle produite	8.460 kg

Sur la base de ces données, nous allons déterminer le coût de production du kg de biochar produit par le réacteur de pyrolyse type BEC Batch Unit et emballé.

Nous allons faire une actualisation des frais de fonctionnement annuel sur la base d'un taux d'actualisation de 10% (taux d'actualisation du Centre Songhaï) à l'aide de la relation suivante :

$$P = \frac{[(1+i)^n - 1]}{i \times (1+i)^n} \times A \quad (\text{Froehlich, 2011}) \quad (2)$$

Avec

P valeur actualisée ;

A annuité constante;

i taux d'actualisation.

On obtient une valeur actualisée de 448.545,89 FCFA

La quantité de biochar produite sur les sept ans d'utilisation est de 59.220kg. Ainsi, en additionnant le prix d'achat du réacteur au total des frais de fonctionnement actualisés et en divisant par la quantité produite sur sept ans, on en déduit le prix de production d'un kilogramme de biochar lorsque le réacteur est fabriquée aux Etats Unis d'Amérique. Ce prix est de **85 FCFA/kg**.

❖ Réacteur fabriqué sur place au Centre Songhaï

Dans ce cas, l'investissement pour le réacteur de pyrolyse revient à 2.000.000 FCFA y compris la main d'œuvre. En suivant la même démarche que précédemment, on obtient un prix de production du kilogramme de biochar qui est de **45 FCFA/kg**.

V. IMPACT ENVIRONNEMENTAL

L'impact environnemental dépend de l'utilisation du biochar produit. Pour une utilisation du biochar en agriculture, l'impact environnemental se comprend mieux en se basant sur l'étude du cycle du carbone contenu dans la biomasse lorsqu'elle n'est pas valorisée par production du biochar et lorsqu'elle est valorisé par production du biochar comme nous montre la figure ci-dessous.

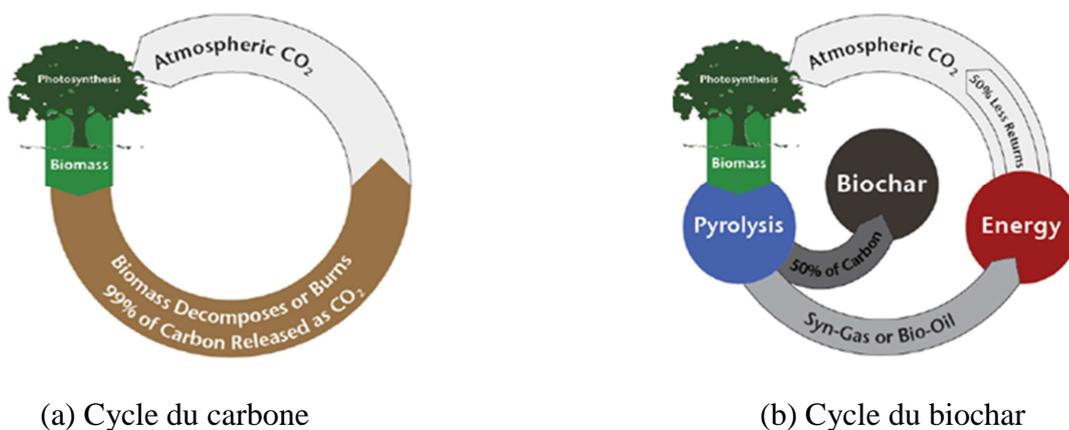


Figure 11: Séquestration du carbone dans le biochar (Lehmann, 2009)

D'après la figure 10 (a), si toute la biomasse se décompose dans la nature, 99% du carbone qu'il contient en présence d'oxygène se transforme en CO_2 . Ce CO_2 est réabsorbé par photosynthèse par les nouvelles plantes. Il y a donc un certain équilibre.

Par contre, si la biomasse est transformée en biochar, environ 50% carbone contenu dans la biomasse initiale est "emprisonné" dans le biochar. Les 50% restant sont dégagés dans la nature sous forme de gaz de pyrolyse notamment sous forme de CO_2 qui lui est absorbé par de nouvelles plantes. On constate en enfouissant le biochar dans le sol, on séquestre 50% du carbone initialement contenu dans la biomasse. Et dans ce cas, le gain environnemental est observé au niveau des nouvelles plantes qui vont absorber les autres 50% de CO_2 dans la nature. Ceci aura un impact positif sur l'environnement (diminution du taux de CO_2 dans la nature).

VI. DISCUSSION ET ANALYSES

Dans cette partie, nous faisons des analyses et discussions des différents résultats obtenus dans la section précédente et nous faisons un rapprochement avec ceux obtenus dans la littérature.

Les résultats de l'analyse immédiate des balles de riz donnent un taux d'humidité de 12%. Il y a un écart de 3% par rapport à celui obtenu par Nataragan et al., (2009) dans leurs travaux. Ce taux est compris dans la plage imposée par le constructeur du réacteur sur la fiche technique (taux d'humidité inférieur à 15%). Nous pouvons dire que notre biomasse initiale a été assez bien séchée au soleil avant son utilisation au sein du réacteur de pyrolyse pour les différents tests. Ce résultat est d'une grande importance pour le calcul des rendements de production en biochar. On observe au sein de nos balles de riz une teneur en cendres (matières minérales) de 21%. Elle se rapproche de celle obtenue par Cruz (in Neya, 2002) (voir tableau 1) lors de ses travaux. Elle peut présenter des problèmes pour des processus de combustion ou gazéification. Il faudra arrêter le processus de production du biochar à temps si non il y aura formation des cendres. Le taux de matières volatiles est dans la plus grande proportion dans les balles de riz. Il se rapproche de celui obtenu par Nataragan et al., (2009) avec un écart de 4%. On aura donc une grande perte en masse et en volume des balles de riz et un dégagement important des gaz de pyrolyses au cours de la production du biochar (Prins et al., 2011).

D'après l'analyse élémentaire, les balles de riz ont une teneur en carbone et en azote relativement basse par rapport à celle obtenue par Beagle (in Neya, 2002). Pour ce qui est de la teneur en hydrogène, elle est sensiblement la même. Cependant, ces résultats se rapprochent de ceux obtenus par Mansaray et Ghaly (1997). Ceci peut être dû à la provenance des balles de riz d'origines diverses utilisées pour effectuer les analyses.

La balle de riz pendant la pyrolyse pour la production du biochar perd moins de 50% de sa teneur en carbone initiale sous forme de CO₂, et de CO (Lehmann, 2007). Le carbone restant dans le biochar est alors plus stable. En enfouissant le biochar dans le sol, il aura l'avantage non seulement de stocker et de séquestrer le carbone restant, mais aussi d'améliorer la productivité des cultures (Glaser et al., 2002).

Au cours de la pyrolyse, il y aura production et dégagement du gaz de synthèse (CO+H₂). Le H₂ provient de la présence de la teneur en hydrogène dans la balle de riz. La proportion en azote dans le biochar sera probablement inférieure à 0,31% puisqu'au cours de la pyrolyse, il

y aura aussi dégagement de N_2 . La faible teneur en azote dans le biochar laisse penser qu'en réalité, le biochar produit n'est pas un engrais proprement dit.

Les différents résultats des tests techniques de fonctionnement mis en place pour le réacteur donnent une ouverture d'admission d'air globale de 25% et une ouverture d'admission d'air supérieur de 50%. En réalité, ces résultats devraient être accompagnés des valeurs des débits d'air admis à chaque niveau ; c'est-à-dire débit d'air correspondant à l'admission globale de 25% et débit d'air correspondant à l'admission supérieur de 50%.

En fonction des positions du variateur de vitesse du souffleur, différentes valeurs de rendements massiques (sur la base de matière sèche) de production de biochar ont été obtenues. A première vue, on est tenté d'adopter les positions 4 et 5 puisqu'elles ont des rendements massiques assez élevés par rapport aux autres. Mais par contre le temps de production du biochar est assez important comparativement à celui obtenu pour les autres positions. En effet puisqu'il s'agit d'un réacteur qui produit en priorité le biochar à moyenne échelle, le temps est un facteur déterminant à prendre en compte pendant la production. Ainsi les positions indiquées sont : 7, 8, et 9. Elles ont un temps moyen de carbonisation de 84 minutes pour un rendement massique de production moyen en biochar de 35,6%. Ces résultats se rapprochent de la plage de ceux obtenus sur le réacteur pilote "Pyro-6F" installé au Sénégal (Lehmann and al., 2006). Mais il faut noter ici que le taux d'humidité de la biomasse utilisée était de 15%.

La température moyenne atteinte en un point donné dans la zone de pyrolyse à ces positions est autour de 676°C et d'après les travaux de Antal M.J. et al., (2005), le biochar résulte de la pyrolyse réalisée entre 600°C et 800°C.

Cependant, d'après les travaux de Lehmann (2003), la plage optimale de température pour la production du biochar est comprise entre 450°C et 550°C. La température moyenne obtenue ici n'est pas comprise dans cette fourche, mais elle fait quand même partie des températures de production du biochar qu'il a produit et expérimenté.

L'aspect optimisation du biochar produit tel que présenté par Lehmann (2003) est basée purement sur une approche expérimentale et une analyse en laboratoire. Il est plus axé sur l'aspect qualité du biochar produit via ses propriétés intrinsèques à différentes températures. Dans le cadre de ce travail, l'aspect optimisation du biochar produit est orienté vers un compromis établi entre la quantité du biochar produit et le temps de production. Et ensuite,

nous faisons une caractérisation du biochar produit (détermination du pH, de la surface spécifique et de la porosité).

Le rapprochement fait entre nos résultats et ceux obtenus par Lehmann, nous permettra d'avoir une idée générale sur le biochar produit en termes de qualité.

Le biochar produit est riche en matières minérales d'après les résultats des analyses immédiates. En l'enfouissant dans le sol il mettra immédiatement la matière minérale à la disposition des plantes et les microorganismes n'auront qu'à dégrader que 39% de la matière organique en matière minérale. Le taux de cendre dans le biochar s'éloigne de celui déterminé par Hazourli et al., (2007) dans leur travaux (avec un écart absolu de 57%) dont l'objectif était la valorisation d'un résidu naturel ligno-cellulosique en charbon actif carbonisé à 600°C.

Le taux d'humidité du biochar est de 5%. Ce taux est inférieur à celui obtenu par Hazourli et al., (2007) sur un charbon actif à partir des résidus végétaux ; l'écart absolu est de 4%. Le taux de carbone fixe est passé de 12% dans la biomasse initiale à 28% dans le biochar. Ceci permet de dire que le taux de carbone proprement dit dans le biochar va aussi fortement augmenter. Mais, nous ne disposons des équipements nécessaires pour faire l'analyse élémentaire pour plus d'information sur cette augmentation.

L'objectif premier du biochar produit ici à partir des balles de riz est la possibilité de son utilisation comme un amendement pour le sol. Pour ce fait, il nécessite certaines analyses de base parmi lesquelles la détermination de son pH. Après analyse du biochar produit pour les positions 7, 8 et 9 du variateur de vitesse du souffleur, on a obtenu un pH compris entre 8 et 9. Les études menées par Chan et Xu (2009) révèlent que d'une manière générale, la plupart des biochar ont un pH basique compris entre 8 et 9,5. Les résultats obtenus par Lehmann (2003) donnent une plage de pH de [8,5 ; 9]. Wani (2010) dans ses travaux a caractérisé le biochar produit à partir des balles de riz. Il a obtenu un pH de 8,7. Cette valeur est comprise dans la gamme de valeur de pH que nous avons déterminé dans le présent travail. Le pH déterminé sur un charbon actif (8,53) produit à partir de déchets végétaux non traité chimiquement par Hazourli et al., (2007) est compris dans la plage de variation du pH déterminée dans ce travail. Le biochar produit a un pH très proche de celui d'un charbon actif de type H (charbon actif au caractère basique). Cette caractéristique peut s'avérer un avantage dans les sols dont le pH est plus bas que l'idéal, pour l'usage qu'on désire en faire. Mais, dans certains cas, pour un pH du sol plus élevé que l'idéal, l'application d'un tel biochar pourrait aggraver les problèmes de disponibilité des nutriments.

Le biochar produit et analysé a une densité de 0,43g/cm³. Cette valeur est comprise dans la plage de densité déterminée par Downie et al., (2009). On peut penser que le biochar produit s'avère indiqué pour une utilisation agricole du point de vu densité.

La surface spécifique semble très développée, bien que le résultat reste à confirmer expérimentalement par d'autres analyses. Pour une application biochar en agriculture, on doit avoir un charbon essentiellement méso et/ou macroporeux ayant une surface spécifique assez développée (Lehmann, 2003). La forte contribution des super micropores à la surface spécifique de notre biochar ne trouve donc pas une application idéale en agriculture. En effet, en raison de leurs tailles macromoléculaires, les nutriments et certains micro-organismes sont plus facilement adsorbables par des méso et/ou macropores. Ainsi, vu la texture très microporeuse de notre charbon, il serait également intéressant d'évaluer ses potentialités en adsorption de petites molécules pour la purification d'effluent gazeux.

L'analyse économique est axée ici sur la détermination du coût de production du kilogramme de biochar suivant deux cas de figures.

On observe que, dans le cas où le réacteur de pyrolyse type BEC Batch Unit est fabriqué aux Etats Unis, le coût de production du kilogramme de biochar est plus élevé que dans le cas où il est fabriqué localement. L'écart entre les coûts est considérable et non négligeable puisqu'il se rapproche des 50%. Sur cette base, il est donc plus avantageux de fabriquer le réacteur de pyrolyse type BEC Batch Unit localement. En plus, la fabrication locale engendre un impact social positif (offre d'emploi aux personnes pour la fabrication). Le coût de production du charbon vert en briquettes fabriquées à partir des balles de riz est de 25 FCFA (Mfouapon, 2007) ; on note une différence de + 20 FCFA pour le biochar produit sur le réacteur fabriqué localement. Cette différence semble être en contradiction avec ce que nous pensions obtenir puisqu'en réalité, ce charbon vert subit d'autres transformations (fabrication des briquettes) pour être utilisé pour la cuisson des aliments.

En faisant un rapprochement avec la disponibilité en matière première, le réacteur de pyrolyse BEC Batch Unit prend en entrée 23kg de balles de riz lors de sa mise en marche pour la production du biochar. En tenant compte du fait que le temps de carbonisation à la position 7 du variateur de vitesse est de 1h30min et que le réacteur fonctionne pendant 6 heures par jour, la demande journalière en balles de riz est estimée à 92kg. On en déduit en prenant en compte le temps d'arrêt mensuel pour maintenance, la demande annuelle en balles de riz du réacteur

qui est de 26 tonnes. Puisqu'au sein du centre Songhaï il y a un rejet d'environ 6.000 tonnes de balles de riz par an, le problème de disponibilité de la matière première ne se posera pas dans le cas où on ne dispose que d'un seul réacteur de pyrolyse.

VII. CONCLUSIONS

L'objectif de ce travail était dans un premier temps d'identifier les différents types biomasses disponibles sur le site du Centre Songhaï de Porto-Novo appropriées pour la production du biochar, ensuite, d'installer et de mettre en œuvre le réacteur BEC Batch Unit sur le site, de faire des tests technico-économiques pour la production du biochar à partir de la biomasse identifiée, et enfin de caractériser le biochar obtenu pour une éventuelle utilisation à des fins agricoles. Il en ressort au terme de ce travail que les biomasses identifiées sont les balles de riz et les résidus agricoles. Mais du fait que les résidus agricoles trouvent déjà une application en agriculture sur le site, nous avons uniquement utilisé les balles de riz que n'était pas jusqu'ici valorisées et dont le potentiel est estimé à 6.000 tonnes/an pour produire du biochar. Les résultats des tests techniques effectués sur le réacteur indiquent une ouverture d'admission d'air globale de 25% et une ouverture d'admission d'air supérieur de 50% pour la production du biochar à partir des balles de riz. Les positions du variateur de vitesse du souffleur appropriées sont 7, 8 et 9. La température moyenne de pyrolyse atteinte est de 676°C avec un temps moyen de carbonisation de 84 minutes, un rendement massique de production de 35,6% et un taux d'humidité de 12% des balles de riz.

Les résultats de la série d'analyse faite LBEB du 2iE sur le biochar produit uniquement à la position 7 du variateur de vitesse du souffleur indiquent un biochar fortement microporeux ayant un pH compris basique compris entre 8 et 9, une densité apparente de 0,43g/cm³, un taux de matières minérales de 61% et une surface spécifique de 1448m²/g. Au vu de ces résultats, l'hypothèse selon laquelle on peut utiliser ce biochar pour l'amendement des sols en agriculture est envisageable bien que la texture très microporeuse ne soit pas idéale pour une telle application. La forte microporosité du charbon permet d'envisager une utilisation comme charbon actif pour la purification des effluents gazeux.

L'analyse économique révèle que pour un réacteur de pyrolyse type BEC Batch Unit fabriqué au Etats-Unis, le coût de production est de 85 FCFA alors que, lorsqu'il est fabriqué localement, le coût de production diminue presque de moitié (45 FCFA). Il est donc plus avantageux de fabriquer localement le réacteur de pyrolyse vu la grande différence des coûts de production (40 FCFA).

VIII. RECOMMANDATIONS - PERSPECTIVES

Recommandations

- Il est recommandé d'utiliser le réacteur de pyrolyse aux positions 7, 8 et 9 du variateur de vitesse du souffleur.
- Le réacteur doit être fermé au cours de la carbonisation.
- Respecter les réglages préalables d'admission d'air et arrêter le réacteur dans le temps requis en fonction de la position du variateur de vitesse du souffleur (voir tableau 5).
- Il est recommandé de fabriquer le réacteur de pyrolyse type BEC Batch Unit localement.
- Etudier les propriétés du sol avant l'application du biochar

Perspectives

- ✓ Compléter le réacteur de pyrolyse avec un séchoir qui utilisera la chaleur perdue pour sécher la biomasse avant son utilisation dans le réacteur (voir annexe 3).
- ✓ Déterminer la capacité d'échange cationique (C.E.C), la capacité d'adsorption et d'absorption, ainsi que le taux de carbone du biochar.
- ✓ Utiliser le biochar produit comme charbon actif dans l'optique de renforcer le système de filtrage du biogaz sur le site du Centre Songhaï.
- ✓ Synthèse des charbons actifs à partir des balles de riz par activation chimique pour le traitement des eaux au sein de l'unité de production d'eau minérale actuellement en construction au Centre Songhaï.

BIBLIOGRAPHIE

- Antal M. J., Gnonli M. and Bridgwater A. V., 2005, Fundamental of Charcoal Production in Fast Pyrolysis of Biomass, *A Handbook*, vol. 3, pp. 149-160.
- Chan K. Y., and Xu Z., (2009), Biochar: Nutrient Properties and their Enhancement. In Biochar for Environmental Management, ed. Lehmann J., and Joseph S., *London: Earthscan Publications Ltd*, 67-84.
- Couhert C., (2007), Pyrolyse Flash à Haute Température de la Biomasse Ligno-cellulosique et de ses Composés – Production de Gaz de Synthèse, Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris.
- Demirbas A., 2006, Production and Characterization of Bio-Chars from Biomass via Pyrolysis, *Energy Source A.*, Vol 28, N°4-8, pp 413-422.
- Downie A., Crosky A., and Munroe P., (2009), Physical Properties of Biochar. In Biochar for Environmental Management, ed. Lehmann J., and Joseph S., *London: Earthscan Publication*, 12-32.
- Encinar J. M., Beltran F.J., Bernalte A., Ramiro A., and Gonzalez J.F., 1996, Pyrolysis of two Agricultural Residues: Olive and Grape Bagasse. Influence of Particle Size and Temperature, *Biomass and Bioenergy*, Vol. 11, pp. 397-409.
- Fassinoua W.F., Van de Steene L., Toure S., Volle G., and Girard P., 2009, Pyrolysis of Pinus Pinaster in a Two-Stage Gasifier: Influence of Processing and Thermal Cracking of Tar, *Fuel Processing Technology*, Vol. 90, pp. 75-90.
- Froehlich, (2011), Calculs Economiques et Analyses Financières, *Notes de Cours Masters Spécialisés*, Institut Internationale d'Ingénierie de l'Eau et de L'environnement.
- Glaser B., Lehmann J., Zech W., (2002), Ameliorating Physical and Chemical Properties of Highly Weathered Soil in the Tropic with Charcoal, *Biology and Fertility of Soils* 35: 219-230.
- Gundale M. J., and Deluca T.H., (2006), Temperature and Source Material Influence Ecological Attributes of Ponderosa Pine and Douglas-fir Charcoal. *For Ecol Manag* 231: 86-93.
- Guo Y., Yu K., Wang Z., Xu H., (2003), Effects Of Activation Conditions On Preparation Of Porous Carbon From Rice Husk, *Carbon* 41, 1645-1648.
- Hazourli S., Ziati M., Hazourli A., et Cherifi M., (2007), Valorisation d'un Résidu Naturel Ligno-Celulosique en Charbon Actif – Exemple des Noyaux de Dattes, *Revue des Energies Renouvelables ICRESD-07 Tlemcen*, 187 – 192.
- Hermosilla-Lara G., (2007), Stockage de l'Hydrogène par Adsorption sur Charbon Actif : Etude des Effets Thermiques Lors de la Charge Dynamique d'un Réservoir à Lit Fixe

- Adsorbant, Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier-Grenoble 1.
- Keech O., Carcaillet C., Nilsson M. C., (2005), Adsorption of Allelopathic Compounds by Wood-Derived Charcoal: The Role of Wood Porosity, *Plant Soil*, 272:291-300.
- Lehmann J. and Rondon, M., (2006), Biochar Soil Management on Highly Weathered Soils in the Humid Tropics. In Uphoff N (ed), *Biological Approaches to Sustainable Soil Systems*, CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 517-530.
- Lehmann J., (2007), A Handful of Carbon, *Nature* 447, 143-144.
- Lehmann J., (2009), Biochar for Environmental Management: An Introduction. In: *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*, EarthScan Ltd, London pp2.
- Lehmann J., Da Silva Jr. J. P., Steiner C., Nehls T., Zech W., and Glaser B. (2003b), Nutrient Anthrosol and a Ferralsol in the Central Amazon Basin: Fertiliser, Manure and Charcoal Amendments. *Plants and Soil* 249: 343-357.
- Lehmann J., Kern D. C., Glaser B., and Woods W. I., (2003), Amazonian Dark Earths: Origin, Properties and Management, *Kluwer Academic Publisher, The Netherlands*, pp 105-124.
- Liang B., Lehmann J., Solomon D., Grossman J., O'Neill B., Skyemstad J. O., Theis J., Luizao F. J., Peterson J., and Neves E. G., (2006), Black Carbon Increases Cation Exchange Capacity in Soils, *Soil Science Society of America Journal* 70:1719-1730.
- Mansaray K. G., and Ghaly A. E., (1997), Physical and Thermochemical Properties of Rice Husk, *Energy Sources*, 19: 989-1004.
- Mermoud F., (2006), Gazéification de Charbon de Bois à la Vapeur d'Eau : de la Particule Isolée au Lit Fixe Continu, *Thèse de doctorat*, Institut National Polytechnique de Toulouse.
- Mfouapon P., (2007), Etude de Faisabilité d'une Unité de Production du Charbon Vert, *Projet de Fin d'Etudes*, Ecole Supérieur Polytechnique, Centre de Thies.
- Mullen A. C., Boateng A., Goldberg N. M., Lima M. I., Laird D. A. and Hicks K. B. (2009), Bio-oil and Bio-char Production from Corn Cobs and Stover by Fast Pyrolysis, *Elsevier*, 24, October, Vol. 34 N° 1 pp 67-74.
- Natarajan E., and Ganapathy S., (2009), Pyrolysis of Rice Husk in a Fixed Bed Reactor, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 56.
- Ndiaye F. T., (2008), Pyrolyse de la Biomasse en Réacteur Cyclone – Recherche des Conditions optimales de Fonctionnement, Thèse de doctorat, Institut Nationale Polytechnique de Lorraine.
- Neya B., (2002), Valorisation de la Biomasse du Burkina Faso : Faisabilité de Panneaux de Particules à Base de Déchets Agricoles & Recherche de Nouveaux Biocides pour la Préservation du Bois à Partir d'Essences Naturellement Durables, Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy – I.

- Odesola I. F. and Owoseni T. A., (2010), Small Scale Biochar Production Technologies, *Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences (JETEAQ)*, Department of Mechanical Engineering, University of Ibadan, Ibadan, Nigeria, pp 150-155.
- Prins R., Wayne T., Marier J., Geoff A., Tim C., and Brandon D., (2011), Design, Construction, and Analysis of A Farm-Scale Biochar Production System, *Catalyzing Innovation*, March 24-26.
- Sing K. S. W., Everett D. H., Haul R. A. W., Moscou L., Pierotti R. A., Rouquérol J., Siemieniewska T., (1985), Reporting Physisorption Data For Gas/Solid Systems With Special Reference to the Determination of Surface Area and Porosity, *Pure & Appl. Chem.*, Vol. 57, N° 4, PP. 603-619.
- Wani Hadi Utomo (2010), Rice Husk Biochar for Rice Based Cropping System in Acid Soil 1. The Characteristics of Rice Husk Biochar and Its Influence on the Properties of Acid Sulfate Soils and Rice Growth in West Kalimantan, Indonesia, *Journal of Agricultural Science, March*, Vol2, N°1.
- Warnock Daniel D., Lehmann J., Kuyper Thomas W., and Rillig Mathias C., (2007), Mycorrhizal Responses to Biochar in Soil – Concepts and Mechanisms. *Springer Science*, 19 September, Plant Soil 300: 9-20.

Sites internet

www.biochar-international.org consulté le 27 Juillet 2011.

ANNEXES

ANNEXE I : CONSIGNES DE SECURITE

✓ L'opérateur et son assistant ou toutes personnes à proximité doivent porter une blouse de protection adéquate, des lunettes de protection, un masque respiratoire et des gants résistants à la chaleur.

✓ Lors de son fonctionnement, le réacteur produit une flamme par le haut qui peut être difficilement visible pendant la journée ; des précautions doivent être prises pour que cette flamme ne se propage pas. Des précautions doivent aussi être prises de telle sorte que personne ne vienne en contact avec la flamme. Il est donc interdit de regarder dans le réacteur par le haut car vous pouvez vous brûlez le visage ; une grande prudence doit être observée.

✓ L'opérateur et son assistant doivent faire attention lors de la manipulation du réacteur juste après la production du biochar car celui-ci restent chaud pendant un certains temps après la production ; mettre le biochar produit dans un fût métallique résistant à la chaleur.

✓ Ne placer ni objet, ni les mains ou autre partie du corps près de l'entrée du souffleur (admission globale d'air).

✓ Ne pas agiter la biomasse dans le réacteur au cours de son fonctionnement ; cette opération est dangereuse et met l'utilisateur à proximité de la flamme.

ANNEXE II : PROTOCOLE EXPERIMENTAL POUR LA MESURE DU PH DU BIOCHAR

I. Préparation de la solution

- Introduire 10g de biochar préalablement broyé dans 1l d'eau distillée ;
- Chauffer le mélange obtenu jusqu'à 90°C ;
- Agiter la solution pendant 20 minutes ;
- Laisser refroidir la solution jusqu'à la température ambiante.

II. Mesure du pH

- Mesurer le pH à l'aide d'un pH-mètre.

Dans le cadre de ce travail nous avons utilisé des bandelettes indicatrices de pH que nous avons introduite dans la solution jusqu'à ce qu'il n'ait plus changement de couleur (pendant environ 10 minutes) ; nous avons ensuite comparé le résultat aux couleurs de références données par le constructeur.

ANNEXE III : SYSTEME DE VALORISATION DE LA CHALEUR DEGAGEE LORS DE LA PRODUCTION DU BIOCHAR PAR LE REACTEUR DE PYROLYSE.

Le système de valorisation de la chaleur dégagée par le réacteur de pyrolyse BEC Batch Unit a été réalisé à l'aide du logiciel "Top Solid 6.6". Le système combiné au réacteur est représenté sur la figure ci-dessous.

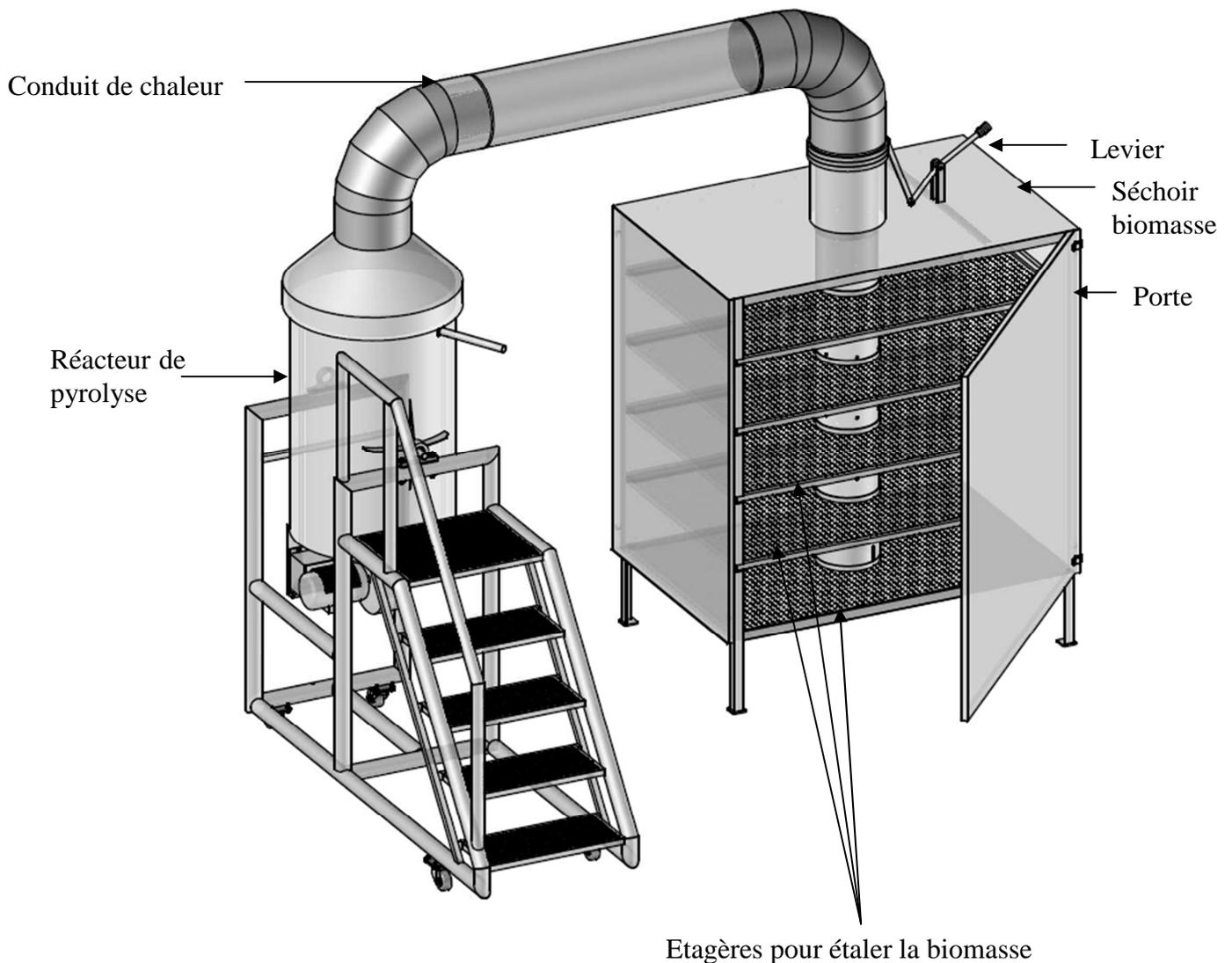


Figure 12: Système de valorisation de la chaleur dégagée lors de la production du biochar par le réacteur de pyrolyse BEC Batch Unit

ANNEXE IV : COUPE DU SYSTEME DE VALORISATION DE LA CHALEUR DEGAGEE LORS DE LA PRODUCTION DU BIOCHAR PAR LE REACTEUR DE PYROLYSE

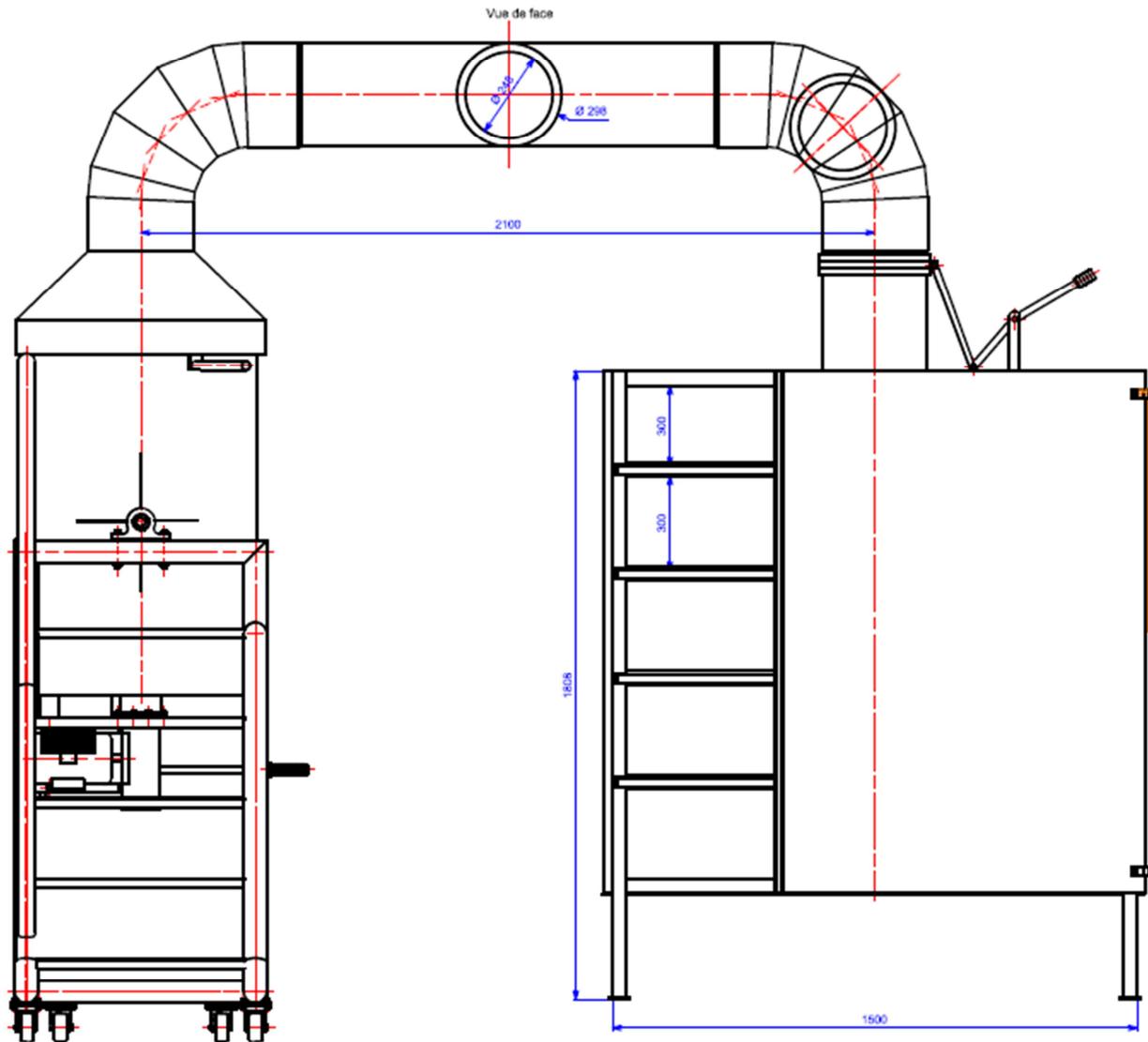


Figure 13: Coupe du système de valorisation de la chaleur dégagée lors de la production du biochar par le réacteur de pyrolyse BEC Batch Unit

Spécification du système

Dimensions du séchoir

Hauteur totale du séchoir : 1800 mm

Hauteur de l'enceinte : 1500 mm

Longueur du séchoir : 1500 mm

Largeur du séchoir : 1000 mm

Séparation des étagères 300 mm

Dimensions du réacteur

Diamètre intérieur : 600 mm

Diamètre extérieur : 605 mm

Hauteur : 1000 mm