



CONCEPTION D'UN FOYER DOMESTIQUE A PYROLYSE POUR LA BALLE DE RIZ

MÉMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGÉNIEUR 2iE AVEC GRADE DE
MASTER-SPÉCIALITÉ
GÉNIE ELECTRIQUE, ENERGÉTIQUE ET INDUSTRIEL

Présenté et soutenu publiquement le../../ par

Ibrahim ALASSANE BONKANO (n°20131408)

Directeur de mémoire : Pr Sayon dit Sadio SIDIBE, Enseignant – chercheur / chef de département des Formations Professionnelles en Ligne (FPL), Institut 2iE.

Encadrant 2iE : Pr Marie SAWADOGO, Enseignante-Chercheuse en Génie Industriel, Responsable du Laboratoire Energies Renouvelables et Efficacité Energétique (LabEREE), Institut 2iE.

Structure (s) d'accueil du stage: **Laboratoire Energies Renouvelables et Efficacité Energétiques (LabEREE)**

Jury d'évaluation du stage :

Président : Prénom NOM

Membres et correcteurs : Prénom NOM
 Prénom NOM
 Prénom NOM

Promotion [2023/2024]

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à :

Mon Papa Alassane BONKANO HIMA qui n'a cessé d'investir dans mes études depuis la classe de maternelle jusqu'à mon Master 2 ; il m'a toujours soutenu et motivé dans toutes les épreuves auxquelles je faisais face. Puisse Allah le Tout-Puissant le récompenser de la plus belle des manières que possible ;

Ma défunte grand-mère Fati pour son soutien et amour Puisse Allah lui accorder le dernier niveau du paradis ;

Ma maman Roukayatou ISSOUFOU qui n'a cessé de me soutenir, de m'encourager, invoquer pour moi jusqu'à ce jour, Puisse Allah la récompenser de la plus belle des manières que possible

Mon frère et mes sœurs, je vous remercie pour tout.

.

Conception d'un foyer domestique à pyrolyse pour la balle de riz

CITATION

« La plus grande gloire n'est pas de ne jamais tomber, mais de se relever à chaque chute. »

Confucius

REMERCIEMENTS

J'adresse mes remerciements sincères à:

- ✓ Toute l'équipe de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) qui m'a accueilli et m'a offert une formation de qualité ;
- ✓ Mon directeur de mémoire, Professeur Sayon dit Sadio SIDIBE pour son encadrement, son encouragement, sa disponibilité, sa motivation et ses précieux conseils durant ce mémoire ;
- ✓ Professeur Marie SAWADOGO pour son encadrement, son encouragement sa motivation ; sa disponibilité et ses précieux conseils durant ce mémoire ;
- ✓ Doctorant Fabrice KOUONANG CHIMI pour son encadrement et son suivi ;
- ✓ Le Laboratoire Energies Renouvelables et Efficacité Energétique (LabEREE) pour m'avoir accueilli dans ce prestigieux Laboratoire ;
- ✓ Doctorante Sara pour sa disponibilité et ses conseils ;
- ✓ Monsieur Sidi pour sa disponibilité et ses conseils ;
- ✓ Monsieur Théodore BELEMGNEGRE pour sa disponibilité et ses conseils ;
- ✓ Tout le corps professoral et administratif de l'institut 2iE, en particulier ceux qui m'ont enseigné ;
- ✓ Pr Mahamadou KOITA pour son aide ;
- ✓ Moussa ALI ABDOU pour son aide ;
- ✓ Zourkalaini BOUBAKAR pour son aide ;
- ✓ Doctorant Aka TANO pour sa disponibilité et ses conseils ;
- ✓ Doctorant Atilago pour sa disponibilité et ses conseils ;
- ✓ Doctorante Carole AKOSSI pour sa disponibilité et ses conseils ;
- ✓ Doctorant Serigne M'BACKE pour sa disponibilité et ses conseils ;
- ✓ Doctorant Idi SOULEY TANGAM pour sa disponibilité et ses conseils ;
- ✓ Doctorant Abdoul OUAHAB NOUHOU pour sa disponibilité et ses conseils ;
- ✓ Doctorant Ftimbé Lare pour sa disponibilité et ses conseils ;
- ✓ Farida ABASSE pour sa disponibilité et ses conseils ;
- ✓ Ma grande Sœur Adama ALASSANE BONKANO pour son soutien et conseils
- ✓ Mon petit frère Abdoul Razak ALASSANE BONKANO et mes petites sœurs Indatou ALASSANE BONKANO ; Loubabatou ALASSANE BONKANO ; Mariam ALASSANE BONKANO qui me donnent la lourde responsabilité d'être leur exemple ;

Conception d'un foyer domestique à pyrolyse pour la balle de riz

- ✓ Mes amies Bachirou ADAMOU HAMANI ; Saiboudine MAHAMADOU ZAKARI ; Abari MAMADOU KIARI ; Mohamed FATI; Ismael ALI LABO ;Ismael CHAIBOU OUSMANE ;Chaibou LAMINE ;Badarou ELHADJ NASSIROU ;Arifa ABBA Abdoul Kader DARI ; Halimatou MAIRIJA ; Aichatou ABDOU ;
- ✓ Sans oublier tous mes camarades de classe, merci pour tout.

RESUME

Cette étude nous a permis de concevoir et de tester un foyer domestique à pyrolyse pour la balle de riz avec un rendement thermique de 19,09% et un temps d'ébullition de l'eau de 11mn. Le foyer à pyrolyse prévu est en double parois permettant de réchauffer l'air pour la combustion des gaz de pyrolyse. Pour répondre à cette problématique un état de l'art a été réalisé à travers une recherche documentaire. Après, nous avons fait une analyse fonctionnelle du foyer à pyrolyse suivi de la conception puis du dimensionnement pour trouver les différentes dimensions. En fin la réalisation nous a permis de mettre en place le foyer à pyrolyse. Comme résultat, notre foyer à pyrolyse fonctionne comme prévu. Son bon fonctionnement nous a permis de vérifier le 4^{ème} objectif de notre travail qui consistait à comparer notre foyer avec d'autres foyers. A la fin de la comparaison nous avons remarqué que notre foyer à un temps de fonctionnement plus rapide que les deux autres. Cette étude constitue un moyen de promouvoir la réduction de la consommation du bois énergie au sein des ménages et aussi diminuer les dépenses énergétiques budgétaires et le temps lié à la cuisson des aliments afin d'améliorer le bien-être de la population en assurant une sécurité alimentaire des ménages.

Mots Clés:

-
- 1 –Balle de riz**
 - 2 – Conception**
 - 3 - Foyer domestique**
 - 4 - Pyrolyse**
 - 5 – Caractérisation**

ABSTRACT

This study enabled us to design and test a domestic pyrolysis furnace for rice husks with a thermal efficiency of 19.09% and a water boiling time of 11 minutes. The planned pyrolysis furnace is double-walled to heat the air for combustion of the pyrolysis gases. To address this problem, a literature search was carried out to review the state of the art. We then carried out a functional analysis of the pyrolysis furnace, followed by the design and sizing to determine the various dimensions. Finally, we were able to install the pyrolysis unit. As a result, our pyrolysis oven works as planned. Its smooth operation enabled us to verify the 4th objective of our work, which was to compare our oven with other ovens. At the end of the comparison, we noticed that our fireplace had a faster operating time than the other two. This study is a means of promoting the reduction of wood energy consumption within households and also reducing budgetary energy expenditure and the time spent cooking food in order to improve the well-being of the population by ensuring household food security.

Key words:

-
- 1 - Rice husk**
 - 2 - Design**
 - 3 - Domestic fireplace**
 - 4 - Pyrolysis**
 - 5 – Characterisation**

LISTE DES ABREVIATIONS

CdCF :	Cahier des charges fonctionnel
D:	Diamètre
FAST:	Functional Analysis System Technique
FC:	Fonction Contrainte
FP:	Fonction Principale
H:	Hauteur
2iE:	Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
LABEREE:	Laboratoire Energies Renouvelables et Efficacité Énergétique
PCI:	Pouvoir Calorifique Inférieur
Qn:	Quantité d'Énergie
SADT:	Structured and Analysis Design Technique
TEE:	Test d'Ébullition de l'Eau

SOMMAIRE

<i>Dédicaces</i>	<i>i</i>
<i>Remerciements</i>	<i>iii</i>
<i>Résumé</i>	<i>v</i>
<i>Abstract</i>	<i>vi</i>
<i>Liste des abréviations</i>	<i>vii</i>
<i>Sommaire</i>	<i>viii</i>
LISTE DES TABLEAUX	x
LISTE DES FIGURES	xi
I. Introduction	1
II. Etat de l'art du foyer à pyrolyse	1
1. Généralité sur la valorisation thermochimique de la biomasse	1
a. Combustion	1
b. Gazéification	1
c. Pyrolyse	1
2. Principe général de la pyrolyse	1
3. Propriétés des balles de riz	3
4. pyrolyse de la balle de riz	3
5. Les foyers déjà existants (caractéristiques et performances)	3
6. Les foyers à combustion (Avantages et inconvénients)	5
a. Avantages des foyers à combustion	6
b. Inconvénients des foyers à combustion.....	7
7. Les foyers à pyrolyse (Avantages et inconvénients)	7
a. Avantages des foyers à pyrolyse	7
b. Inconvénients des foyers à pyrolyse	9
8. Comparaison des deux types de foyers (Foyers à pyrolyse et foyers à combustion)	9
9. Justification du choix des foyers à pyrolyse	10
10. Méthode de conception	10

Conception d'un foyer domestique à pyrolyse pour la balle de riz

III. Matériel et méthodes	12
1. Analyse Multicritères du choix de la conception	12
2. Conception et réalisation	12
a. Conception	12
b. Réalisation	12
3. Méthode et évaluation de performance	13
4. Bilan Masse – Énergie.....	14
a. Bilan Masse.....	14
b. Bilan Energie	15
IV. Résultats et Discussion.....	16
1. Résultats	16
a. Analyse fonctionnelle	16
b. Conception et Réalisation	24
c. Résultats des tests TEE	27
d. Résultats des analyses immédiates de la balle de riz.....	28
e. Résultat des analyses immédiates du biochar	28
2. Discussion et analyse	29
V. CONCLUSION-PERSPECTIVE	31
Recommandations.....	31
Bibliographie	32
Annexes.....	35

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Composition élémentaire de la balle de riz	3
Tableau II : Tableau de caractérisation des fonctions	19
Tableau III : Récapitulatif des essais des trois foyers	27
Tableau IV : Analyse immédiate des balles de riz	28
Tableau V : Analyse immédiate du biochar.....	29

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Consommation finale par source, 2022 (Source: SIE UEMOA les bilans énergétiques)	2
Figure 2 : Rendements massiques de pyrolyse à différentes températures issus de l'étude expérimentale de (Gauthier et al. 2013)	2
Figure 3 : Foyers traditionnels trois pierres (a) (Ochieng et al. 2013) (b)(Manoj et al. 2013) .	4
Figure 4 : Performance du test d'ébullition d'eau pour le foyer traditionnel (TCS) et pour le foyer amélioré (ICS) (a) Biomasse utilisée (b) Rendement, Temps d'ébullition, (Rasoulkhani et al. 2018).....	5
Figure 5: Foyer à combustion (Source: MIVO ÉNERGIE-Wordpress.com)	6
Figure 6 : Foyer à pyrolyse	7
Figure 7 : Principe de fonctionnement du foyer à pyrolyse de balle de riz	14
Figure 8 : Foyer à pyrolyse pour la balle de riz	16
Figure 9 : Outil «Bête à cornes» (Briscoe et Wolfgang 2018).....	17
Figure 10 : Diagramme pieuvre (Briscoe et Wolfgang 2018).....	18
Figure 11 : Diagramme FAST.....	22
Figure 12 : Représentation graphique des actigrammes du diagramme SADT	23
Figure 13 : Décomposition du diagramme SADT du foyer.....	23
Figure 14: Coupe en face du Schéma autoCAD 2D du foyer à pyrolyse.	25
Figure 15: Vue en 3D du foyer à pyrolyse.....	26
Figure 16 : Vue en face du foyer à pyrolyse réaliser	26
Figure 17 : Evolution de la température de l'eau des trois foyers	28

I. INTRODUCTION

Le Burkina Faso, situé en Afrique de l'Ouest compte une grande partie de sa population soit 74% vivant en zones classées rurales et seulement 26% de sa population habite dans les zones dites urbaines (INSD 2022). Dans les zones rurales, les activités socio-économiques sont pour la plupart à petite ou moyenne échelle. Les populations font en grande partie de l'agriculture. Ce secteur emploie 82% de la population active et de plus en plus de filières primaires de transformation agro-industrielles voient le jour. Cette évolution dans les mœurs de la vie socio-économique s'accompagne d'une consommation proportionnellement accrue en énergie. L'utilisation de plus en plus importante du bois de chauffe liée à l'augmentation de la population en Afrique a eu pour effets la destruction de vastes étendues forestières, la dégradation de la faune et l'appauvrissement des écosystèmes (Mutombo, 2012). En outre, la recherche des bois de chauffe et charbon de bois dans les pays d'Afrique subsahariens, avec une vitesse évaluée à 0,7 % (du taux de déforestation), peut conduire à une situation sans issue (Mbengele *et al.* 2002). Le bois de feu et le charbon de bois représentent la grande partie de prélèvement des bois dans les forêts du Burkina Faso.

Ainsi dans les zones urbaines, le paysage social et économique est plus varié. Du secteur public au secteur privé formel en passant par le secteur des activités informelles, la population active a besoin d'énergie pour produire des biens et services. Ainsi, le besoin énergétique à la hausse est dû au fort taux de croissance de la population (environ 3% par an) et à la consommation énergétique liée d'une part au confort de vie de cette population et d'autre part aux activités génératrices de revenus (INSD 2022).

L'énergie finale consommée par la population au Burkina Faso provient principalement de l'énergie de la biomasse à hauteur de 64%, puis des hydrocarbures et de l'électricité à plus petite proportion (Figure 1). La figure 1 indique la consommation totale d'énergie.

Conception d'un foyer domestique à pyrolyse pour la balle de riz

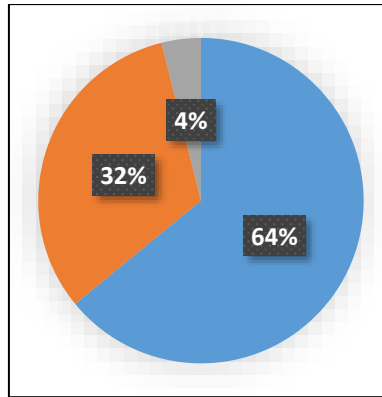


Figure 1 : Consommation finale par source, 2022 (Source: SIE UEMOA les bilans énergétiques)

Ainsi, l'énergie de la biomasse consommée est principalement thermique afin de répondre à des besoins de chaleur à l'échelle familiale, ou pour des activités génératrices de revenus nécessitant dans la chaîne du procédé une source de chaleur pour produire un bien ou un service. Le gisement de biomasse au Burkina Faso est très semblable à celui de toute la sous-région ouest africaine au vu du climat tropical de la zone ainsi que des facteurs géo climatiques. Le pays étant essentiellement agricole, les principales cultures que sont les céréales de sorgho, de mil, de maïs, de riz et de fonio génèrent des quantités importantes de résidus agricoles. En plus des terres cultivées, le pays est couvert à hauteur de 14% de formation forestières ligneuses et arbustives. Les résidus agricoles constituent particulièrement un potentiel de biomasse disponible pour la production de bioénergie tout en protégeant la biodiversité et en évitant le défrichement des forêts. Le potentiel de résidus agricole est estimé à 8 millions de tonnes (Barry et al.2022). Les résidus agricoles servent pour certains d'aliments ou de litière pour le bétail, ou d'intrant à l'artisanat.

La présente étude se focalisera sur l'utilisation de la balle de riz comme combustible pour le procédé de foyer à pyrolyse.

En effet, les résidus issus d'une culture cible comme celle du riz qui connaît une demande en forte hausse pourrait être profitable à une conversion bioénergétique importante (Duku et al.2011 ; Iye et al. 2013). Au Burkina Faso, la quantité de balle de balle de riz mobilisable pour une valorisation énergétique a été estimée à 6497 tonnes en 2018 (Barry et al.2022).

En termes de qualité extractible de résidus par rapport au produit noble en ce qui concerne le riz, le quart de la production constitue de la matière résiduelle à savoir des balles et des tiges de riz (Pode 2016).L'intérêt pour les sous-produits du riz se justifie par sa disponibilité comme potentiel combustible pour une conversion énergétique. En effet, les balles de riz sont peu

Conception d'un foyer domestique à pyrolyse pour la balle de riz

utilisées dans l'alimentation du bétail à cause de leur teneur en silice. Les potentielles utilisations faites sont dans le génie civil (au stade expérimental), pour la rétention d'eau dans les périmètres maraîchers ou dans la confection des litières d'animaux (Barry et al. 2022). En fonction du procédé de conversion, la densité de la balle de riz peut être améliorée par torréfaction ou briquetage (Widjaya et al. 2018). Les analyses réalisées par Murugan et Joseph Sekhar démontrent que la balle de riz est un bon combustible compte tenu de sa faible teneur en humidité (<10%), du bon pourcentage en matière volatile (59,5%) et de sa teneur en carbone fixe de 19,5% exceptés sa forte proportion en cendres (Murugan et Joseph Sekhar 2017).

Dans la région des hauts bassins, quelques unités de pyrolyse à échelle industrielle font de la valorisation énergétique par pyrolyse.

Des foyers à pyrolyse utilisant des résidus agricoles tels les coques de cajou, les balles de riz, les coques d'arachides et les tiges de Cotton ont été mis en place pour réduire l'impact sur l'environnement et améliorer les conditions de travail dans certaines localités du Burkina Faso. Ainsi, sont dénombrés dans la localité de Bobo Dioulasso des foyers à pyrolyse. (Tarpilga, Naon, et Ouédraogo 2022).

Dans cette étude, l'idée fondamentale est de brûler les fumées qui se dégagent de la dégradation de la balle de riz. Aussi promouvoir la réduction de la consommation du bois énergie au sein des ménages à travers la conception d'un foyer amélioré à pyrolyse de la balle de riz pour ainsi diminuer les dépenses énergétiques budgétaires et le temps lié à la cuisson des aliments afin d'améliorer le bien-être de la population en assurant une sécurité alimentaire des ménages. Il s'agit de concevoir et de tester un foyer à pyrolyse de type domestique avec comme combustible la balle de riz.

La question de recherche qui s'assigne à cette étude est :

« Comment concevoir un foyer à pyrolyse qui soit optimal dans son fonctionnement tout en répondant au besoin énergétique contextuel ? »

La réponse à cette question devrait permettre d'aboutir à la fabrication d'un foyer à pyrolyse avec un rendement acceptable.

Afin d'y répondre, des objectifs ont été définis ainsi qu'une méthodologie rigoureuse.

L'objectif principal de la présente étude est donc de concevoir et de tester un foyer à pyrolyse de type domestique avec comme combustible la balle de riz au Burkina Faso.

Les objectifs spécifiques assignés sont destinés à échelonner les différentes étapes de la méthodologie:

Objectif spécifique 1: Faire une analyse des critères de choix de la conception.

Conception d'un foyer domestique à pyrolyse pour la balle de riz

Objectif spécifique 2: Concevoir et réaliser le foyer à pyrolyse.

Objectif spécifique 3: Tester le foyer à pyrolyse conçu

Objectif spécifique 4: Faire une comparaison du foyer conçu avec d'autres types.

Ces objectifs qui s'inscrivent dans l'optique de répondre à la question de recherche sont subdivisés en quatre parties. La 1^{ère} partie fera un état de l'art des foyers à pyrolyse. La 2^{ème} partie parlera des matériels et méthodes. La 3^{ème} partie s'attèlera à répondre aux questions sur la conception du foyer à pyrolyse. Qu'est-ce que concevoir? Comment fixer le cadre de la conception? Comment aboutir à un produit final qui remplit pleinement les objectifs attendus? Ce sont autant de questions auxquelles cette partie répondra mais aussi, il expliquera le processus de fabrication du foyer à pyrolyse. La 4^{ème} partie nous parlera des résultats et discussions. Cette dernière partie vient en conclusion confronter les attentes de la conception aux résultats expérimentaux. L'étude expérimentale permettra d'émettre des perspectives pour l'amélioration du foyer.

II. ETAT DE L'ART DU FOYER A PYROLYSE.

Cette partie fait l'état de l'art du foyer à pyrolyse et de la justification du choix du foyer à pyrolyse. Dans la continuité de ce travail, un modèle a été mis en place.

1. GENERALITE SUR LA VALORISATION THERMOCHIMIQUE DE LA BIOMASSE

Il existe trois différents procédés de conversion de la biomasse par voie thermochimique à savoir la combustion, la pyrolyse et la gazéification de la biomasse.

a. Combustion

La combustion est le mode de valorisation thermochimique le plus ancien et le plus répandu du bois-énergie; en l'occurrence dans les ménages. L'application de la combustion à l'échelle industrielle connaît également de plus en plus de déclinaisons, par exemple dans le secteur agroindustriel, l'énergie calorifique produite est directement utilisée pour le séchage des aliments ou pour des unités utilisant des fours ou des chaudières.

b. Gazéification

La gazéification se définit comme étant un processus de transformation thermochimique de la biomasse en un gaz combustible dont les principaux composés utiles sont l'hydrogène et le monoxyde de carbone (Alhazmi et Loy 2021).

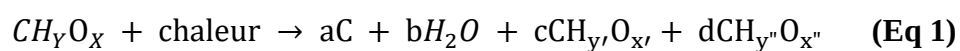
c. Pyrolyse

La pyrolyse peut être définie comme un procédé de décomposition thermique de la biomasse en l'absence d'oxygène. Les produits issus de la pyrolyse peuvent être sous la forme de gaz, de liquide ou de solide (le charbon de bois). Selon l'état du combustible, et les conditions de chauffage il existe différents types de pyrolyses: la pyrolyse lente et la pyrolyse rapide ou flash.

2. PRINCIPE GENERAL DE LA PYROLYSE

Comme définie dans le précédent paragraphe, la pyrolyse est la transformation de la biomasse en gaz, liquide ou solide. Les températures de pyrolyse atteignent des moyennes de 400 °C grâce à la chaleur relayée depuis la zone d'oxydation.

L'équation générale de la pyrolyse s'écrit:



Durant la pyrolyse, la biomasse passe par plusieurs phases : à partir de 300 °C, le principal constituant de la biomasse à savoir la cellulose amorphe commence à se dégrader et à former

Conception d'un foyer domestique à pyrolyse pour la balle de riz

des radicaux carbonyles et carboxyles, il y a aussi formation de monoxyde et de dioxyde de carbone. Lorsque la température dépasse 300 °C, la cellulose cristalline résultante se décompose et il y a la formation de produits carbonés, de goudron et de gaz. L'hémicellulose se décompose en polymère soluble avec la formation de gaz volatils, de charbon et de goudron. La lignine (s'il y en a) se décompose à une température plus élevée variant de 300 à 500 °C et forme du méthanol, de l'acide acétique, de l'eau et de l'acétone. Dans l'ensemble, les grands biopolymères de la biomasse tels que la cellulose, l'hémicellulose et la lignine sont convertis en molécules de carbone (char) et en composés volatiles de taille moyenne. Les hydrocarbures se condensent sous la forme de goudrons. Les réactions chimiques dégageant de l'énergie sont des réactions exothermiques alors que les réactions endothermiques absorbent de la chaleur.

Les principaux produits de la pyrolyse sont le char, les produits gazeux, les goudrons et l'eau. Les proportions de ces dérivés peuvent varier en fonction de la température de la pyrolyse et du type de pyrolyse. La pyrolyse dite lente ou carbonisation est généralement utilisée pour l'obtention de charbon de bois (Yaman 2004). La pyrolyse conventionnelle à température de 450 °C en moyenne produit approximativement un tiers de gaz, un tiers de liquide et un tiers de solide. La figure 2 illustre les produits issus de la pyrolyse à différentes températures.

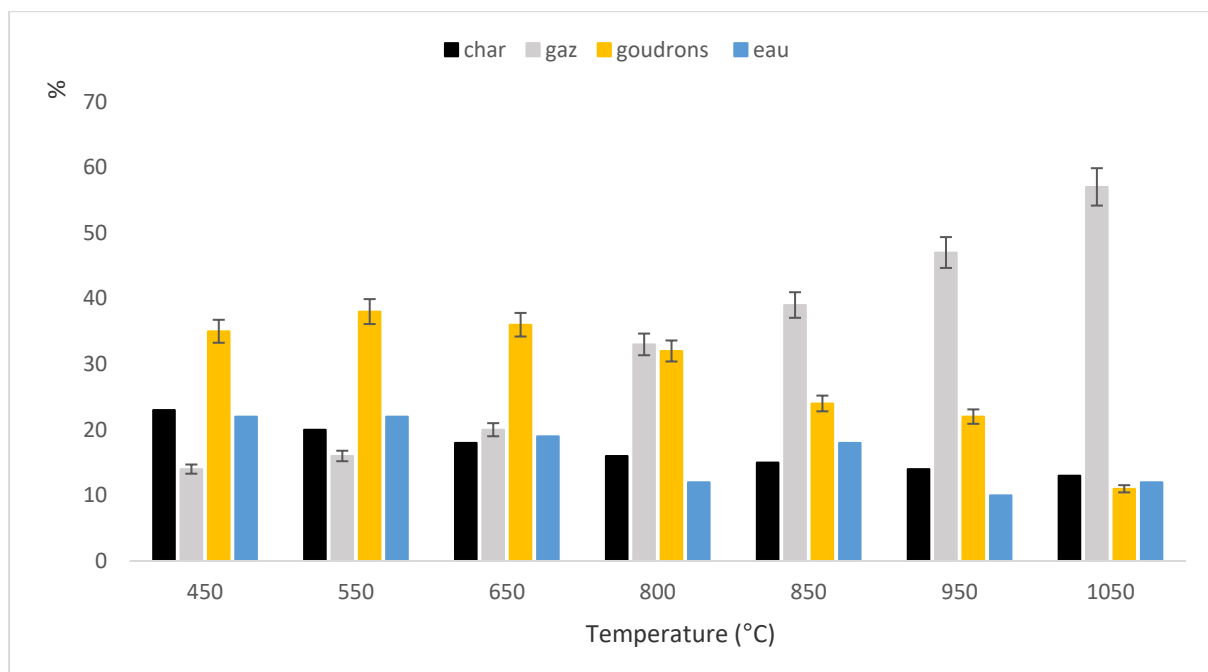


Figure 2 : Rendements massiques de pyrolyse à différentes températures issus de l'étude expérimentale de (Gauthier et al. 2013)

Conception d'un foyer domestique à pyrolyse pour la balle de riz

3. PROPRIETES DES BALLES DE RIZ

La balle de riz est principalement composée de polysaccharides. D'autres scientifiques rapportent cependant son analyse élémentaire ainsi que la nature des éléments minéraux présents. Le tableau I, indique la composition élémentaire de la balle de riz.

Tableau I : Composition élémentaire de la balle de riz

Teneur pondérale [%]						
Reference	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)	Cendre (%)
Kaupp	41,00	5,00	37,60	0,60	-	15,50
Cruz	35,80	5,20	35,80	-	-	23,50
Beagle	42,12	5,35	31,72	0,49	0,07	20,29
Mansaray et Ghaly	37,60-44,20	5,10-5,42	5,10-5,42	5,10-5,42	5,10-5,42	14,70

Source : RANOMENJANAHARY Herivonjy Rochel

Ces résultats montrent une 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), en soumettant une biomasse à la pyrolyse nous donne une perte de 50% du carbone initialement présent. Le carbone restant une fois dans le sol peut absorber des substances phénoliques générées par décomposition de la matière organique; ce qui a un impact favorable sur les micros-organismes et facilitera la disponibilité de l'azote dans le sol.

4. PYROLYSE DE LA BALLE DE RIZ

La caractérisation des biomasses (tiges de coton, rachis de maïs et balles de riz) met en évidence l'influence de la teneur en cendres sur le pouvoir calorifique. Cela permet de faire des choix judicieux sur les matériaux à pyrolyser et ceux qui doivent fournir l'énergie nécessaire à la pyrolyse. Ces résultats montrent une teneur en cendres élevée pour la balle de riz, ce qui influence son pouvoir calorifique.

Par conséquent, la balle de riz n'est pas adaptée à la combustion mais peut être utilisée comme biomasse à pyrolyser si l'apport de chaleur est suffisant pour craquer le goudron condensé sur la biomasse en attente de pyrolyse. (Tarpilga, Naon, et Ouedraogo 2022)

5. LES FOYERS DEJA EXISTANTS (CARACTERISTIQUES ET PERFORMANCES)

Le principe d'un foyer trois pierres est de faire un feu avec des branchettes de bois, et de disposer trois pierres permettant de soutenir une marmite. Cette méthode, très bon marché, a

Conception d'un foyer domestique à pyrolyse pour la balle de riz

pour inconvénient de dégager énormément de fumée et d'être très consommatrice de bois. Les résultats comparatifs des paramètres techniques sont présentés à la figure 4. On peut constater que les vitesses de combustion des deux foyers sont très différentes, à savoir $18,7 \text{ g min}^{-1}$ pour le foyer amélioré et $42,4 \text{ g min}^{-1}$. Le taux de combustion plus élevé dans le foyer traditionnel implique un dégagement de gaz plus important du bois. La moyenne du combustible total consommé était d'environ 350 et 1 065 g, tandis que la puissance de feu utile était de 1, 5 et 1, 9 kW pour le foyer traditionnel et le foyer amélioré. Le rendement augmentait à mesure que la puissance de feu diminuait. Le rendement du foyer amélioré dans la phase de démarrage à froid était d'environ 35 %, alors qu'il n'était que de 12, 6 % pour le foyer traditionnel. Une recherche plus récente a également montré que même une petite amélioration

des foyers à trois pierres pouvait augmenter le rendement (Huboyo et al. 2013). (Rasoulkhani et al. 2018). La figure 3 indique deux foyers traditionnels trois pierres

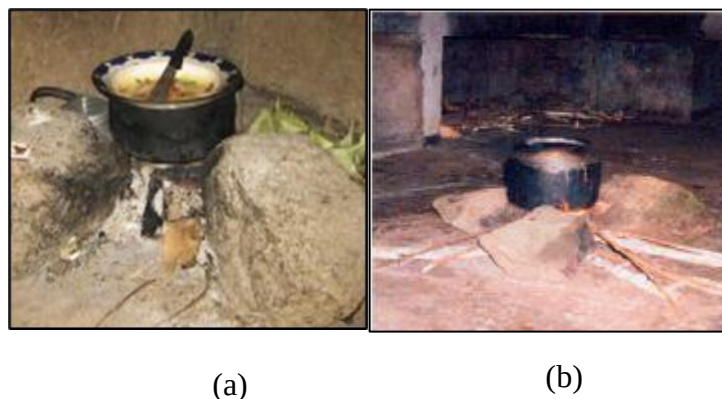


Figure 3 : Foyers traditionnels trois pierres (a) (Ochieng et al. 2013) (b)(Manoj et al. 2013)

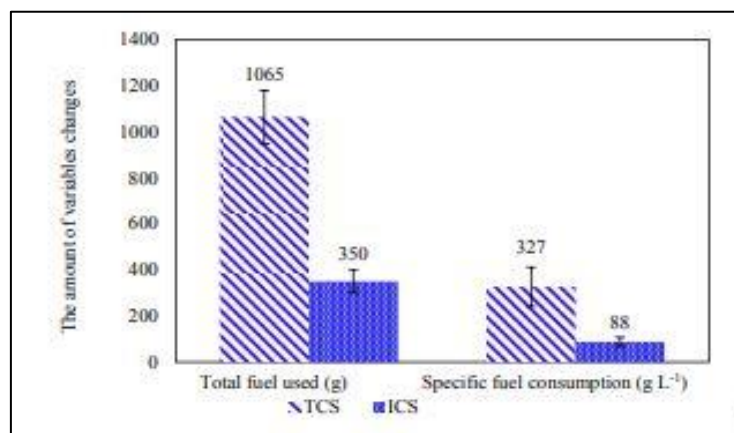
Les foyers traditionnels à biomasse typiques de l'Inde, par exemple, ont un rendement de combustion de 84 à 94 %, ce qui signifie que 6 à 16 % de l'énergie contenue dans le combustible n'est pas convertie en chaleur, mais conservée dans une large gamme de produits de combustion incomplète (PIC). (Smith et al. 2000a).(Venkataraman et al. 2010)

Comme le montre la figure 4, la consommation spécifique de combustible pour le foyer amélioré et le foyer traditionnel était de 88 et 327 g.L⁻¹ respectivement. Dans une dernière tentative d'amélioration des foyers traditionnels dans les zones rurales du Kenya, Ochieng et al. ont déclaré que la modification du foyer traditionnel à trois pierres réduisait considérablement la consommation de combustible(Ochieng et al. 2013). (Rasoulkhani et al. 2018).

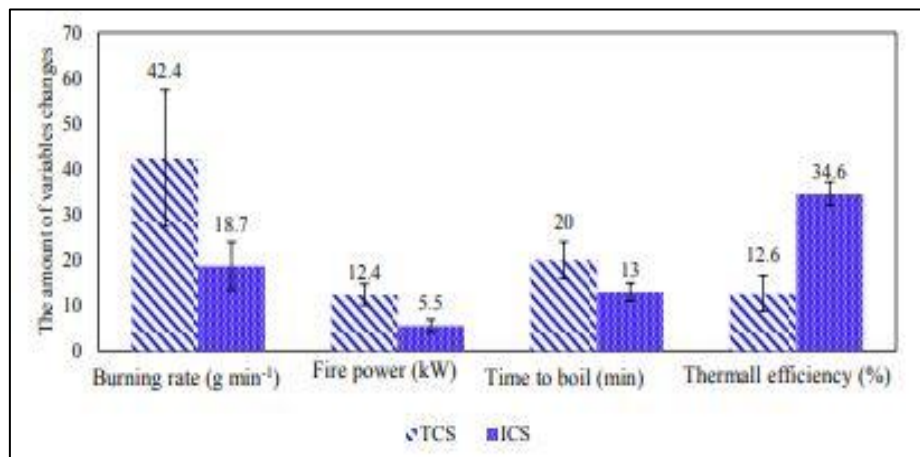
Conception d'un foyer domestique à pyrolyse pour la balle de riz

Il faut aussi noter le temps moyen d'ébullition pour le foyer traditionnel était de 20 minutes, tandis que pour le foyer amélioré, il était réduit à 13 minutes. Dans la pratique, la cuisson pour le foyer traditionnel implique souvent le refroidissement de la marmite en raison du souffle de la flamme par le vent. En même temps, l'accès du vent au cœur du feu dans les foyers traditionnels entraîne une plus grande disponibilité d'oxygène pour les bois. Le préchauffage de l'air secondaire optimise la combustion dans le foyer amélioré. Dans le foyer traditionnel, en revanche, le vent refroidit l'environnement du feu. (Rasoulkhani et al. 2018).

La figure 4 illustre la Performance du test d'ébullition d'eau pour le foyer traditionnel et pour le foyer amélioré.



(a)



(b)

Figure 4 : Performance du test d'ébullition d'eau pour le foyer traditionnel (TCS) et pour le foyer amélioré (ICS) (a) Biomasse utilisée (b) Rendement, Temps d'ébullition, (Rasoulkhani et al. 2018).

6. LES FOYERS A COMBUSTION (AVANTAGES ET INCONVENIENTS)

Avant de vous parler des avantages de ces foyers, la figure 5 indique une image d'un foyer à

Conception d'un foyer domestique à pyrolyse pour la balle de riz

Combustion.



Figure 5: Foyer à combustion (Source: MIVO ÉNERGIE-Wordpress.com)

a. Avantages des foyers à combustion

Les données expérimentales de l'essai de chauffage d'une pièce ont indiqué qu'un foyer à combustion propre, avec un volume de chambre de combustion de $0,014 \text{ m}^3$ et une surface de chauffage de $0,39 \text{ m}^2$, peut fournir un chauffage de qualité pour un appartement de 150 m^2 avec deux chambres à coucher. Des recherches indiquent également que la température moyenne des gaz de combustion du foyer à combustion propre est inférieure de 40°C , en raison d'une meilleure isolation de la chambre de combustion. (Wang et al. 2016).

En plus la vitesse d'élévation de la température du foyer à combustion propre était de $12, 10^\circ \text{C/min}$, la performance d'amortissement a montré que le foyer à combustion propre était plus stable. (Wang et al. 2016).

Encore les technologies récentes de foyers avancés tentent généralement d'aller plus loin que les approches antérieures, en ce sens qu'elles visent désormais à atteindre des rendements de combustion élevés, c'est-à-dire convertir la quasi-totalité de l'énergie du combustible en chaleur, en ne laissant qu'une petite production de PIC. (Venkataraman et al. 2010)

Des résultats indiquent que le foyer à combustion propre produit moins de SO_2 et de NO_x par rapport à ses homologues traditionnels, en brûlant le même combustible et en fournissant la même quantité de chaleur. Les essais sur le terrain ont montré que le foyer à combustion propre à une efficacité thermique plus élevée que celui du foyer conventionnel. (Wang et al. 2016).

Ainsi d'après les résultats du contrôle des gaz de combustion présentés, la concentration moyenne de SO_2 émise par le foyer à combustion propre était de 370 mg/m^3 . De même, la concentration de NO_x du foyer à combustion propre, est de 20 mg/m^3 . (Wang et al. 2016)

Conception d'un foyer domestique à pyrolyse pour la balle de riz

b. Inconvénients des foyers à combustion

Il est désormais reconnu que le changement climatique est une menace majeure et que la combustion de la biomasse domestique est un facteur qui contribue à l'effet de serre par unité d'énergie fournie (en raison des émissions d'oxyde nitreux, de méthane et d'autres polluants à effet de serre importants), bien que sa contribution totale ne soit pas très importante par rapport à d'autres secteurs. En outre, la combustion de la biomasse émet d'autres polluants à courte durée de vie (comme le carbone noir) qui contribuent à la réduction des rendements agricoles et peuvent accélérer la fonte des glaciers et perturber la mousson. (Venkataraman et al. 2010)

Aussi, qu'il s'agisse d'un refroidissement ou d'un réchauffement, les particules issues de la combustion de la biomasse contribuent à la pollution atmosphérique régionale. (Venkataraman et al. 2010)

7. LES FOYERS A PYROLYSE (AVANTAGES ET INCONVENIENTS)

Avant de vous parler des avantages de ces foyers, nous allons parler de la phénoménologie dans le foyer, pour ce cas-ci l'air rentre par les trous et se réchauffe à travers les parois et ressort par les trous du haut et on enflamme le mélange de l'air réchauffé avec les fumées et ça nous donne la pyrolyse. La figure 6 indique une image d'un foyer à pyrolyse.



Figure 6 : Foyer à pyrolyse

a. Avantages des foyers à pyrolyse

Nous pouvons dire qu'en plus de la cuisson, les foyers à pyrolyse sont utilisés dans les systèmes de chauffage et qui ont pas mal d'avantage.

Les foyers à pyrolyse ont un rendement thermique élevé du combustible grâce à une combustion longue et complète.

Conception d'un foyer domestique à pyrolyse pour la balle de riz

Coté Sécurité environnementale : le four émet très peu de fumée, principalement du SO et de la vapeur d'eau, ce qui permet d'obtenir des conduits de fumée propres et secs.

Le combustible se réchauffe très rapidement.

Ils ont un rendement élevé (85 % - 90 %).

La capacité à fonctionner dans une large plage de puissance (de 5 % à 100 % de la puissance maximale).

Concernant les systèmes de chauffage, les fours à pyrolyse ont la possibilité d'être connectés à n'importe quel système de chauffage - à circulation naturelle ou forcée.

Ils ont aussi la possibilité d'utiliser différents types de combustibles, bois massif, combustibles liquides. (Komil et Sirojiddin 2022)

Les foyers à pyrolyse sont chargés de biomasse qui est carbonisée par une source de combustion primaire dans des conditions limitées en oxygène, et brûlent les gaz libérés lors de la carbonisation, produisant ainsi de l'énergie pour la cuisson, ainsi que du biochar. (Dorisel Torres 2010).

Le biochar est la matière riche en carbone produite lorsque la biomasse est chauffée dans des conditions anoxiques ou limitées en oxygène (pyrolyse) (Lehmann, Gaunt, et Rondon 2006) et peut être utilisé comme amendement pour améliorer la fertilité des sols dégradés. (Johnson et al. 2009)(Whitman et al. 2011).

Aussi les expériences ont montré que le gaz de pyrolyse et le charbon peuvent jouer un rôle important dans la réduction des NO_x, mais le ratio de contribution diffère selon les expériences. (Li et al. 2019)

Encore la pyrolyse de la biomasse produit de la bio-huile, du charbon de bois et du gaz qui peuvent être convertis en gaz de synthèse pour la production d'énergie renouvelable(Roy et Dias 2017).Tandis que le charbon de bois peut être utilisé comme réducteur dans le haut fourneau (Suopajärvi et al. 2017) et des biocarburants peuvent être produits à partir des produits liquides de la pyrolyse(Florentino-Madiedo et al. 2018).

Des recherches antérieures ont montré que la pyrolyse du charbon peut former certains gaz réducteurs, tels que le monoxyde de carbone (CO), les hydrocarbures (C_mH_n, y compris le méthane et d'autres radicaux carbone-hydrogène) et de l'hydrogène (H₂) (Daood et al. 2013). Par conséquent, les oxydes d'azote peuvent être réduits en azote (N₂) par ces types de gaz

Conception d'un foyer domestique à pyrolyse pour la balle de riz

réducteurs (Smoot et al, 1998). En outre, la littérature (He et al. 2006) a rapporté que le charbon peut réduire les émissions de NO_x en N₂. (Wang et al. 2016).

Les fours à pyrolyse destinés au chauffage des habitations dans les exploitations agricoles individuelles se distinguent par leur facilité d'utilisation et leur faible consommation de combustible. (Komil et Sirojiddin 2022)

b. Inconvénients des foyers à pyrolyse

Ces fours présentent les inconvénients suivants:

- La taille est trop grande.
- Nécessité d'un endroit pour stocker le bois de chauffage.
- La pompe à eau, le ventilateur et le thermocouple sont nécessaires au bon fonctionnement et au contrôle, ce qui crée une connexion électrique.
- Le condensat peut s'accumuler dans le parcours des fumées, qui doit donc être protégé contre la chaleur.

Les fours à pyrolyse sont divisés en deux catégories en fonction du type de fumée:

- extraction naturelle de la fumée;
- extraction forcée de la fumée (utilisation d'un ventilateur)

L'extraction naturelle de la fumée est réalisée à l'aide d'un tuyau d'extraction de fumée haut. L'extraction forcée de la fumée est générée à l'aide d'un ventilateur à moteur électrique. Le four à ventilation forcée est plus efficace mais dépend de l'électricité. (Komil et Sirojiddin 2022)

Tous les composants de la pyrolyse contribuent aux réactions formation de suie dans le système de combustion, mais certains dans une plus grande mesure que d'autres (Maxwell et al. 2020).

8. COMPARAISON DES DEUX TYPES DE FOYERS (FOYERS A PYROLYSE ET FOYERS A COMBUSTION)

Pour les foyers à combustion améliorée, la totalité du carbone de la biomasse combustible est convertie en carbone dans les émissions lors de la combustion, alors que dans le foyer à pyrolyse, 60 % du carbone est conservé sous forme de biochar. (Rypdal et al. 2009) (Whitman et al. 2011)

Aussi les réductions simulées de l'impact moyen des gaz à effet de serre (GES) sont de 3,50 tCO₂/ménage/an pour le foyer à combustion améliorée et de 3,69-4,33 tCO₂/ménage/an pour les foyers pyrolytiques, dont le biochar représente directement 26-42% du total. (Whitman et al. 2011).

Conception d'un foyer domestique à pyrolyse pour la balle de riz

9. JUSTIFICATION DU CHOIX DES FOYERS A PYROLYSE

Vu l'ensemble des avantages des foyers améliorés à pyrolyse qui étant meilleur comparativement à celui des foyers à combustion justifie notre choix des foyers améliorés à pyrolyse.

10. METHODE DE CONCEPTION

Plusieurs méthodes de conceptions existent, c'est le cas de la méthode de conception de Belonio, (Belonio 2005).

Voici quelques paramètres importants à prendre en compte pour déterminer la taille et le ventilateur approprié du foyer à gaz à pyrolyse de balle de riz.

Les paramètres suivants et leur formule sont présentés:

- La quantité d'énergie nécessaire à la cuisson des aliments peut être calculée en utilisant la formule suivante

$$Q_n = \frac{M \times E_s}{T} \quad (\text{Eq 2})$$

Où:

Q_n - énergie nécessaire, kCal/h

M - masse des aliments, kg

E_s - énergie spécifique, kCal/kg

T - temps de cuisson, h

- Le diamètre du réacteur

Ce diamètre est fonction de la quantité de combustible consommée par unité de temps (TCC) à la gazéification spécifique (TGS) de la balle de riz, qui se situe entre 110 et 210 kg/ m²-hr ou 56 à 130, (Belonio 2005). Le diamètre peut être calculé avec la formule suivante :

$$D = \sqrt{\frac{1,27 \times TCC}{TGS}} \quad (\text{Eq 3})$$

Où:

D - diamètre du réacteur, m

TCC – débit massique de consommation de combustible, kg/h

TGS - taux de gazéification spécifique de la balle de riz,

Conception d'un foyer domestique à pyrolyse pour la balle de riz

110-210 kg/ m²-h

- La hauteur du réacteur

La hauteur du réacteur peut être calculée à l'aide de la formule suivante,

$$H = \frac{TGS \times T}{d} \quad (\text{Eq 4})$$

Où:

H - longueur du réacteur, m

TGS - taux de gazéification spécifique de la balle de riz, kg/ m²-h

T - temps nécessaire pour consommer la balle de riz, h

d - densité de la balle de riz, 1,25 kg/ m³

- Le débit d'air

Le débit d'air peut être calculé à l'aide de la formule suivante

$$\text{Débit, air} = \frac{e \times AS \times TCC}{d} \quad (\text{Eq 5})$$

Où:

Débit d'air -, kg.m³/h

e – rapport d'équivalence 0,3 à 0,4 en gazéification. En pyrolyse on prendra **0,1**

TCC - taux de consommation de combustible, kg/h

AS - air stœchiométrique de la balle de riz, 4,5 kg d'air

d - densité de la balle de riz, 1,25 kg/ m³

- Le rendement

$$\eta = \frac{Q_e}{Q_{re}} \quad (\text{Eq 6})$$

Où:

η : Rendement thermique du foyer en %

Q_e : L'énergie reçue par l'eau [kj]

Q_{re} : L'énergie réelle dégagée par la balle de riz [kj]

III. MATERIEL ET METHODES

1. ANALYSE MULTICRITERES DU CHOIX DE LA CONCEPTION

Une analyse multicritère a été faite dans le cadre de la conception de ce foyer: il s'agit de l'analyse fonctionnelle qui sera présente dans la partie résultat avec tous les détails.

2. CONCEPTION ET REALISATION

a. Conception

Relativement à la littérature des foyers améliorés, notre choix s'est porté sur un foyer à pyrolyse en raison de ses multiples avantages. Les formules suivantes ont permis sa mise en place.

Premièrement nous avons la quantité d'énergie avec la formule suivante:

$$Q_n = \frac{M \times E_s}{T} \quad (\text{Eq 7})$$

Deuxièmement nous avons la hauteur avec la formule suivante:

$$H = \frac{TGS \times T}{d} \quad (\text{Eq8})$$

Troisièmement nous avons le diamètre du réacteur avec la formule suivante:

$$D = \sqrt{\frac{1,27 \times TCC}{TGS}} \quad (\text{Eq 9})$$

En fin, nous avons un ventilateur à partir du débit d'air, dont la formule est la suivante :

$$\text{Débit, air} = \frac{e \times AS \times TCC}{d} \quad (\text{Eq 10})$$

b. Réalisation

A l'issue de la conception, la réalisation s'est déroulée en plusieurs étapes.

Vous pouvez trouver en annexe plus de compréhension concernant la réalisation.

Dans ces différentes étapes plusieurs outils et équipements ont été utilisés.

- Cisaille à tôle : il s'agit d'un outil utilisé pour découper les tôles. Pour notre cas il est surtout utilisé pour couper les matériaux de nos réacteurs externe et interne.
- Perceuse : cet outil est utilisé pour percer les réacteurs, dans l'optique d'avoir des trous.
- Plieuse : il est utilisé pour bien plier les tôles.
- Machine à souder : elle est utilisée pour souder les pièces métalliques entre elles.

Conception d'un foyer domestique à pyrolyse pour la balle de riz

- Tôle acier est utilisée pour la réalisation du foyer.
- Rouleau : il permet d'avoir une forme cylindrique de la tôle.
- Pince : elle sert à tenir les pièces des matériaux lors des soudures.

3. METHODE ET EVALUATION DE PERFORMANCE

Dans le cadre de l'évaluation des performances du foyer, un test a été réalisé avec les différents matériels.

Tout d'abord il faut noter que nous avons utilisé le logiciel QGIS pour réaliser notre zone d'étude et dans le cadre de la réalisation, nous avons utilisé le logiciel Autocad pour les schémas 2D et 3D qui seront présentés dans la partie résultat

Concernant le test d'ébullition d'eau que nous avons réalisé, plusieurs matériels ont été utilisés à savoir :

- Biomasse : utilisée pour déterminer la quantité de biomasse nécessaire pour bouillir l'eau
- Eau utilisée pour bien faire les tests.
- Marmite utilisée pour bouillir l'eau.
- Balance permet de peser les quantités d'eau et de biomasse utilisés.
- Coussin chauffant résistant, permet de protéger la balance lors de la pesée.
- Minuteur, qui permet de chronométrer les essais.
- Thermomètre permet l'enregistrement de la température ambiante.
- Petite pelle/spatule pour éliminer le biochar du poêle lors du pesage.
- Plateau en métal pour maintenir le biochar pour le pesage.
- Gants résistant à la chaleur, lors des prises de marmite chaude pour les pesées
- Seau d'eau pour remplir la marmite.
- Briquets, Allumettes et dispositifs d'aide à l'allumage.
- Thermocouples pour relever les températures.
- Rallonge électrique pour brancher la balance ou d'autres utilisations électriques.

Après le test il y a le rendement qui nous permet de voir si notre foyer est performant. Cette vérification se fait par le calcul du rendement à travers la formule suivante.

$$\eta = \frac{Q_e}{Q_{re}} \quad (\text{Eq 11})$$

Où :

η : Rendement thermique du foyer %

Conception d'un foyer domestique à pyrolyse pour la balle de riz

Q_e : l'énergie reçue par l'eau [kJ]

Q_{re} : l'énergie réelle dégagée par la balle de riz [kJ]

4. BILAN MASSE – ÉNERGIE

a. Bilan Masse

Le bilan de masse ou bilan de matière permet la différence entre la masse des entités entrantes dans le foyer à pyrolyse à savoir l'air et la biomasse ; et la masse des entités sortantes à savoir le gaz produit et les cendres. Cette différence permet d'évaluer la fermeture du bilan de matière.

$$\sum input - \sum output = 0$$

La figure 7 indique le principe de fonctionnement du foyer à pyrolyse de balle de riz.

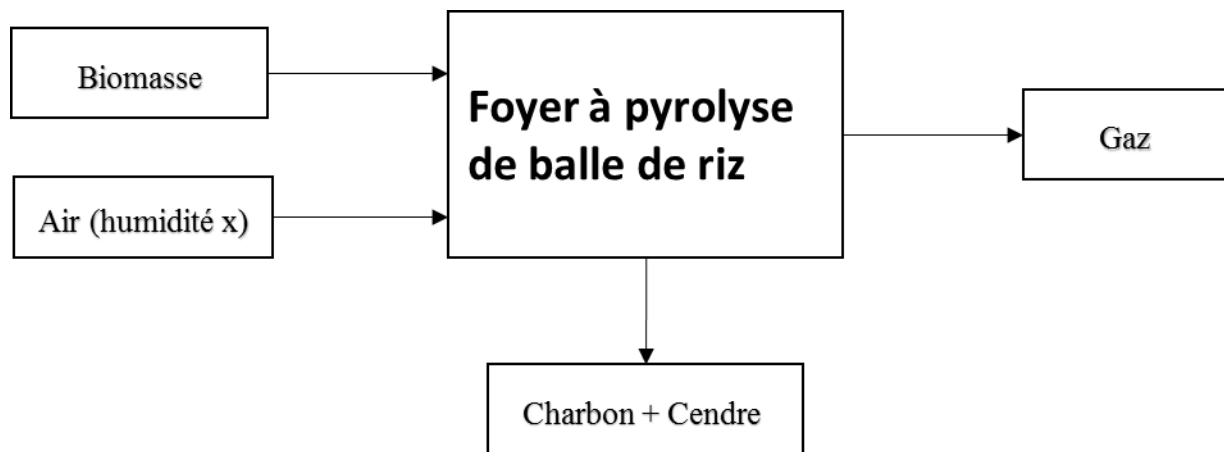


Figure 7 : Principe de fonctionnement du foyer à pyrolyse de balle de riz

$$m_{\text{biomasse}} + m_{\text{air}} = m_{\text{gaz}} + m_{\text{cendres}} \text{ [Kg] (Eq 12)}$$

Mesure de la masse de biomasse

La balle de riz est le combustible utilisé pour les essais. Elle est conditionnée dans des sacs d'une vingtaine de kg en moyenne.

Avant chaque test la balle de riz est séchée et pesée avant d'être déversée dans le foyer à pyrolyse. Ainsi la masse de la balle de riz est déterminée avant chaque test et déterminera en partie la durée de l'essai. Sachant que la balle de riz a une densité apparente moyenne de 120 kg/m^3 , le réacteur est rempli à la limite d'une capacité de moyenne de 2,30 kg.

Mesure de la masse d'air

La masse d'air introduite durant un test de pyrolyse est déduite du débit volumique d'air admis durant le test et du temps qu'a duré l'essai.

Conception d'un foyer domestique à pyrolyse pour la balle de riz

$$m_{\text{air}} = \dot{v}_{\text{air}} \times \rho_{\text{air}} \times t \quad (\text{Eq 13})$$

m_{air} est la masse de l'air, $\dot{v}_{\text{air}}$ est le débit volumique d'air et ρ_{air} la masse volumique de l'air. Les caractéristiques de l'air considéré pour les bilans masse-énergie ont été mesurés grâce au TESTO 400.

Mesure de la masse de charbon et des cendres

Le charbon et les cendres issues d'un essai sont évacués seulement à la fin des essais et après refroidissement du réacteur.

b. Bilan Energie

Le bilan d'énergie est calculé à partir du bilan de masse. La masse de chaque entité entrante ou sortante est multipliée par l'énergie qu'elle referme. Ce bilan permet d'évaluer la différence énergétique des intrants et des extrants sur un essai.

$$E_{\text{biomasse}} + E_{\text{air}} = E_{\text{flamme}} + E_{\text{Charbon}} + E_{\text{cendre}} + E_{\text{fumée}} \quad (\text{Eq 14})$$

Energies de la balle de riz

L'énergie que fournit la balle de riz lors d'un test de pyrolyse est calculée à partir du pouvoir calorifique du combustible et de la masse de biomasse introduite dans le réacteur au début de l'essai.

$$E_{\text{biomasse}} = m_{\text{biomasse}} \times \text{PCI}_{\text{mesuré}} \quad (\text{Eq 15})$$

Energie du charbon et des cendres

L'énergie contenue dans les charbons et les cendres est calculée comme suit

$$E_{\text{Cendres}} = m_{\text{cendres}} \times (\text{PCI} + \text{CP}_{\text{cendres}} \times (T - T_{\text{ref}})) \quad (\text{Eq 16})$$

$$E_{\text{charbon}} = m_{\text{charbon}} \times (\text{PCI} + \text{CP}_{\text{charbon}} \times (T - T_{\text{ref}})) \quad (\text{Eq 17})$$

IV. RESULTATS ET DISCUSSION

1. RESULTATS

Dans cette partie nous allons vous présenter tous les résultats que nous avons obtenus tout au long de ce travail.

a. Analyse fonctionnelle

Dans l'optique de suivre une méthodologie scientifique et rigoureuse dans la réalisation de notre prototype, nous avons dû faire recours à l'analyse fonctionnelle qui est une méthode qui intègre le besoin qui marquera les caractéristiques du produit, les solutions techniques pour satisfaire ses exigences, ainsi que l'analyse topologique qui pose les bases du développement futur du produit (Briscoe et Wolfgang 2018). Nous l'utiliserons afin de définir clairement les besoins de l'utilisateur en élaborant un CdCF et en identifiant les fonctions de service et les fonctions de contraintes (Bououchma et Herrou 2023). Cette méthode est utilisée pour analyser le produit avant de procéder à sa réalisation, elle permet d'étudier le produit ainsi que ses contraintes. L'analyse fonctionnelle se déroule en deux étapes : la première "analyse fonctionnelle externe" et la seconde "analyse fonctionnelle interne"(Ahmed, et al 2022).

La figure 8 indique un foyer à pyrolyse pour la balle de riz.

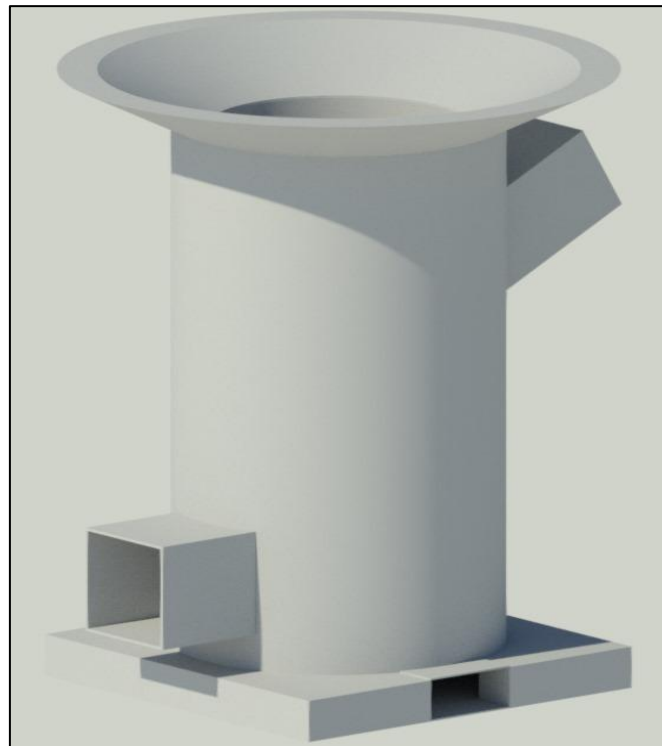


Figure 8 : Foyer à pyrolyse pour la balle de riz

1) Bête à cornes

Conception d'un foyer domestique à pyrolyse pour la balle de riz

Pour ce faire, l'outil graphique illustré à la figure 9, appelé "bête à cornes", est utilisé pour répondre aux questions suivantes : à qui/à quoi le système sert-il ? Sur qui/quoi opère-t-il ? Dans quel but ? (Briscoe et Wolfgang 2018).

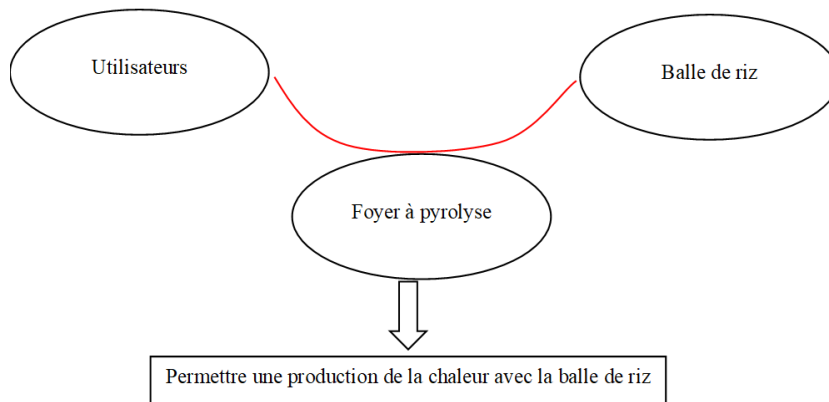


Figure 9 : Outil «Bête à cornes» (Briscoe et Wolfgang 2018).

2) Pieuvre

Identification des fonctions : Cette étape est très importante au cours d'un processus de conception. En effet les fonctions reflètent la description du besoin à satisfaire par le système et elles guident l'utilisation des solutions techniques à analyser ultérieurement. Les fonctions du système sont représentées par le diagramme pieuvre, qui présente le système (composante de l'étude) entouré d'éléments de l'environnement externe illustrés dans la figure 10.

Cet environnement externe est relié par des fonctions (FP, FC1, FC2, FC3 etc.....).

En d'autres termes, le rôle du diagramme pieuvre est de définir les relations qui peuvent exister entre les éléments de l'environnement du système. Ainsi, les fonctions de service, séparées en fonctions principales (FP) et fonctions de contrainte (FC) sont définies. La figure 10 indique le diagramme pieuvre :

Liste des éléments du milieu extérieur

- Utilisateurs
- Milieu ambiant (Humidité, corrosion)
- Sol
- Local de stockage
- Esthétique
- Normes de Sécurité

Conception d'un foyer domestique à pyrolyse pour la balle de riz

- Ergonomie
- Marmite
- Coût de fabrication
- Balle de riz
- Entretien

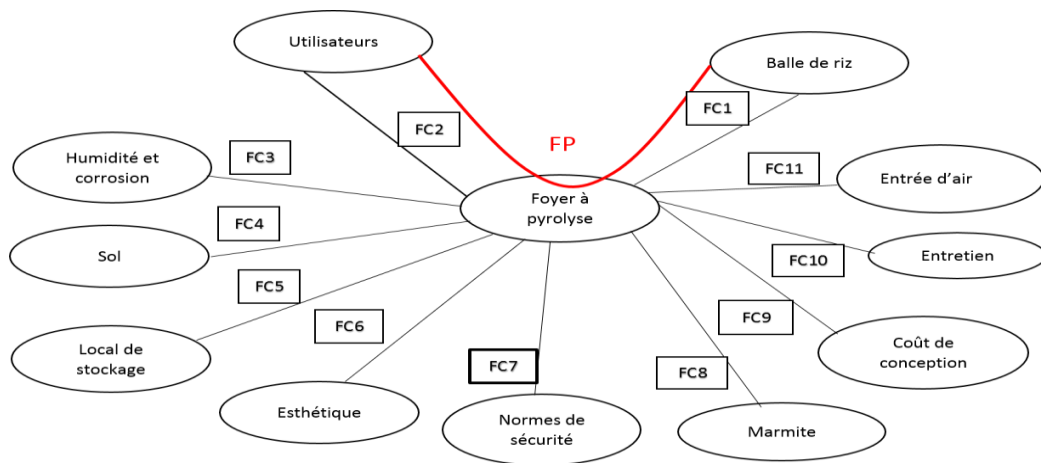


Figure 10 : Diagramme pieuvre (Briscoe et Wolfgang 2018).

FP : Permettre une production de chaleur avec la balle de riz

FC1 : Recevoir une quantité suffisante de balle de riz sec

FC2 : Être facilement utilisable par l'utilisateur.

FC3 : Résister à l'humidité et à la corrosion

FC4 : Tenir en équilibre sur le sol

FC5 : Tenir dans le local de stockage

FC6 : Plaire à l'utilisateur

FC7 : Respecter les normes de sécurité

FC8 : Être adaptée à la marmite

FC9: Avoir un coût de fabrication peu élevé

FC10 : Facilité d'entretien

FC11 : Forcer l'entrée d'air

Conception d'un foyer domestique à pyrolyse pour la balle de riz

3) Tableau de caractérisation

Le tableau II, indique la caractérisation des fonctions en termes de critère et de flexibilité

Tableau II : Tableau de caractérisation des fonctions

Fonction de service	Critère	Niveau	Marge de flexibilité	Flexibilité (Classe)
FP : Permettre une production de chaleur avec la balle de riz	-Température	600°C	+/- 100°C	F2
FC1 : Recevoir une quantité suffisante de balle de riz	Dimensions	55cm	+ / -5cm	F2
FC2: Être facilement utilisable par l'utilisateur	-Poids -hauteur	6,46kg 66 cm	+/-2 cm +/-5 cm	F0 F2
FC3 : Résister aux conditions du milieu ambiant	-Humidité -Corrosion	Insensible à l'humidité et la corrosion	-	F0
FC4 : Tenir en équilibre sur le sol	-Adhérence au sol	Stabilité	-	F0
FC5 : Tenir dans le local de stockage	Dimensions (Hxl)	66cmx33cm	+/- 5	F2
FC6 : Plaire à l'utilisateur	- Formes -Couleur	Circulaire Noir	-	F3 F3
FC7 : Respecter les normes de sécurité	Normes	Isolation de la chaleur et les normes en matière d'émission de gaz toxique. CO, goudrons etc...	- -	FO FO

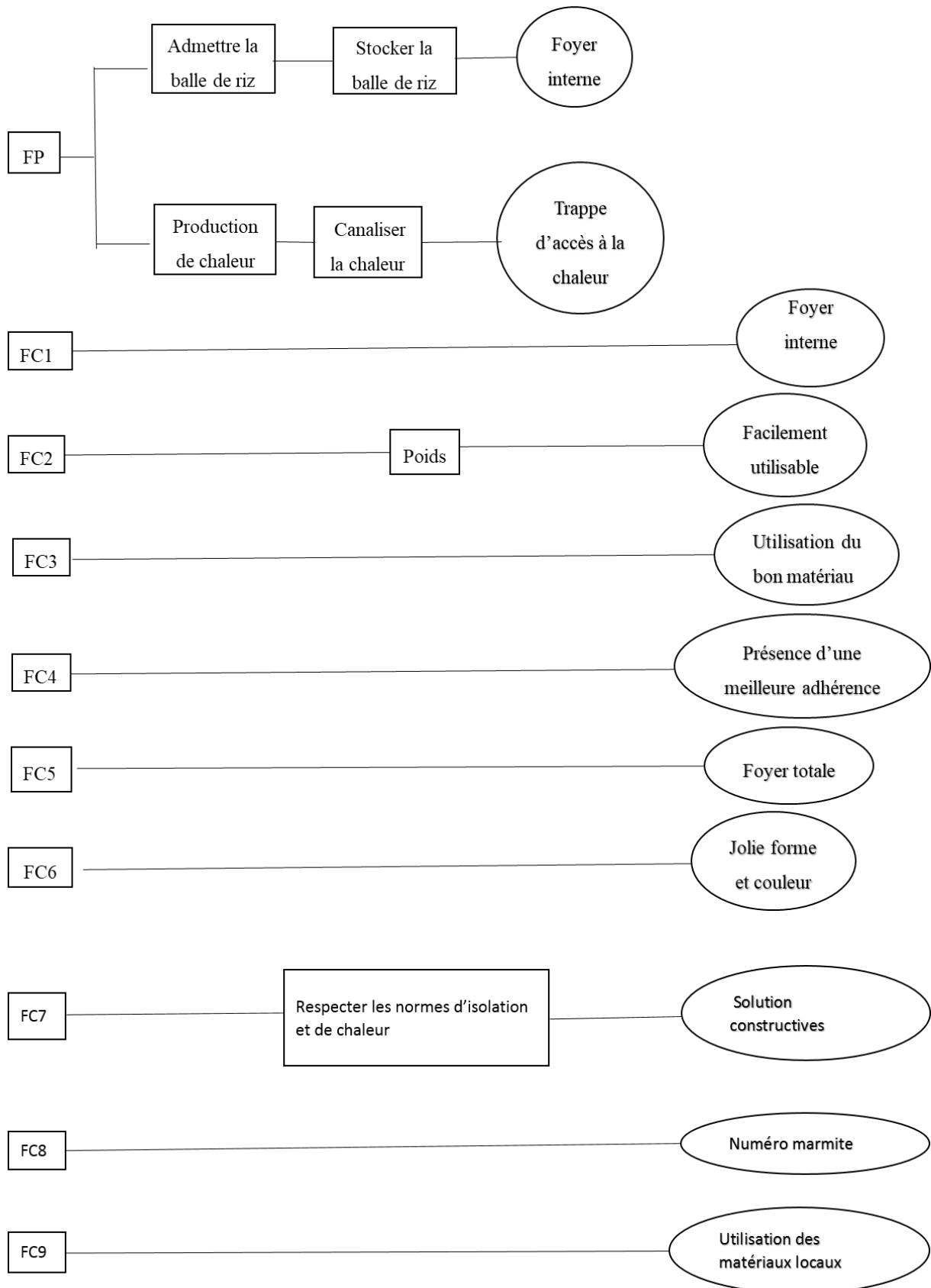
Conception d'un foyer domestique à pyrolyse pour la balle de riz

FC8 : être adaptée à la marmite	Diamètre	Marmite 2	2 à 10	F2
FC9 : Avoir un coût faible de conception	Matériau Main d'œuvre Soudure	12000 FCFA 18000 FCFA 12500 FCFA	+/-1000 FCFA +/-1000 FCFA +/-500 FCFA	F2 F2 F2
FC10 : Facilité d'entretien	Cendres Nettoyage	85% 85%	+/-5 +/-5	F2 F2
FC11 : Forcer l'entrée d'air	Débit d'air	22,7 CFM	+/-2	F2

4) FAST

Analyse technico-fonctionnelle : elle vise à analyser le système du point de vue technique. En fait, elle assure la transition entre les fonctions de service et les fonctions techniques, avant de proposer des solutions constructives qui seront mises en œuvre. A cet effet, le diagramme FAST permet de bien comprendre un produit complexe, puis d'introduire différents scénarios de solutions techniques, jusqu'aux équipements constitutifs du produit, en répondant aux questions : Pourquoi ? Quand ? Comment ? À partir d'une fonction donnée (Bououchma et Herrou 2023). La Figure 11 indique l'analyse technico-fonctionnelle du foyer.

Conception d'un foyer domestique à pyrolyse pour la balle de riz



Conception d'un foyer domestique à pyrolyse pour la balle de riz

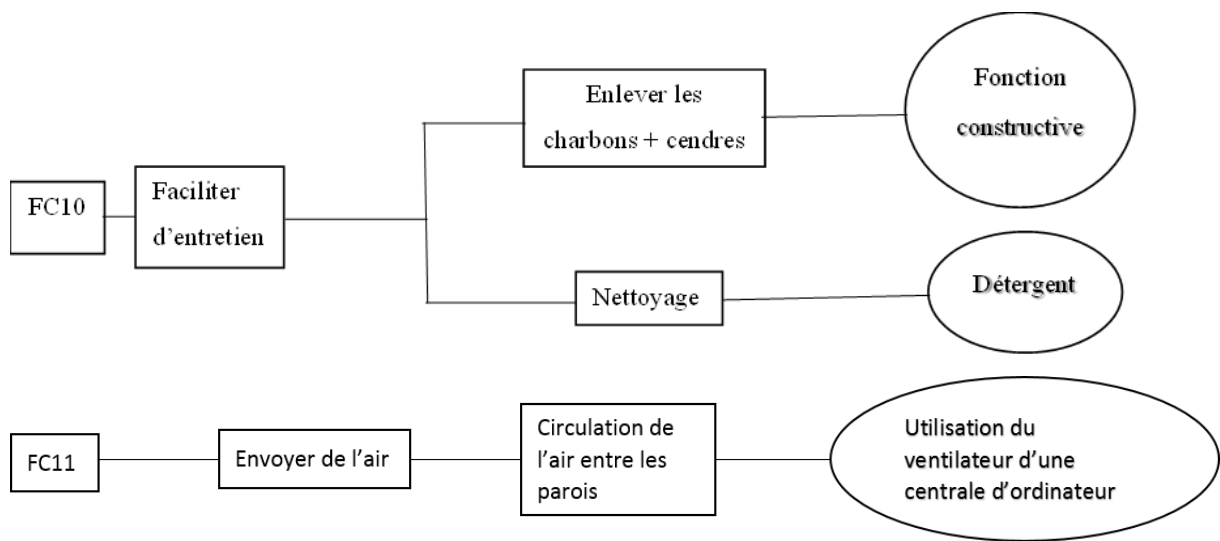
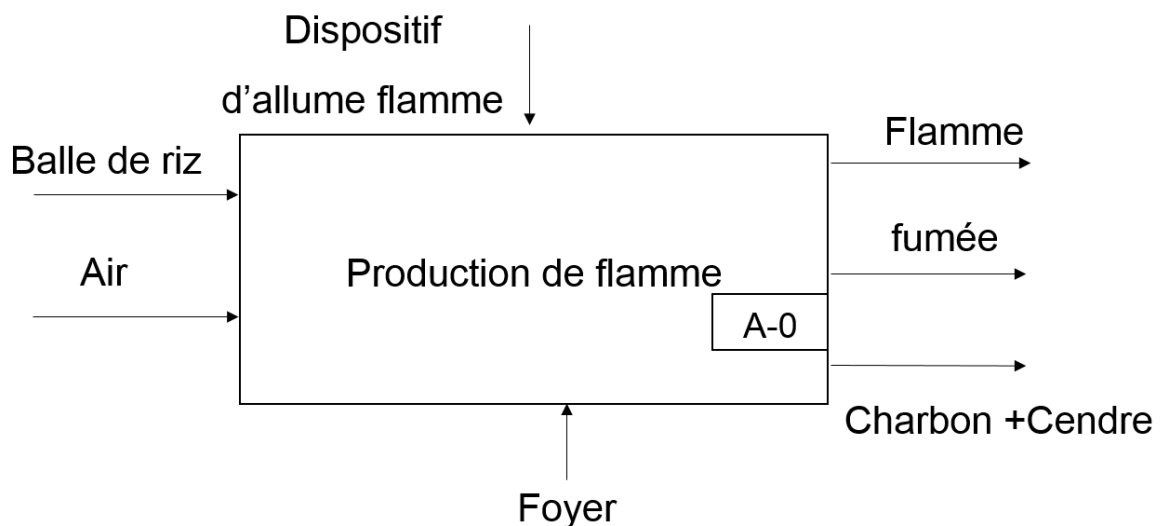


Figure 11 : Diagramme FAST

5) SADT

La méthode SADT est une méthode graphique qui part du général pour aller au particulier. Elle permet de décrire des systèmes où coexistent des flux de matières d'œuvre (produits, énergies et informations). L'analyse SADT va permettre d'organiser ces flux de données pour donner une vision globale du système puis par une analyse des niveaux successifs, permettre de préciser de plus en plus finement le rôle de chacun des éléments du système.

La figure 12 indique la représentation graphique des actigrammes (moyens, entrées, contrôles, sorties) du digramme SADT.



Conception d'un foyer domestique à pyrolyse pour la balle de riz

Figure 12 : Représentation graphique des actigrammes du diagramme SADT

La Figure 13 indique la décomposition du diagramme SADT du foyer

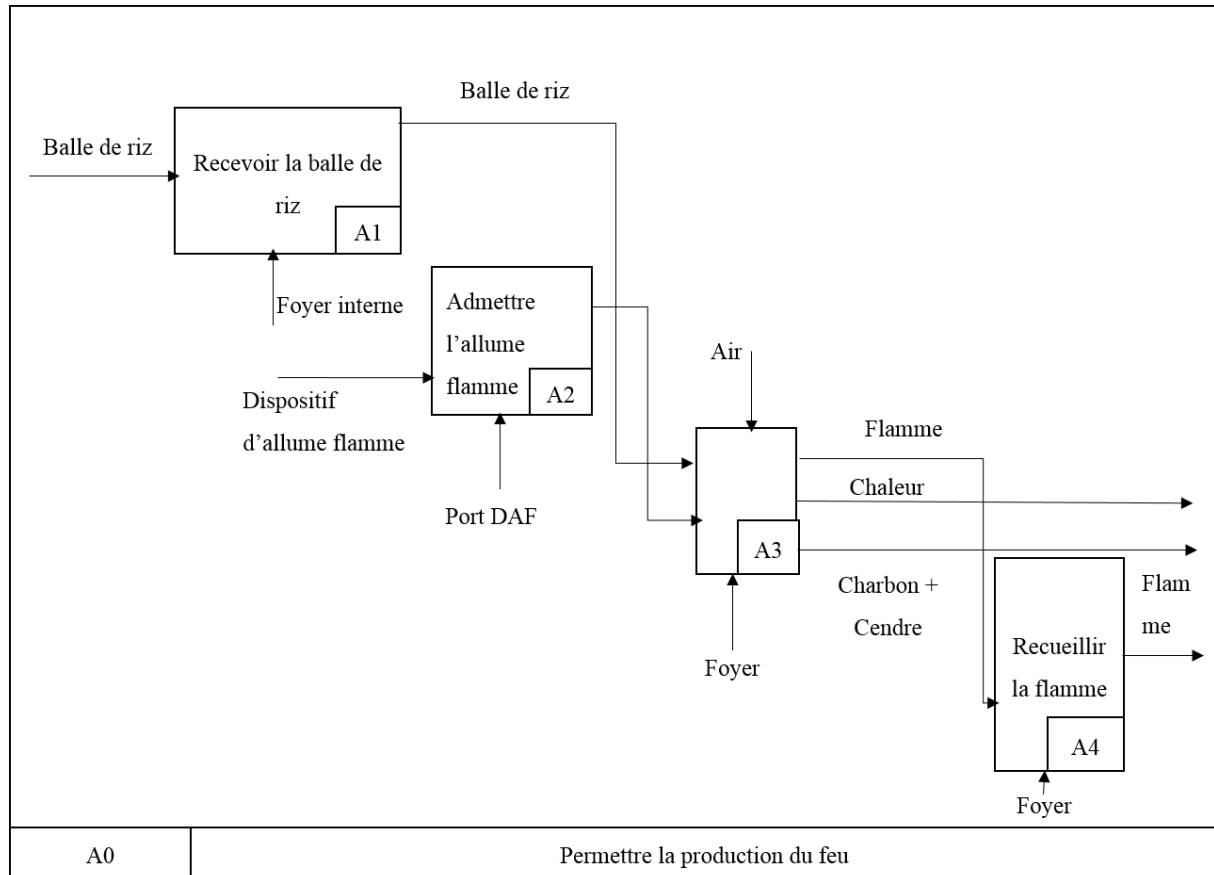


Figure 13 : Décomposition du diagramme SADT du foyer.

Conception d'un foyer domestique à pyrolyse pour la balle de riz

b. Conception et Réalisation

Dans le cadre de la conception, une méthodologie rigoureuse a été menée à savoir les calculs de diamètre et hauteur du réacteur interne.

Concernant la réalisation, le prototype a été conçu à partir du logiciel AutoCAD. Il a été fait en 2D et en 3D, représenté respectivement sur les figures 15 et 16 ci-dessous

Pour mieux comprendre la réalisation plusieurs images ont été insérées en annexe.

i. Conception

La relation ci-dessous nous a permis de trouver la valeur du diamètre de notre réacteur. Il faut noter que j'ai pris la valeur 90 kg/ m²-h car si je change cette valeur, mon diamètre changera aussi.

$$D = \sqrt{\frac{1,27 \times TCC}{TGS}} \quad (\text{Cf, Eq 9})$$
$$D = \sqrt{\frac{1,27 \times 4}{90}}$$

$$D = 0,25 \text{ m ou } 25 \text{ cm}$$

C'est la même chose pour la hauteur du réacteur, nous avons eu sa valeur avec la relation suivante. Les 0,62 signifient que le foyer fonctionnera pendant 35 min pour un chargement.

De même les 90 de la hauteur me permettent de conserver une hauteur de 55 cm.

$$H = \frac{TGS \times T}{d} \quad (\text{Cf, Eq 8})$$

$$H = \frac{90 \times 0,62}{100}$$

$$H = 0,55 \text{ m ou } 55 \text{ cm}$$

La relation suivante nous a permis de prendre le type de ventilateur

$$\text{Débit, air} = \frac{0,1 \times 4,5 \times 4}{1,25} \quad (\text{Cf, Eq 10})$$

$$\text{Débit, air} = 1,45 \text{ m}^3/\text{h}$$

Suite à ce débit d'air nous avons choisi un ventilateur de dimensions : 92×92×25 mm.

Type : DSB0912M

Conception d'un foyer domestique à pyrolyse pour la balle de riz

ii. Réalisation

Dans cette partie nous avons les schémas AutoCAD 2D avec ces différentes dimensions, le 3D et une vue réelle du foyer à pyrolyse. Ainsi nous disons que ce foyer est composé de plusieurs éléments à savoir :

- Le foyer externe
- Le foyer interne
- Le support marmite
- Le chargement de la balle de riz
- Le ventilateur avec les entrées et sortie d'air
- Le cendrier avec la sortie des cendres

La figure 14 indique la coupe en face du Schéma AutoCad 2D du foyer à pyrolyse conçu.

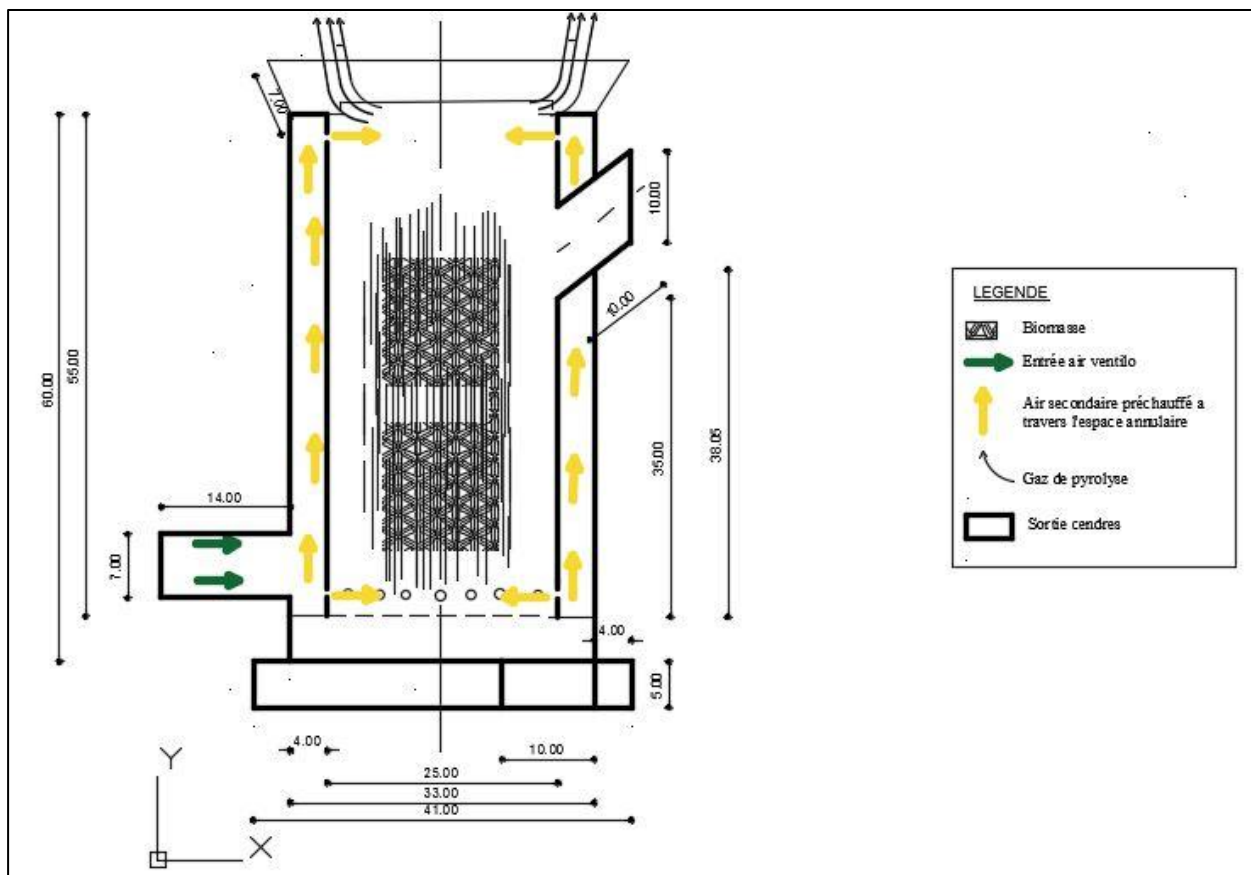


Figure 14: Coupe en face du Schéma autoCAD 2D du foyer à pyrolyse.

La figure 15 indique la vue en 3D du foyer à pyrolyse conçu.

Conception d'un foyer domestique à pyrolyse pour la balle de riz



Figure 15: Vue en 3D du foyer à pyrolyse.

La figure 16 indique la vue en face du foyer à pyrolyse réaliser



Figure 16 : Vue en face du foyer à pyrolyse réaliser

Conception d'un foyer domestique à pyrolyse pour la balle de riz

c. Résultats des tests TEE

Le tableau III, indique les résultats du TEE qui sont présentés dans la procédure ci-dessous

Tableau III : Récapitulatif des essais des trois foyers

	Foyer pyrolyse	Foyer Roudé	Foyer 3 pierres
Quantité eau (Kg)	7	7	7
Temps d'ébullition (min)	10min30S	12	23
Quantité de biomasse (Kg)	2,3	1,186	1,214
Energie théorique (Kj) $Q_0 = m \cdot PCI$	$2,3 \cdot 14$	$1,186 \cdot 18,5$	$1,214 \cdot 18,5$
Energie résiduel, char (Kj) $Q_1 = m \cdot PCI$	$0,82 \cdot 26$	$0,116 \cdot 29,5$	$0,120 \cdot 29,5$
Energie réelle reçue (Kj) $Q_2 = Q_0 - Q_1$	10880	18519	18919
Energie eau (Kj) $= m \cdot c_p \cdot \Delta T$	2077,46	2089,164	2068,682
$\eta = \frac{Q_e}{Q_{re}}$	19,09	11,28	10,93

La figure 17 ci-dessous indique l'évolution de la température de l'eau des trois foyers en fonction des enregistrements. Nous remarquons que le foyer IB atteint les 100°C en 10min30s suivi du foyer Roudé et du foyer trois pierres qui atteignent les 100°C respectivement à la 12^{ème} et 23^{ème} minute. Le pas entre deux prises de température est de 30 secondes.

Conception d'un foyer domestique à pyrolyse pour la balle de riz

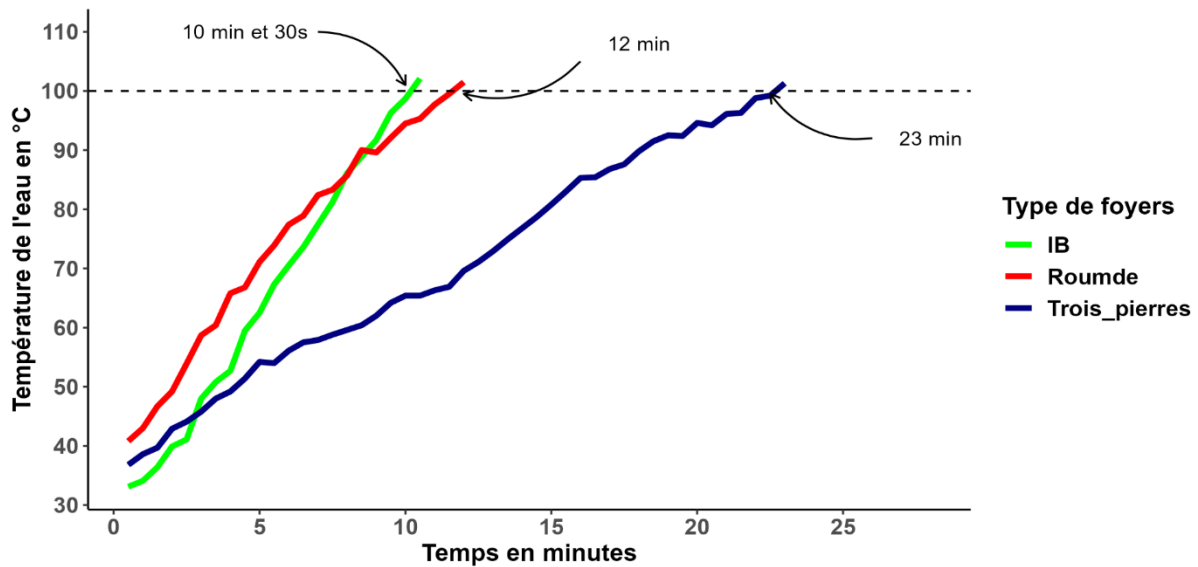


Figure 17 : Evolution de la température de l'eau des trois foyers

d. Résultats des analyses immédiates de la balle de riz

L'analyse immédiate des balles de riz a été faite dans le Laboratoire Energies Renouvelables et Efficacité Energétiques. Les calculs du taux de cendre et du taux de matières volatiles ont été faits suivant la base de matières sèches. Le carbone fixe a été obtenu en faisant juste la différence. Le tableau IV, illustre les résultats des analyses immédiates de la balle de riz.

Tableau IV : Analyse immédiate des balles de riz

Paramètre	Balles de riz
Analyse immédiate	(%)
Humidité	0,17
Cendres	21,63
Matières volatiles	61,39
Carbone fixe	16,98

Au vu de ces résultats, on remarque que nos balles de riz sont constituées en grande partie de matières volatiles de plus ce qui nous donne un fort dégagement de gaz pendant la pyrolyse.

e. Résultat des analyses immédiates du biochar

Le tableau V ci-dessous présente les résultats des analyses immédiates des échantillons de biochar produit à partir des balles de riz à la température de 532,5 °C. Cette analyse a été faite au LABEREE 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.

Tableau V : Analyse immédiate du biochar

Paramètre	Biochar
Analyse immédiate	(%)
Cendres	46,81
Matières volatiles	9,72
Carbone fixe	43,47

2. DISCUSSION ET ANALYSE

Dans cette partie nous faisons une analyse et discussions des différents résultats trouvés et nous faisons en même temps un rapprochement avec ceux de la littérature.

Premièrement nous allons parler du foyer et des tests du foyer. Il faut noter que l'analyse fonctionnelle nous a permis de mettre en place un prototype qui suit une démarche scientifique et dont nous avons la parfaite compréhension de son fonctionnement. Elle a été un facteur d'encouragement dans la créativité car nous avons pu concevoir un foyer à pyrolyse dont son objectif n'est pas de produire du charbon mais plutôt pour d'autres fins comme bouillir de l'eau ou faire de la cuisson.

Les tests d'ébullition d'eau nous ont permis de voir à travers la figure 17 que notre foyer à pyrolyse atteint plus vite les 100°C que les deux autres foyers. Dans le tableau III, nous avons le récapitulatif des essais des trois foyers. Nous remarquons que pour la même quantité d'eau le temps d'ébullition du foyer à pyrolyse est de 10 min 30 s comparativement aux deux autres foyers qui sont respectivement de 12 min et 23 min pour les foyers Roumde et trois pierres. Comme vous le remarquez la quantité de biomasse pour le foyer Ib est plus grande que celle des autres foyers et cela est dû à sa hauteur qui est de 55 cm. La valeur de sa chaleur émise est presque proche de celle du foyer trois pierres. Aussi la valeur de son énergie d'eau est proche de celle du foyer Roumde. Quant aux charbons et cendres du foyer Ib, nous constatons une faible quantité comparativement aux quantités des deux autres foyers.

En termes de rendement nous remarquons que le rendement du foyer à pyrolyse est au-dessus des deux autres foyers respectifs Roumde et trois pierres.

Les résultats de l'analyse immédiate des balles de riz nous donnent un taux d'humidité faible de 0,17 % par rapport à celui de (Natarajan et Ganapathy 2009) dans leurs travaux. Nous disons que nous avons bien séchée notre biomasse dans un séchoir à 80°C pendant 10h de temps avant

Conception d'un foyer domestique à pyrolyse pour la balle de riz

son utilisation au sein du réacteur de pyrolyse pour les différents tests. Ce résultat nous permet de pouvoir bien brûler les gaz de pyrolyse mais aussi dans la production du biochar. Nous constatons au sein de nos balles de riz une teneur en cendres (matières minérales) de 21,63%. Cette valeur est proche de celle obtenue par Cruz (voir tableau 1) lors de ses travaux. Elle peut engendrer des problèmes pour des processus de combustion ou de gazéification. Nous profitons de rappeler à ceux qui font la production du biochar, qu'ils doivent arrêter le processus à temps sinon il y aura formation des cendres. Notre taux de matières volatiles est dans sa plus grande valeur dans les balles de riz. Il est proche de celui de (Natarajan et Ganapathy 2009).avec un écart de 8%. Nous avons donc une grande perte en masse et en volume des balles de riz et un dégagement important des gaz de pyrolyses (Prins et al. 2011).

Le biochar produit est riche en matières minérales selon les résultats des analyses immédiates L'enfouir dans le sol mettra 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.

V. CONCLUSION-PERSPECTIVE

Au terme de ces travaux qui ont porté sur la conception d'un foyer domestique à pyrolyse fabriqué en Afrique de l'ouest, il ressort que le Burkina Faso et bien d'autres pays regorgent d'un potentiel résidu agricole quasiment inexploité qui pourrait être utilisé pour diminuer les dépenses énergétiques et budgétaires des populations. Il faut noter qu'il y a déjà plusieurs groupements de femmes au Burkina Faso qui travaillent sur l'étuvage du riz paddy. Cet étuvage se fait par des foyers améliorés utilisant le bois comme combustible. Parmi ces groupements il y'en a d'autres qui utilisent déjà la balle de riz comme combustible. Dans l'optique d'améliorer les conditions de ces groupements de femmes, nous pouvons mettre notre foyer à pyrolyse à leur disposition. Les tests de TEE réalisées sur les trois foyers nous ont permis d'avoir une idée de leurs performances. En conclusion nous dirons qu'avec les valeurs respectives des rendements des foyers Ib, Roumdé et trois pierres qui sont : 19,09% ; 11,28% ; 10,93%, le foyer Ib est le plus performant suivi du foyer Roumdé et du foyer trois pierres.

RECOMMANDATIONS

- Il est recommandé de bien sécher la balle de riz avant de lancer le processus de pyrolyse.
- Il est recommandé d'augmenter la taille du support du ventilateurs.

Bibliographie

- Ahmed, Boualem Si, Samir Benbouzid, et Fatima Nibouche. 2022. « Design and Implementation of Smart Glasses with ISMS and Risk Management Functionalities for a Technical Operator ». *Ingenierie des Systemes d'Information* 27 (3): 415
- Alhazmi, Hatem, et Adrian Chun Minh Loy. 2021. « A Review on Environmental Assessment of Conversion of Agriculture Waste to Bio-Energy via Different Thermochemical Routes: Current and Future Trends ». *Bioresource Technology Reports* 14 (juin): 100682. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100682>.
- Barry, Fanta, Marie Sawadogo, Igor W.K. Ouédraogo, Maïmouna Bologo/Traoré, et Thomas Dogot. 2022. « Geographical and Economic Assessment of Feedstock Availability for Biomass Gasification in Burkina Faso ». *Energy Conversion and Management: X* 13 (janvier): 100163. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2021.100163>.
- Belonio, Alexis T. 2005. *Rice Husk Gas Stove Handbook*. Central Philippine University. <https://repository.cpu.edu.ph/handle/20.500.12852/370>.
- Bououchma, Meryeme, et Brahim Herrou. 2023. « Integration of QFD method and TRIZ tools in an innovant product development ». In *E3S Web of Conferences*, 469:00032. EDP Sciences. https://www.e3sconferences.org/articles/e3sconf/abs/2023/106/e3sconf_icegc2023_00032/e3sconf_icegc2023_00032.html.
- Briscoe, N. D. A., et N. Wolfgang. 2018. « Design of a Semi-Automatic Artificial Incubator ». *European Journal of Applied Engineering and Scientific Research* 6 (3): 4-14.
- Dhanalakshmi, C., Promi Madhu, Alagar Karthick, Manoj Mathew, et Vigneshkumar Ramalingam. 2020. « A comprehensive MCDM-based approach using TOPSIS and EDAS as an auxiliary tool for pyrolysis material selection and its application ». *Biomass Conversion and Biorefinery*, septembre. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01009-0>.
- Florentino-Madiedo, L., E. Díaz-Faes, R. García, et C. Barriocanal. 2018. « Influence of Binder Type on Greenhouse Gases and PAHs from the Pyrolysis of Biomass Briquettes ». *Fuel Processing Technology* 171 (mars): 330-38. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.11.029>.
- Gauthier, Guillaume, Thierry Melkior, Maguelone Grateau, Sébastien Thiery, et Sylvain Salvador. 2013. « Pyrolysis of Centimetre-Scale Wood Particles: New

Conception d'un foyer domestique à pyrolyse pour la balle de riz

Experimental Developments and Results ». *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 104 (novembre): 521-30. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2013.05.017>.

- Huboyo, Haryono, Susumu Tohno, Puji Lestari, Akira Mizohata, Motonori Okumura, Prianti Utami, et Edelbertus Jara. 2013. « Comparison between Jatropha Curcas Seed Stove and Woodstove: Performance and Effect on Indoor Air Quality ». *Energy for Sustainable Development* 17 (4): 337-46. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2013.03.008>.
- Johnson, Michael, Rufus Edwards, Adrián Ghilardi, Victor Berrueta, Dan Gillen, Claudio Alatorre Frenk, et Omar Masera. 2009. « Quantification of Carbon Savings from Improved Biomass Cookstove Projects ». *Environmental Science & Technology* 43 (7): 2456-62. <https://doi.org/10.1021/es801564u>.
- Komil, Umaraliev, et Ergashev Sirojiddin. 2022. « ENERGY-SAVING “PYROLYSIS OVEN” AND ITS MAIN ADVANTAGES AND DISADVANTAGES ». *Universum: технические науки*, no 5-12 (98): 34-37.
- Lehmann, Johannes, John Gaunt, et Marco Rondon. 2006. « Bio-Char Sequestration in Terrestrial Ecosystems – A Review ». *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 11 (2): 403-27. <https://doi.org/10.1007/s11027-005-9006-5>.
- Lehmann, Johannes. 2007. « A handful of carbon ». *Nature* 447 (7141): 143-44.
- Li, Honglin, Jian Han, Nan Zhang, Xinhua Liu, Jingdong He, et Wei Du. 2019. « Effects of High-Temperature Char Layer and Pyrolysis Gas on NO_x Reduction in a Typical Decoupling Combustion Coal-Fired Stove ». *Journal of Thermal Science* 28 (1): 40-50. <https://doi.org/10.1007/s11630-018-1022-3>.
- Manoj Kumar, Sachin Kumar, et S.K. Tyagi. 2013. « Design, Development and Technological Advancement in the Biomass Cookstoves: A Review ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 26 (octobre): 265-85. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.010>.
- Murugan, P.C., et S. Joseph Sekhar. 2017. « Species – Transport CFD Model for the Gasification of Rice Husk (Oryza Sativa) Using Downdraft Gasifier ». *Computers and Electronics in Agriculture* 139 (juin): 33-40. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.05.004>.
- Natarajan, E., et S. E. Ganapathy. 2009. « Pyrolysis of rice husk in a fixed bed reactor ». *World Academy of Science, Engineering and Technology* 56 (32): 504-8.
- Ochieng, Caroline A., Cathryn Tonne, et Sotiris Vardoulakis. 2013. « A Comparison of

Conception d'un foyer domestique à pyrolyse pour la balle de riz

Fuel Use between a Low Cost, Improved Wood Stove and Traditional Three-Stone Stove in Rural Kenya ». *Biomass and Bioenergy* 58 (novembre): 258-66. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.07.017>.

- Pode, Ramchandra. 2016. « Potential Applications of Rice Husk Ash Waste from Rice Husk Biomass Power Plant ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 53 (janvier): 1468-85. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.051>.
- Prins, Robert, Wayne Teel, John Marier, Geoff Austin, Tim Clark, et Brandon Dick. 2011. « Design, Construction and analysis of a farm-scale biochar production system ». In *Proceedings of the NCIIA catalyzing innovation conference*, Washington DC.
- Rasoulkhani, Mohammadreza, Mohammadali Ebrahimi-Nik, Mohammad Hossein Abbaspour-Fard, et Abbas Rohani. 2018. « Comparative Evaluation of the Performance of an Improved Biomass Cook Stove and the Traditional Stoves of Iran ». *Sustainable Environment Research* 28 (6): 438-43. <https://doi.org/10.1016/j.serj.2018.08.001>.
- Roy, Poritosh, et Goretty Dias. 2017. « Prospects for Pyrolysis Technologies in the Bioenergy Sector: A Review ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 77 (septembre): 59-69. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.136>.
- Rypdal, Kristin, Nathan Rive, Terje K. Berntsen, Zbigniew Klimont, Torben K. Mideksa, Gunnar Myhre, et Ragnhild B. Skeie. 2009. « Costs and global impacts of black carbon abatement strategies ». *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology* 61 (4): 625. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2009.00430.x>.
- Suopajarvi, Hannu, Antti Kemppainen, Juho Haapakangas, et Timo Fabritius. 2017. « Extensive Review of the Opportunities to Use Biomass-Based Fuels in Iron and Steelmaking Processes ». *Journal of Cleaner Production* 148 (avril): 709-34. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.029>.
- Tarpilga, Moussa dit Corneille, Bétaboalé Naon, et François Ouedraogo. 2022. « Characterisation of Biomasses for Their Valorisation in Energy and Biochar Production: Case of Cotton Stalks, Maize Rachis and Rice Husk ». *Engineering* 14 (5): 173-83. <https://doi.org/10.4236/eng.2022.145017>.
- Venkataraman, Chandra, Ambuj D. Sagar, Gazala Habib, Nick Lam, et Kirk R. Smith. 2010. « The Indian national initiative for advanced biomass cookstoves: the benefits of clean combustion ». *Energy for sustainable development* 14 (2): 63-72.
- Wang, Jing, Helen H. Lou, Fengling Yang, et Fangqin Cheng. 2016. « Development and Performance Evaluation of a Clean-Burning Stove ». *Journal of Cleaner Production*

Conception d'un foyer domestique à pyrolyse pour la balle de riz

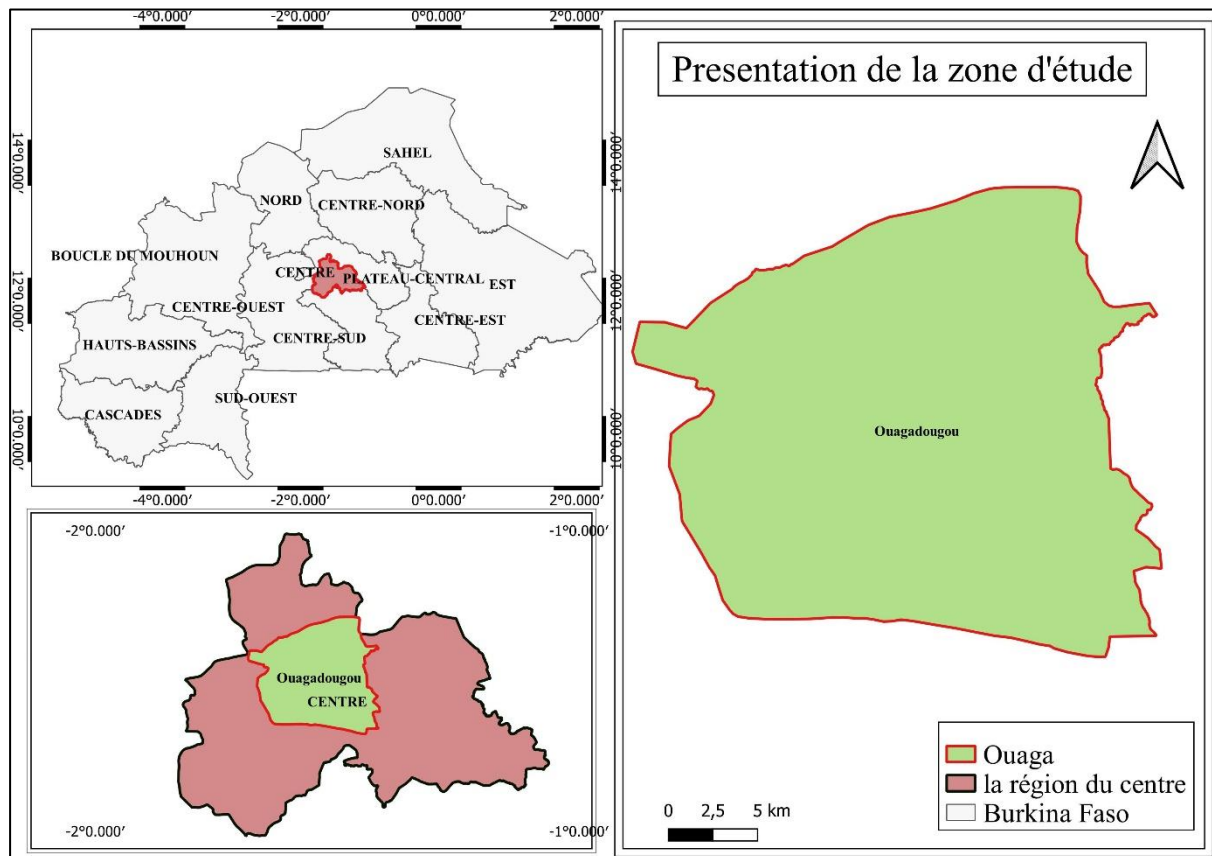
134 (octobre): 447-55. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.068>.

- Whitman, Thea, Charles F. Nicholson, Dorisel Torres, et Johannes Lehmann. 2011. « Climate Change Impact of Biochar Cook Stoves in Western Kenyan Farm Households: System Dynamics Model Analysis ». *Environmental Science & Technology* 45 (8): 3687-94. <https://doi.org/10.1021/es103301k>.
- Widjaya, Elita R., Guangnan Chen, Les Bowtell, et Catherine Hills. 2018. « Gasification of Non-Woody Biomass: A Literature Review ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 89 (juin): 184-93. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.023>.

ANNEXES

Annexe 1: Présentation de la zone d'étude	36
Annexe 2: Réalisation du foyer externe.....	37
Annexe 3 : Réalisation du foyer interne	38
Annexe 4 : Assemblage et soudure des éléments du foyer à pyrolyse	39
Annexe 5 : Equipe de réalisation et le foyer à pyrolyse conçu	40

Annexe 1: Présentation de la zone d'étude



Annexe 2: Réalisation du foyer externe



Annexe 3 : Réalisation du foyer interne



Annexe 4 : Assemblage et soudure des éléments du foyer à pyrolyse



Annexe 5 : Equipe de réalisation et le foyer à pyrolyse conçu

