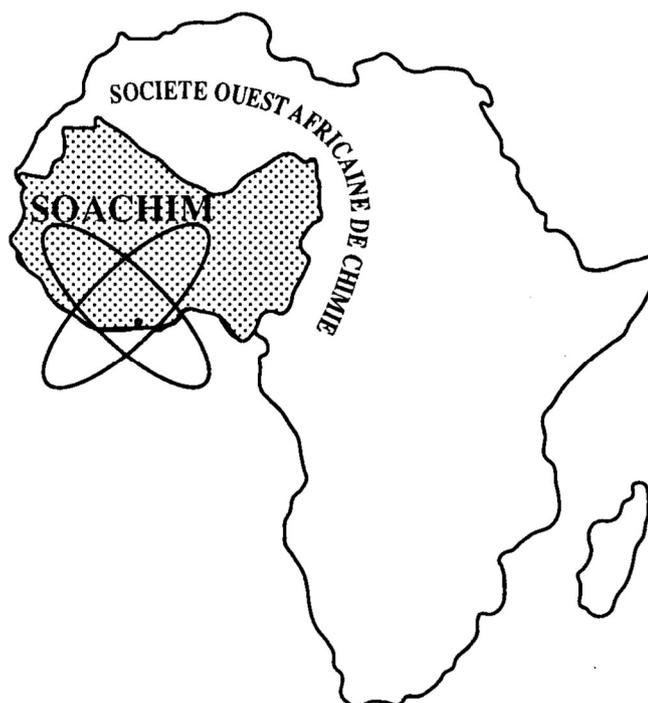


Optimisation des conditions opératoires de formulation d'un charbon vert

**Kalidou Ba, Fatou Ndiaye, Alpha Ousmane Touré,
Mamadou Faye**

Journal de la Société Ouest-Africaine de Chimie
J. Soc. Ouest-Afr. Chim. (2023), 052 : 23 - 31
28^{ème} Année, 2023



ISSN 0796-6687

Code Chemical Abstracts : JSOCF2

Cote INIST (CNRS France) : <27680>

Site Web: <http://www.soachim.org>

<http://www.soachim.info>

Optimisation des conditions opératoires de formulation d'un charbon vert

Kalidou Ba^{1*}, Fatou Ndiaye¹, Alpha Ousmane Touré¹, Mamadou Faye¹

Université Cheikh Anta DIOP de Dakar, Ecole Supérieure Polytechnique, Laboratoire Eau, Energie, Environnement et Procédés Industriels (LE3PI), PO Box 5085 Dakar-Fann, Senegal

(Reçu le 17/08/2022– Accepté après corrections le 22/10/2023)

Résumé : Cette étude porte sur l'optimisation et la modélisation du processus de formulation d'un charbon vert à partir de la méthodologie des plans d'expérience. Le combustible est fait à base de : coques d'arachide, typha, sciures de bois, poussier de charbon de bois et boues d'épuration utilisées comme liant. Ces résidus ont été mélangés suivant différentes proportions suggérées par le plan et ont subi un procédé de densification directe. La fonction de désirabilité utilisée et les analyses physico-chimiques réalisées ont révélé que les meilleurs résultats obtenus sont les briquettes constituées de 50% de boues, 24,29% de coques d'arachide, 5,71% de typha, 10,57% de sciures et 9,43% de poussier. Elles présentent donc un pouvoir calorifique de 5619,33 kcal/kg, une teneur en cendres de 22,98%, un taux d'humidité de 3,13%, une teneur en matières volatiles de 56,75% et un taux de carbone fixe de 20,27%. L'analyse de la composition élémentaire et les valeurs calorifiques des briquettes combustibles produites montrent qu'elles ont de bonnes propriétés de combustion. Cependant pour mieux améliorer la qualité des briquettes conçues, une étude sur la réduction de la teneur en fumée doit être effectuée.

Mots clés : Briquettes, box-behnken, désirabilité, optimisation, plan d'expériences

Optimization of the operating conditions for the formulation of a green coal

Abstract : This study focuses on the optimization and modelling of the green charcoal formulation process using experimental design methodology. The fuel is made from peanut shells, typha, sawdust, charcoal dust and sewage sludge used as a binder. These residues were mixed in the proportions suggested by the plan and underwent a direct densification process. The desirability function used and the physico-chemical analyses carried out revealed that the best results obtained were briquettes made from 50% sludge, 24.29% groundnut shells, 5.71% typha, 10.57% sawdust and 9.43% dust. They therefore have a calorific value of 5619.33 kcal/kg, an ash content of 22.98%, a moisture content of 3.13%, a volatile matter content of 56.75% and a fixed carbon content of 20.27%. Analysis of the elemental composition and calorific values of the fuel briquettes produced shows that they have good combustion properties. However, in order to improve the quality of the briquettes produced, a study on the reduction of smoke content needs to be carried out.

Keywords: Briquettes, box-behnken, desirability, optimization, experimental design

* Corresponding author: kalidouba228@gmail.com

1. Introduction

Les réserves des énergies non renouvelables, principales sources d'énergie dans le monde sont limitées, en plus ils libèrent d'énormes quantités de gaz à effet de serre dans l'atmosphère et leur utilisation pour répondre à la demande d'énergie thermique pèse lourd sur l'économie des pays en émergence comme le Sénégal [1, 2]. Le bois et le charbon de bois représentent 84% de la consommation énergétique des ménages au Sénégal [3, 4]. En effet, l'électricité produite n'est pas suffisante pour assurer le fonctionnement de toutes les activités humaines en général et celles des ménages en particulier [4, 5]. La plupart des ménages utilise du gaz butane, du bois de chauffage, du charbon ou d'autres combustibles de cuisson à base de végétaux comme les tiges de maïs pour subvenir à leurs besoins [6, 7]. Les ressources naturelles sénégalaises sont donc soumises à de fortes pressions liées entre autres à la coupe abusive du bois pour combustibles, aux pratiques agricoles non durables, à la forte croissance démographique et aux feux de brousse [8, 9].

C'est dans cette préoccupation majeure que s'inscrit notre étude dont l'objectif principal est de mettre en place une technologie de valorisation énergétiquement des résidus urbains au profit des populations rurales. Celle-ci devrait pouvoir contribuer à résoudre les problèmes environnementaux tels que la déforestation, la pollution atmosphérique, l'érosion des sols et à conférer aux populations rurale et urbaine une autonomie énergétique [10, 11]. Ainsi, cette étude portera sur l'optimisation des paramètres opératoires de formulation de briquettes combustibles non carbonisées à partir de différents résidus : coques d'arachide, boues d'épuration, typha, sciures de bois et poussier de charbon de bois.

2. Matériel et méthodes

2.1. Les matières premières

Le charbon vert est constitué de boues d'épurations (liant) qui sont des résidus du traitement des effluents liquides et sont en général utilisées comme compost ou sont incinérées. Elles proviennent de la station d'épuration de Dakar (ONAS), de typha qui est une plante aquatique envahissante présentant des impacts au niveau de la biodiversité, de la santé et de la sécurité. Cette plante a un potentiel exploitable d'environ 900 000 tonnes et provient du Technopole de Dakar, de sciures de bois qui sont utilisées comme combustibles, litières ou adsorbants. Leur accumulation entraîne entre autres un effet de serre

et certaines infections. Elles sont achetées au niveau d'une scierie locale, de coques d'arachide utilisées comme combustibles en huilerie ou comme engrais. Ces derniers ont un potentiel de 175 000 t/an indique le programme pour la promotion des énergies renouvelables, de l'électrification rurale et l'approvisionnement durable en combustibles domestiques [12]. Elles sont fournies par l'huilerie SONACOS, de poussier de charbon de bois, employé comme combustible en métallurgie ou dans les industries de calcination. Il est entassé puis acheté à un prix dérisoire aux vendeurs de charbon et de l'eau qui est le mouillant permettant l'agglomération de ces résidus.

2.2. Préparation des matières premières

Les matières premières ont été triées puis séchées dans des aires bien aérées et protégées (séchage naturel). Ce séchage, qui réduit aussi les odeurs, prend du temps. Il faut donc préparer d'avance les matériaux de base qui servent à produire les briquettes. Les déchets combustibles séchés ont été ensuite déchiquetés et broyés grâce à une déchiqueteuse de type EMIE et un mixeur moulin de type SAACHI.

Par ailleurs, un échantillon de chaque résidu a été préparé pour une caractérisation. L'échantillonnage consiste à un broyage puis tamisage afin d'obtenir 10 g de poudre ayant une granulométrie d'environ 200 μ m à analyser. Les caractéristiques physico-chimiques recherchées sont : le pouvoir calorifique supérieur (PCS), la teneur en cendres (ASH), le taux d'humidité (H), la teneur en matières volatiles (MOV) et le taux de carbone fixe (C).

2.3. Détermination du domaine expérimental

Cette étape consiste à fixer les marges de pourcentages des matières premières pour 100g de charbon sec formulé, puis à faire varier les facteurs avec un pas de 10g afin d'obtenir le domaine expérimental. Les facteurs étudiés sont : le ratio masse coques/masse de typha (X_1), le ratio masse sciures/masse de poussier (X_2) et le pourcentage de liant (X_3).

2.4. Procédure expérimentale

La matrice est à trois facteurs et cinq points au centre, soit 17 expériences, avec comme grandeurs d'intérêt le pouvoir calorifique (PCS) et la teneur en cendres (ASH). A partir des différents ratios de la matrice, les

masses de boues, de coques, de typha, de poussier et de sciures ont été calculées pour chaque essai. La quantité d'eau rajoutée varie selon les mélanges pour permettre une bonne agglomération.

Le procédé de formulation a été fait avec des moules pour permettre de ne pas gaspiller de résidus. Le matériel utilisé comprend une balance de type METTLER TOLEDO pour le dosage des matières premières broyées, un malaxeur de type CONTROLAB pour l'homogénéisation du mélange et une étuve de type SALVISLAB pour le séchage des briquettes par convection.

2.5. Optimisation des conditions opératoires

La démarche d'optimisation consiste à définir le modèle mathématique qui va être utilisé pour approcher la relation existante entre les réponses sélectionnées, à savoir le PCS et ASH et les facteurs sélectionnés, à savoir X_1 , X_2 et X_3 , de valider le modèle mathématique en se basant sur les caractéristiques statistiques calculées par le logiciel Design-Expert version 8.0.6. L'interprétation des résultats obtenus est basée sur l'analyse de la variance (ANOVA) qui évalue la significativité d'un ou de plusieurs facteurs en comparant leurs probabilités à la valeur seuil ($\alpha=5\%$), de rechercher les conditions opératoires optimales conduisant à satisfaire deux objectifs : maximiser le PCS et minimiser ASH. La fonction de désirabilité est utilisée pour obtenir un couple optimal de facteurs menant aux meilleures performances, formuler ces solutions optimales, puis comparer les résultats théoriques à ceux expérimentaux et enfin trouver la meilleure solution.

2.6 Caractérisation physico-chimique

2.6.1. Les analyses physico-chimiques

Elles ont été réalisées par le Centre d'Etudes et de Recherches sur les Energies Renouvelables (CERER) utilisant la norme ASTM D3172 et le laboratoire d'analyse de DANGOTE Cement utilisant la norme NF B55-101.

2.6.2. Les tests mécaniques

Elles sont réalisées sur les briquettes optimales extrudées (extrudeuse à vis de type EMIE) afin d'obtenir la friabilité et la résistance des briquettes produites. Ces tests sont effectués en utilisant la norme ASTM D440 et permettent d'avoir une idée sur la vitesse de fracture des briquettes lors de leur acheminement dans les zones ciblées. La friabilité et

la résistance sont calculées en utilisant respectivement les équations (1) et (2) :

$$F = \frac{M_i - M_f}{M_i} \times 100 \quad (1)$$

$$R = \frac{F_{app}}{S} \quad (2)$$

Avec :

M_i : la masse initiale de la briquette avant chute (g) ;

M_f : la masse de la briquette après chute (g).

F_{app} : la force appliquée (N) ;

S : la section (mm^2) ;

R : la résistance à la compression (MPa).

2.6.3. Le test de combustion

Ce test consiste à déterminer le temps d'inflammabilité, d'ébullition et de consommation des briquettes optimales. Les tests effectués sur les briquettes optimales ont été aussi faits sur le charbon de bois vendu au Sénégal. Ceci va permettre de les comparer réellement et de confirmer la qualité des briquettes produites.

2.6.4. Domaine expérimental

Le tableau I montre les pourcentages fixés des matières premières. Le domaine expérimental du plan est représenté dans le tableau II.

Tableau I : Pourcentages des matières premières

Matières premières	Pourcentage minimal	Pourcentage maximal
Liant	50	60
Coques + Typha	24	30
Sciures + Poussier	16	20

Tableau II : Domaine expérimental

Facteurs	Niveaux	
	Niveau bas (-1)	Niveau haut (+1)
X_1	0,50	5,00
X_2	1,00	1,67
X_3	0,50	0,60

3. Résultats et discussion

3.1. Caractérisation des matières premières

Les résultats des analyses physico-chimiques obtenues sont présentés dans le tableau III.

Tableau III : Caractérisation des matières premières

ANALYSES	H (%)	ASH (%)	MOV (%)	C (%)	PCS (kcal/kg)
Coques d'arachide	09,72	11,47	67,88	20,65	4699,43
Typha	11,13	22,48	65,52	12,00	4408,62
Sciures de bois	11,23	06,31	75,76	17,93	4399,57
Poussier de charbon	04,24	07,15	24,89	67,96	6045,90
Boues d'épuration	10,81	43,36	52,71	03,93	2762,55

Le poussier de charbon possède un meilleur pouvoir calorifique que les autres résidus avec une valeur de 6045,90 kcal/kg et une faible teneur en matières volatiles (24,89%). Pour les coques d'arachide, leur pouvoir calorifique est un peu élevé (4699,43 kcal/kg) mais présente une teneur en matières volatiles trop élevées (67,88%), ce qui fait que l'utilisation de ce matériau en quantité importante dans les étapes de formulation peut être à l'origine de la présence de beaucoup de fumées dans les briquettes combustibles. Le typha quant à lui, a un pouvoir calorifique supérieur et une teneur en matières volatiles très proche des coques d'arachide. Les boues d'épuration présentent un faible pouvoir calorifique (2762,55 kcal/kg), ce qui fait qu'il est utilisé comme liant afin de ne pas baisser le pouvoir calorifique des briquettes combustibles.

3.2. Matrice d'expériences

Les conditions opératoires des essais planifiés par le plan et les résultats d'analyses obtenus sont regroupés dans le tableau IV.

3.3. Modèle mathématique

Les modèles quadratiques qui relient les deux réponses aux différents facteurs d'études sont illustrés par les équations 3 (pour le PCS) et 4 (pour le ASH).

$$Y_1(\text{kcal/kg}) = -1528,14866 + 427,15036X_1 + 2456,60689X_2 + 12927,55804X_3 - 6,96517X_1X_2 - 464,44444X_1X_3 - 1432,83582X_2X_3 - 22,07407X_1^2 - 695,03230X_2^2 - 9400,00000X_3^2 \quad (3)$$

$$Y_2(\%) = 64,74593 - 6,76901X_1 - 18,90542X_2 - 86,34784X_3 + 0,98839X_1X_2 + 8,17778X_1X_3 + 38,20896X_2X_3 + 0,18617X_1^2 - 0,82424X_2^2 + 27,00000X_3^2 \quad (4)$$

3.4. Validité du modèle mathématique

Le paramètre utilisé est le coefficient de détermination R^2 . Plus il est proche de 1, plus le

modèle utilisé est adéquat. L'analyse faite a donné les résultats suivants : $R^2_{\text{ajusté}}(\text{PCS}) = 0,7987$ et $R^2_{\text{ajusté}}(\text{ASH}) = 0,8001$. Ces résultats indiquent que les valeurs réelles sont très proches des valeurs prédites.

3.5. Analyse de la variance

Les trois facteurs étudiés possèdent une influence sur le PCS et ASH. Cette influence est d'autant plus significative quand la p-value est inférieure à 0,05. Les termes avec une p-value supérieure à 5% ne sont pas significatifs. L'analyse de la variance du PCS (tableau V) a montré que X_1 et X_1^2 sont les deux termes significatifs. Cela est en effet dû à la proportion importante du ratio C/T influant grandement sur le PCS par rapport au ratio S/P pratiquement constant. Ce pendant celle des cendres (tableau VI) a permis d'identifier que X_3 est le seul terme significatif. Cela est en effet dû à la teneur en cendres élevée de la boue qui impacte énormément sur la teneur en cendres globale de la briquette. Des résultats similaires ont été rapportés par Ing-Jia Chiou, I-Tsung Wu dans l'étude de la fabrication de briquettes à partir de boues industrielles [13].

3.6. Optimisation

Le tableau VII présente les différentes solutions optimales obtenues grâce à la fonction de désirabilité. Après formulation et tests, les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau VIII.

Les valeurs calorifiques obtenues expérimentalement pour le PCS sont comparables à celles prévues par le modèle. Les valeurs théoriques ont donc globalement une précision de 87%. Cependant, les teneurs en cendres obtenues expérimentalement sont inférieures à celles prévues par le modèle mais sont comparables. La précision des valeurs prédites est dans ce cas égale à 99%. La solution optimale est donc la solution n°3 correspondante aux ratios : $X_1 = 4,25$, $X_2 = 1,12$ et $X_3 = 0,5$ avec un pourcentage en eau (sur la matière sèche) égale à 80 %.

Tableau IV : Matrice d'expériences

N° essai	Facteurs			Réponses	
	X ₁	X ₂	X ₃	PCS (kcal/kg)	ASH (%)
1	0,50	1,34	0,50	3702	27,66
2	2,75	1,67	0,60	3678	28,39
3	2,75	1,67	0,50	3851	24,50
4	2,75	1,34	0,55	4007	25,56
5	2,75	1,34	0,55	4007	25,56
6	2,75	1,00	0,50	4085	23,96
7	0,50	1,67	0,55	3756	25,64
8	5,00	1,00	0,55	3889	25,69
9	0,50	1,34	0,60	3811	26,58
10	2,75	1,34	0,55	4007	25,56
11	2,75	1,34	0,55	4007	25,56
12	5,00	1,34	0,50	4037	24,72
13	0,50	1,00	0,55	3740	25,43
14	5,00	1,34	0,60	3937	27,32
15	2,75	1,00	0,60	4008	25,29
16	5,00	1,67	0,55	3884	28,88
17	2,75	1,34	0,55	4007	25,56

Tableau V : Analyse de la variance pour le PCS

Source	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F-value	P-value
Modèle	214100	23788,74	3,09	0,0757
X₁	68080,5	68080,5	8,83	0,0207*
X₂	38226,12	38226,12	4,96	0,0612
X₃	7260,13	7260,13	0,94	0,3641
X₁X₂	110,25	110,25	0,014	0,9082
X₁X₃	10920,25	10920,25	1,42	0,2727
X₂X₃	2304	2304	0,3	0,6015
X₁²	52581,32	52581,32	6,82	0,0348*
X₂²	25616,84	25616,84	3,32	0,111
X₃²	2325,26	2325,26	0,3	0,5999

Tableau VI : Analyse de la variance pour le ASH

Source	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F-value	P-value
Modèle	23,13	2,57	3,11	0,0742
X₁	0,21	0,21	0,26	0,6285
X₂	6,20	6,20	7,50	0,0690
X₃	5,68	5,68	6,88	0,0343*
X₁X₂	2,22	2,22	2,69	0,1451
X₁X₃	3,39	3,39	4,10	0,0825
X₂X₃	1,64	1,64	1,98	0,2018
X₁²	3,74	3,74	4,53	0,0708
X₂²	0,036	0,036	0,044	0,8405
X₃²	0,019	0,019	0,023	0,8831

Tableau VII : Solutions optimales

N° solution	Facteurs optimaux			Résultats attendus		Désirabilité
	X ₁	X ₂	X ₃	PCS (kcal/kg)	ASH (%)	
1	4,24	1,11	0,5	4058,04	24,17	0,944
2	4,25	1,11	0,5	4057,61	24,16	0,944
3	4,25	1,12	0,5	4058,69	24,18	0,944
4	4,21	1,14	0,5	4061,76	24,23	0,944
5	4,36	1,11	0,5	4056,98	24,16	0,944
6	4,12	1,15	0,5	4063,16	24,25	0,943
7	4,28	1,15	0,5	4063,52	24,27	0,943
8	4,29	1,18	0,5	4066,31	24,35	0,943

3.7. Analyses sur les briquettes optimales

3.7.1 Caractéristiques physico-chimiques

Les résultats physico-chimiques obtenus pour les deux variétés de charbon sont donnés dans le tableau IX.

Le pouvoir calorifique du charbon vert obtenu est élevé. Il représente d'ailleurs 77,15 % du pouvoir calorifique du charbon de bois. Le charbon vert a une humidité qui respecte les limites de teneurs (< 15 %) et est même inférieure à celle du charbon de bois. Dans les échantillons de briquettes de Huang et al., l'humidité se situait approximativement entre 3 et 7 % [14]. D'autre part, A. Demirbas [15] a montré l'importance d'avoir un taux d'humidité plus élevé pour faciliter la compression, comme le cas des pellets. La teneur en cendres élevée du charbon vert est due au liant qui constitue la moitié de la matière sèche. Comme l'ont indiqué Supatata et al. [16], un pourcentage de cendres d'environ 4 % pour les résidus agricoles est le plus approprié pour le briquetage de la biomasse pour éviter une augmentation de l'émission de particules pendant le processus de combustion. L'utilisation d'un liant moins cendreuse devrait permettre d'obtenir une

teneur se rapprochant de celle du charbon de bois. D'autre part, d'après Akowuah JO et Kemausuor [17], en termes d'efficacité de la combustion, la teneur en cendres la plus faible est préférable, ce qui permet d'obtenir un bon rendement calorifique à un faible coût. Le taux en matières organiques volatiles plutôt faible du charbon de bois par rapport au charbon vert se justifie par la carbonisation qu'il a subi éliminant une grande partie des matières gazéifiables. Le charbon vert n'ayant pas eu une étape de carbonisation se retrouve donc avec un taux en matières volatiles élevé (figure 1), ceci corrobore avec les études de Ajimotokan et al. [18] qui ont montré que la teneur en matières volatiles de la biomasse était comprise entre 41% et 78%. La quantité de carbone fixe influe sur le pouvoir calorifique de la briquette, elle est égale 20,27% pour la briquette optimale qui est faible comparée au charbon de bois, constitué de carbone à hauteur de 50 % (figure 1). Pour qu'un charbon soit considéré comme de bonne qualité il doit être caractérisé par des valeurs élevées de la teneur en carbone fixe, supérieures à 75 % [19].

Tableau VIII : Résultats de l'optimisation

N° solution	Résultats attendus		Résultats obtenus	
	PCS (kcal/kg)	ASH (%)	PCS (kcal/kg)	ASH (%)
1	4058,04	24,17	4481,70	24,01
2	4057,61	24,16	4361,80	24,38
3	4058,69	24,18	5619,33	22,98
4	4061,76	24,23	4847,38	23,49
5	4056,98	24,16	4662,99	23,46
6	4063,16	24,25	4441,34	23,15
7	4063,52	24,27	4714,10	24,07
8	4066,31	24,35	4599,22	24,21

Tableau IX : Résultats physico-chimiques des deux types de charbon

TYPES ANALYSES	Charbon vert	Charbon de bois
PCS (kcal/kg)	5619,33	7284,08
H (%)	3,13	4,53
ASH (%)	22,98	7,57
MOV (%)	56,75	35,11
C (%)	20,27	57,32

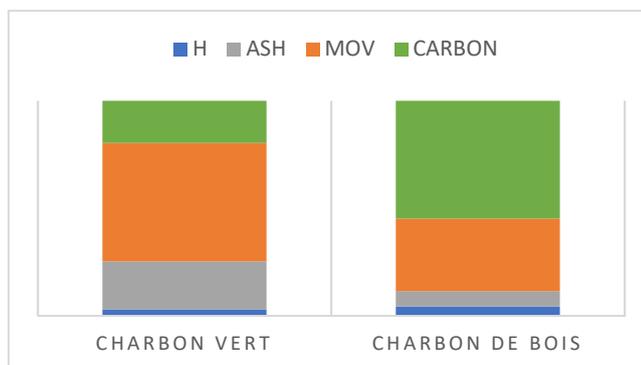


Figure 1 : Compositions en H, ASH, MOV et C des deux types de charbon.

3.7.2 Propriétés mécaniques

Les briquettes sortant de l'extrudeuse puis séchées à l'étuve ont une plus grande résistance que celles moulées. Leur forme est cylindrique avec une hauteur d'environ 5-6cm et un diamètre de 4cm (figures 2 et 3).

Deux tests de chute similaires ont été effectués sur le charbon de bois et le charbon vert afin d'obtenir leurs friabilités moyennes. La chute du côté de la hauteur et du côté de la section. Les valeurs obtenues à partir des tableaux X et XI, montrent que le charbon vert est moins friable que le charbon de bois. Pour le charbon vert, la friabilité est plus importante sur sa section que sur sa hauteur, ceci est dû au fait qu'à la sortie de l'extrudeuse la coupe de la briquette

combustible s'effectue manuellement.

3.7.3 Suivi de la température d'ébullition

Un suivi de la combustion a été fait en utilisant une même masse (300 g) de charbon vert et de charbon de bois pour un même volume d'eau (1/2 L).

Ce test, effectué dans un environnement aéré, a donné les résultats présentés dans le tableau XII.

Le charbon vert s'enflamme plus rapidement que le charbon de bois. Cependant, il brûle avec une flamme fumeuse en raison de sa haute teneur en matières volatiles. Le suivi de la température de l'eau tout au long du test et pour les deux types de charbon a permis d'obtenir les courbes de la figure 4. La température est prise toutes les 5 minutes jusqu'à ébullition de l'eau.



Figure 2 : Briquette vue de face



Figure 3 : Section de la briquette

Tableau X : Friabilité du charbon de bois

Charbon de bois	Masse initiale (g)	Masse finale (g)	F (%)
Test 1	21,07	21,01	0,2848
Test 2	17,76	17,71	0,2815
	Moyenne		0,2831

Tableau XI : Friabilité du charbon vert

Charbon vert	Masse initiale (g)	Masse finale (g)	F (%)
Test 1	27,63	27,62	0,0362
Test 2	27,52	27,48	0,1453
	Moyenne		0,0908

Tableau XII : Résultats du test de combustion

Paramètres	Charbon vert	Charbon de bois
Temps d'inflammabilité	8 mn 15 s	10 mn 37 s
Fumées	Beaucoup (blanches)	Absentes
Odeur	Présente	Absente
Suie	Présente	Absente
Cendres	Très chaudes	Chaudes
Temps de consommation	72 mn	130 mn

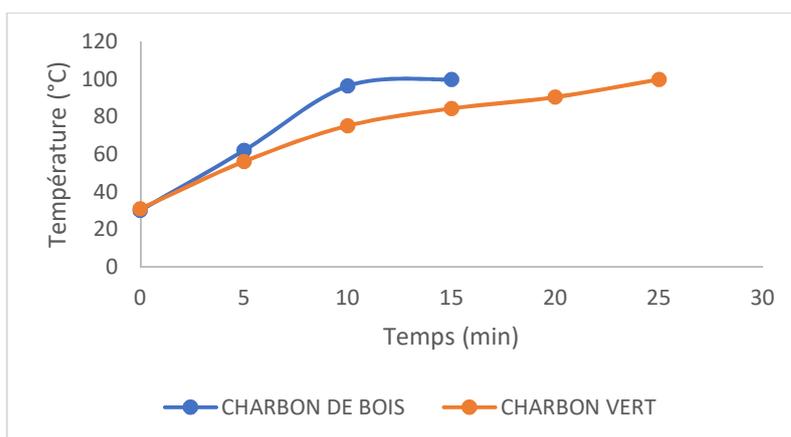


Figure 4 : Courbes d'évolution de la température de l'eau en fonction du temps

Le charbon vert a mis 25min pour atteindre la température d'ébullition de l'eau alors qu'il a fallu 15min au charbon de bois pour atteindre la température d'ébullition de l'eau. La chaleur dégagée par les briquettes est moins intense mais plus régulière. La vitesse de combustion et le pouvoir calorifique sont deux facteurs combinés qui contrôlent le temps d'ébullition de l'eau. C'est pourquoi elles sont favorisées pour des recettes qui demandent une cuisson longue et constante ou pour des fours. Le temps de consommation du charbon vert est inférieur à celui du charbon de bois. Cela n'est pas préférable car il dégage moins de chaleur. Selon Carnaje ^[20], les facteurs qui pourraient être responsables du taux de combustion des briquettes sont la teneur en matière volatile et la géométrie des briquettes.

4. Conclusion

Cette étude consistait à faire l'optimisation des conditions opératoires de formulation d'un charbon vert et les résultats obtenus ont montré que la briquette combustible constituée de 50% de boues, 24,29% de coques d'arachide, 5,71% de typha, 10,57% de sciures et 9,43% de poussier présente les meilleures caractéristiques, le pouvoir calorifique du charbon vert obtenu est supérieur à ceux des produits densifiés retrouvés dans la littérature, les briquettes ne sont ni friables ni salissantes. Elles s'enflamment vite et de façon régulière. Cependant le briquetage simple présente des inconvénients tels que la teneur en matières volatiles élevée du charbon et émanation de fumées blanches durant la combustion.

Références bibliographiques

[1] Nagarajan J., and Prakash L., "Preparation and characterization of biomass briquettes using sugarcane bagasse, corncob and rice husk," *Mater. Today Proc.*, vol.

47, no. xxxx, pp. 4194–4198, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.04.457.

[2] Deshannavar U. B., Hegde P.G., Dhalayat Z., Patil V., and Gavas S., "Production and characterization of agro-based briquettes and estimation of calorific value by regression analysis: An energy application," *Mater. Sci. Energy Technol.*, vol. 1, no. 2, pp. 175–181, 2018, doi: 10.1016/j.mset.2018.07.003.

[3] Rousset P., A. Caldeira-Pires A., Sablowski, and Rodrigues T., "LCA of eucalyptus wood charcoal briquettes," *J. Clean. Prod.*, vol. 19, no. 14, pp. 1647–1653, 2011, doi: 10.1016/j.jclepro.2011.05.015.

[4] Moreira B. R., *et al.*, "Production of Pleurotus ostreatus var. Florida on briquettes and recycling its spent substrate as briquettes for fuel grade biosolids," *J. Clean. Prod.*, vol. 274, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123919.

[5] Raju C. H. A. I., Prem K., Sunil K., Srikanth Bhimareddy K., and Ramya C., "Studies on densification and conversion of wastes as fuel briquettes for power generation," *Mater. Today Proc.*, vol. 44, pp. 1090–1107, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.11.184.

[6] Navalta C. J. L. G., Banaag K. G. C., Raboy V. A. O., Cabatingan A. W. Go, L. K., and Ju Y. H., "Solid fuel from Co-briquetting of sugarcane bagasse and rice bran," *Renew. Energy*, vol. 147, pp. 1941–1958, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.09.129.

[7] Kpalo S. Y., Zainuddin M. F., Manaf L. A., and Roslan A. M., "Evaluation of hybrid briquettes from corncob and oil palm trunk bark in a domestic cooking application for rural communities in Nigeria," *J. Clean. Prod.*, vol. 284, no. xxxx, p. 124745, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124745.

[8] Wang D., Liu L., Yuan Y., Yang H., Zhou Y., and Duan R., "Design and key heating power parameters of a newly-developed household biomass briquette heating boiler," *Renew. Energy*, vol. 147, pp. 1371–1379, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.09.081.

[9] Afsal A., David R., Baiju V., Muhammed Suhail N., Parvathy U., and Rakhi R. B., "Experimental investigations on combustion characteristics of fuel briquettes made from vegetable market waste and saw dust," *Mater. Today Proc.*, vol. 33, no. xxxx, pp. 3826–

3831, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.06.222.

[10] Osei I., Kemausuor F., Commeh M. K., Akowuah J. O., and Owusu-Takyi L., "Design, Fabrication and Evaluation of Non-Continuous Inverted Downdraft Gasifier Stove Utilizing Rice husk as feedstock," *Sci. African*, vol. 8, p. e00414, 2020, doi: 10.1016/j.sciaf.2020.e00414.

[11] Setter C., Sanchez Costa K. L., Pires de Oliveira T. J., and Farinassi Mendes R., "The effects of kraft lignin on the physicochemical quality of briquettes produced with sugarcane bagasse and on the characteristics of the bio-oil obtained via slow pyrolysis," *Fuel Process. Technol.*, vol. 210, no. April, p. 106561, 2020, doi: 10.1016/j.fuproc.2020.106561.

[12] Holt S., "Stratégie de développement des usages productifs en milieu rural," pp. 1–117, 2010.

[13] Chiou I. J., and Wu I. T., "Manufacturing Biofuel Briquettes from Industrial Sludge," *Int. J. Sustain. Dev. Res.*, vol. 2, no. 4, pp. 18–25, 2016, doi: 10.11648/j.ijdsr.20160205.11.

[14] Huang H.L., Lee W.M.G., Wu F.S., Emissions of air pollutants from indoor charcoal barbecue, *J. Hazard Mater.* 302 (2016) 198–207.

[15] Demirbas A., Sustainable charcoal production and charcoal briquetting, energy sources, Part A : recovery, utilization and environmental effects, *Energy Sources* 31 (2009) 1694–1699.

[16] Supatata N, Buates J, Hariyanont P. Characterization of fuel briquettes made from sewage sludge mixed with water hyacinth and sewage sludge mixed with sedge. *Int J Environ Sci Dev* 2013 ;4(2) :179e81.

[17] Akowuah JO, Kemausuor F, Mitchual SJ. Physico-chemical characteristics and market potential of sawdust charcoal briquette. *Int J Energ Environ Eng* 2012 ;3(1) :1e6.

[18] Ajimotokan H. A., Ehindero A. O., Ajao K. S., Adeleke A. A., Ikubanni P. P., Shuaib-Babata Y. L., Combustion characteristics of fuel briquettes made from charcoal particles and sawdust agglomerates, *Scientific African* 6 (2019) e00202.

[19] FAO, Industrial Charcoal Making, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 1985.

[20] Carnaje N.P., Talagon R.B., Peralta J.P., Shah K., Paz-Ferreiro J., Development and characterisation of charcoal briquettes from water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) -molasses blend, *PLoS One* 13 (11) (2018) e0207135.