

UNIVERSITE ASSANE SECK DE ZIGUINCHOR



UFR SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Département de Physique

Mention : Physique et Applications

Mémoire de MASTER

Spécialité : Physique des Matériaux

Sujet :

MESURES EN LABORATOIRE DES ÉMISSIONS ET DES PERFORMANCES DES FOYERS DE CUISSON UTILISANT DES BRIQUETTES DE CHARBON DE BIOMASSE.

Présenté et soutenu publiquement par

Tessemou BIAYE

Le 26/07/2022 devant le jury composé de :

Nom Prénom	Grade	Qualité	Établissement
KOBOR Diouma	Professeur	Président de jury	UASZ
THIAO Sérigne	Assistant	Rapporteur	UASZ
HIMBANE Philippe Bernard	Docteur	Examineur	CIRAD
DRAME Papa Elimane	Technicien Supérieur	Examineur	SCPL, SA
BA Mamadou Seydou	Docteur	Invité	UASZ
NDIAYE Lat Grand	Professeur	Directeur de recherches	UASZ

Session 2020/2021

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Ma maman Fatou DIATTA ;

Mon père Sidou BIAYE ;

Mon feu grand père Ibrahima Solo DIATTA, que ton âme repose en paix ;

Ma grande mère Khady SADIO ;

Mes oncles, mes tantes, mes grands-parents, mes frères, mes sœurs et mes amis.

REMERCIEMENTS

Je tiens en premier lieu à remercier ALLAH le TOUT PUISSANT qui nous a permis de réaliser ce modeste travail.

J'exprime ma gratitude à l'égard de mon directeur de mémoire Professeur Lat Grand NDIAYE pour ses conseils, ses encouragements, ses orientations, son appui scientifique et son engagement ferme.

Je tiens à remercier à Dr Philippe Bernard HIMBANE pour son soutien professionnel, ses orientations et tous ses encouragements.

Je tiens aussi à remercier les membres du Jury que sont le Professeur Diouma KOBOR, Dr Sérigne THIAO, Dr Mamadou Seydou BA, Monsieur Papa Elimane DRAME d'avoir bien voulu accepter de juger ce travail et surtout pour leur conseils, accompagnement et collaboration.

Mes remerciements vont également à l'endroit de Georges Ambouor DIEDHIOU pour son soutien et ses encouragements.

Je remercie l'ensemble des doctorants, mes camarades de promotion, tous mes amis et toutes les personnes dont j'ai fait la connaissance et appréciées.

Je remercie ma famille qui m'a toujours apporté un soutien infaillible et porté une considération envers ma personne.

J'adresse également mes remerciements à l'ensemble des enseignants du département de Physique et de Chimie de l'UASZ pour avoir de loin ou de près participé à ma formation universitaire durant ces cinq années.

Table des matières

Table des matières	iii
Résumé.....	1
INTRODUCTION GENERALE	3
CHAPITRE 1 : Généralités sur les briquettes de charbon de biomasse, les foyers domestiques et leurs caractérisations.....	5
Introduction.....	6
1.1. Généralités.....	6
1.2. Les briquettes de charbon au Sénégal	8
1.3. Les foyers domestiques au Sénégal et leurs caractéristiques.....	9
1.3.1. Les foyers à charbon dits traditionnels	9
❖ Le foyer traditionnel « malgache ».....	9
1.3.2. Les foyers dits améliorés	10
➤ Le foyer "Jambar"	10
➤ Le foyer "Sakkanal".....	11
➤ Le foyer amélioré "Eclair-taaru"	11
1.4. Émissions de polluants gazeux, particulaires et performances des foyers à charbon.....	12
1.4.1. Émissions de gaz et particules.....	12
❖ Dioxyde de carbone (CO ₂).....	12
❖ Particules fines PM _{2,5}	12
❖ Monoxyde de carbone (CO)	13
❖ Oxydes d'azote (NO _x).....	13
❖ Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	14
❖ Les composés organiques volatils (COV).....	14
1.4.2. Performance des foyers.....	14
❖ Test d'ébullition d'eau (TEE).....	14
❖ Test à cuisine contrôlée (TCC)	16
❖ Test de terrain ou test de performance de cuiseur (TPC)	17
1.5. Calcul des facteurs d'émission et des paramètres de performances des foyers.....	17
1.5.1. Les paramètres de performances des foyers.....	17
❖ La puissance brute moyenne (P _b) est définie comme l'énergie thermique libérée par la combustion du combustible pendant un temps donné. Elle est définie comme suit :	17

❖ La puissance utile moyenne (P_u) est définie comme l'énergie thermique transférée à la masse d'eau contenue dans la marmite pendant un temps donné. Elle est calculée comme suit :	18
❖ Le rendement énergétique (ηE) exprime la capacité du foyer à restituer l'énergie contenue dans la masse de combustible consommé. Il est calculé par la formule suivante :	18
1.5.2. Les facteurs d'émission des cuiseurs.....	18
❖ Concentration en masse de CO et facteurs d'émission CO.....	18
❖ Concentration en masse de CO ₂	19
❖ Concentration en masse de PM _{2,5} et facteurs d'émission PM _{2,5}	19
Conclusion	20
CHAPITRE 2 : Matériels et méthodes.....	21
Introduction.....	22
2.1. Matières premières	22
2.2. Carbonisation de la biomasse	22
2.3. Suivi de la température à l'intérieur du fût de carbonisation.....	24
2.4. Production des briquettes de charbon	24
2.4.1 Broyage et préparation du liant.....	25
2.4.2 Fabrication des briquettes de charbon	25
2.5. Caractérisation physico-chimique des différents échantillons.....	26
2.5.1. Analyse immédiate	26
❖ Détermination du taux d'humidité.....	26
❖ Détermination de la teneur en cendres	27
❖ Détermination de la teneur en matières volatiles	28
❖ Détermination de la teneur en carbone fixe.....	29
2.5.2. Analyse élémentaire à partir de l'analyse immédiate.....	29
2.5.3. Détermination du pouvoir calorifique à l'aide de la formule de Vondracek	29
2.6. Performances énergétiques et émissions de gaz des foyers.....	30
2.6.1 Choix des foyers.....	30
2.6.2. Tests de performances énergétiques.....	30
❖ Le rendement thermique	31
❖ La puissance de feu ou brute	32
❖ La puissance de cuisson ou utile	32
❖ La consommation spécifique de combustible.....	32
❖ Le temps d'ébullition spécifique	32
2.6.3. Choix des briquettes pour les tests d'émissions de gaz	33
2.6.4. Mesure des émissions de gaz et calcul des facteurs d'émissions	33
Conclusion	35

CHAPITRE 3 : Résultats et discussions.....	36
Introduction.....	37
3.1 Variation de la température de carbonisation au sein du fût de carbonisation.....	37
❖ Cas de la carbonisation des coques de cajou	37
❖ Cas de la carbonisation des rafles de maïs.....	38
❖ Cas de la carbonisation des coques d’arachide.....	39
3.2 Caractérisation des échantillons étudiés.....	40
3.3 Performances énergétiques	41
3.4 Choix des briquettes	42
3.5. Émissions de gaz des briquettes de charbons choisis.....	43
3.5.1. Facteurs d’émissions de CO.....	43
3.5.2. Variation instantanée des émissions de CO	44
❖ Cas de la brique Br_CA_9%.....	45
❖ Cas de la brique Br_RM_9%.....	45
❖ Cas de la brique Br_CC_10%.....	46
3.5.3. Facteurs d’émissions de NOx	48
3.5.4. Variation instantanée des émissions de NOx.....	49
Conclusion	50
CONCLUSION GENERALE ET PRESPECTIVES.....	51
ANNEXES	55

Liste des figures

Figure 1.1 : Photos illustrant les différentes formes de combustibles [2]	6
Figure 1.2 : foyer traditionnel malgache	10
Figure 1.3 : foyer "Jambar"	11
Figure 1.4 : Exemple de foyer "Sakkanal" monomarmite.....	11
Figure 1.5 : foyer " Eclair-taaru" [7]	12
Figure 1.6 : Diagramme de phases du TEE [2]	15
Figure 2.1 : Photos illustrant les biomasses brutes : coques d’arachide (à gauche), coques de cajou (au milieu) et rafles de maïs (à droite).....	22
Figure 2.2 : Photos de charbons de coques d’arachide (à gauche), de coques de cajou (au milieu) et de rafles de maïs (à droite).....	23
Figure 2.3 : Les trois points des températures de carbonisation du fût	24
Figure 2.4 : Broyage des chars	25
Figure 2.5 : Présentation du liant	25
Figure 2.6 : Rotor pesse motorisé	26
Figure 2.7 : Briquettes de charbon	26
Figure 2.8 : Balance infrarouge.....	27
Figure 2.9 : Balance infrarouge.....	28
Figure 2.10 : Images illustrant les tests de performances énergétiques	31
Figure 2.11 : Photos illustrant les tests d’émissions des briquettes de charbon	34

Figure 3.1 : Thermocouples de mesure de températures le long du fût de carbonisation	37
Figure 3.2 : Variations de la température de carbonisation des coques de cajou en fonction du temps	38
Figure 3.3 : Variations de la température de carbonisation des rafles de maïs en fonction du temps	39
Figure 3.4 : Variations de la température de carbonisation des coques d'arachide en fonction du temps	40
Figure 3.5 : Variation des émissions de CO durant la phase de combustion des briquettes de charbon de coques d'arachide	45
Figure 3.6 : Variation des émissions de CO durant la phase de combustion des briquettes de charbon de rafles de maïs	46
Figure 3.7 : Variation des émissions de CO durant la phase de combustion des briquettes de charbon de coques de cajou	47
Figure 3.8 : Émissions totales de CO durant la phase de combustion des différentes briquettes de charbon étudié	48
Figure 3.9 : Variation des émissions de NOx durant la phase de combustion des briquettes choisies	49

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Caractéristiques physico-chimiques de quelques briquettes de charbon [2]8	
Tableau 2.1 : Codification des échantillons de charbon de biomasse	23
Tableau 2.2 : Composition des briquettes de charbon	24
Tableau 3.1 : Résultats des analyses élémentaire et immédiate des biomasses	40
Tableau 3.2 : Performances énergétiques des briquettes de charbon avec les cuiseurs "Jambar" et Malgache	41
Tableau 3.3 : Classification des briquettes de charbon : cas du cuiseur "Jambar"	43
Tableau 3.4 : Émissions de CO des briquettes choisies	44
Tableau 3.5 : Facteurs d'émissions de CO pour le scénario à faible ventilation	44
Tableau 3.6 : Résultats de détermination des facteurs d'émissions NOx.	48

Abréviation

ANSD	Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie
C (%)	Teneur en carbone

Ch_CA	Charbon de coques d'arachide
Ch_CC	Charbon de coques de cajou
Ch_RM	Charbon de rafle de maïs
CERER	Centre d'Études et de Recherches sur les Énergies Renouvelables
CF (%)	Teneur en carbone fixe
CIRAD	Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
CNSL	Cashew Nut Shell Liquid
CO	Monoxide de Carbone
CO2	Dioxyde de carbone
COV	Composé Organique Volatile
E (%)	Teneur en humidité
HAP	Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques
MV (%)	Teneur en matières volatiles
N (%)	Teneur en nitrogène ou en azote
NOx	Oxyde d'azote
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
O (%)	Teneur en oxygène
PCI	Pouvoir Calorifique Inférieur
PCS	Pouvoir Calorifique Supérieur
PM	Particules de Matière
ppm	Partie par million
SOx	Oxydes de soufre
TEE	Test d'Ébullition de l'Eau
TCC	Test de Cuisine Contrôlée
TPC	Test de Performances de Cuisine

Résumé

L'étude de la combustion des briquettes de charbon de biomasse dans les foyers domestiques nécessite une attention particulière concernant les rendements énergétiques et les émissions de polluants. Les variations des rendements énergétiques pour les foyers font l'objet d'une étude de performance sur le foyer traditionnel (malgache) et amélioré (« jambar ») ; les émissions de monoxyde de carbone et d'oxydes d'azote font également l'objet d'une attention totale concernant les risques sanitaires causés par leur inhalation. Dans ce travail de Master, nous avons effectué des mesures de températures de pyrolyse dont les températures maximales varient entre 400 et 800 °C, des tests de performances et d'émission de gaz afin d'identifier lequel des foyers étudiés est le plus performant et aussi déterminer les briquettes les moins émissives. Six lots de briquettes de charbon ont été produits en gardant constant leur teneur en liant (deux à base de coques d'arachide, deux à base de coques de cajou et les deux restants à base de rafles de maïs), respectivement avec deux taux 9 % et 10 %. Les études de performances montrent que la briquette de charbon à base de rafles de maïs à 9 % de liant (Br_RM_9 %) présente la meilleure performance énergétique, suivie de la briquette à base de coques d'arachide à 9 % de liant (Br_CA_9 %) et vient en dernière position la briquette à base de coques de cajou à 10 % de liant (Br_CC_10 %). Le foyer « jambar » possède le meilleur rendement énergétique en moyenne qui était de 15,68 % et de 12,41 % pour le foyer malgache. Du point de vue émissions gazeuses, les concentrations en monoxyde de carbone (CO) étaient très élevées pour les briquettes de rafles de maïs, dont les concentrations moyennes étaient de 0,40 g/min en CO et de 9,79 mg/min en NOx. Pour les coques de cajou elles étaient de 0,30 g/min en CO et 5,32 mg/min en NOx. Les concentrations moyennes les plus basses étaient obtenues avec les coques d'arachide qui donnaient respectivement 0,25 g/min en CO et 3,98 mg/min en NOx.

Mots clés : Briquette de charbon de biomasse, Émissions, Foyer de cuisson et Performances.

Abstract

The study of the combustion of biomass coal briquettes in domestic households requires special attention to energy yields and pollutant emissions. Variations in energy efficiency for households are the subject of a performance study on the traditional fireplace (Malagasy) and improved ("jambar"); emissions of carbon monoxide and nitrogen oxides are also given full attention to the health risks caused by their inhalation. In this Master's work, we carried out measurements of pyrolysis temperatures whose maximum temperatures vary between 400 and 800 ° C, performance and gas emission tests to identify which of the fireplaces studied is the most efficient and also determine the least emissive briquettes. Six batches of charcoal briquettes were produced with a constant binding content (two based on peanut shells, two based on cashew shells and the remaining two on maize stalks), with two rates of 9% and 10% respectively. Performance studies show that the charcoal briquette made from corn cobs with 9% binder (Br_RM_9%) has the best energy performance, followed by the brick made from peanut shells with 9% binder (Br_CA_9%) and comes last the briquette based on cashew shells with 10% binder (Br_CC_10%). The "jambar" household has the best energy efficiency on average which was 15.68% and 12.41% for the Malagasy household. From a gaseous emissions perspective, carbon monoxide (CO) concentrations were very high for corn cob briquettes, with average concentrations of 0.40 g/min CO and 9.79 mg/min NOx. For cashew shells they were 0.30 g/min CO and 5.32 mg/min NOx. The lowest average concentrations were obtained with peanut shells which gave 0.25 g/min CO and 3.98 mg/min NOx respectively.

Keywords: Biomass charcoal briquette, Cooking fireplace, Emissions and Performance.

INTRODUCTION GENERALE

Chaque jour, les personnes inhalent un volume important d'air qui peut contenir plusieurs polluants pouvant impacter négativement sur la santé. Cette pollution de l'air est un mélange mixte de polluants chimiques (monoxyde de carbone, dioxyde de soufre, oxydes d'azote, composés organiques volatiles, ...), physiques (particules fines, poussières, ...) ou biologiques (pollens, moisissures, ...) provenant en majorité des activités humaines. Les sources principales de ces émissions sont souvent le pétrole, le gaz ou le charbon minéral. Ces énergies fossiles ; non seulement elles ne peuvent pas se renouveler grandement à l'échelle du temps humain, mais elles dégagent des gaz nocifs et nuisibles à la santé. De ce fait, beaucoup de personnes associent la pollution atmosphérique à la seule utilisation des combustibles fossiles dans les pays industrialisés dont le niveau élevé de développement économique se traduit par une forte consommation d'énergie par habitant. Or les énergies dites renouvelables sont également responsables d'une partie de la pollution de l'air atmosphérique en cas de mauvaise valorisation ; le cas de la combustion de la biomasse.

Selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), l'utilisation du bois ou du charbon de bois dans les ménages est responsable de la mort de 6 300 personnes par an, notamment les femmes et les enfants (OMS, 2013). Face à cette situation, il est donc nécessaire de faire une transition des énergies fossiles vers les énergies renouvelables (solaire, hydraulique, éolienne, biomasse). Parmi ces sources d'énergies renouvelables, on a la biomasse, qui est la plus ancienne source d'énergie exploitée par l'homme et qu'on trouve partout au Sénégal en quantité suffisante par endroit. La biomasse, reste encore à ce jour une alternative pertinente aux énergies fossiles. C'est en effet une source d'énergie renouvelable avec un impact limité sur l'environnement puisqu'elle absorbe au cours de son cycle de vie une quantité de CO₂ égale à celle rejetée lors de sa combustion, offrant ainsi un cycle neutre en carbone sur la durée. La biomasse se retrouve sous plusieurs formes (les résidus agricoles, les résidus agro-industrielles...) ; elles sont souvent jetées dans la nature sachant qu'elles peuvent être valorisés en plusieurs formes d'énergie selon plusieurs procédés. A l'instar des autres sources d'énergies, propres, inépuisables, la biomasse ne connaît pas aussi de limite finie ; elle peut se renouveler si on lui laisse le temps et l'espace nécessaire. Dans le domaine de l'énergie, la biomasse peut se définir comme une source d'énergie renouvelable provenant de la matière organique d'origine végétale ou animale de la plus petite à la plus grande espèce. La valorisation énergétique de la biomasse en briquettes de charbon peut produire plusieurs formes d'énergies utiles telles que les gaz de synthèse, les biocarburants, l'électricité... Les briquettes de biomasse peuvent se substituer aux charbons de bois et les bois de chauffage car ces derniers demeurent les principales sources d'énergie des pays Subsahariens plus particulièrement du Sénégal.

En effet les briquettes de biomasse confèrent de meilleures performances énergétiques et dégagent moins de polluants tout en favorisant une cuisson rapide des aliments dans un environnement pauvre en fumées toxiques contrairement au charbon de bois et au bois de chauffe.

Néanmoins l'étude des performances des briquettes de charbon dans les foyers domestiques est responsable de certaines émissions polluantes (CO, CO₂, NO_x...). C'est dans cette perspective que porte la problématique de notre étude. Le présent mémoire porte sur la mesure des émissions polluantes et la performance des foyers domestiques utilisant des briquettes de charbon de biomasse. L'intérêt de ce travail est tout d'abord d'identifier parmi ces différentes briquettes de biomasse à concentrations de liant différentes (9 % et 10 %) utilisées dans les deux types de foyers, celles qui ont les plus grandes performances énergétiques, le plus faible temps d'ébullition spécifique et la plus faible consommation spécifique en charbon et d'effectuer une comparaison des performances énergétiques des deux cuiseurs et enfin d'étudier les facteurs d'émission des différentes briquettes utilisées.

Le premier chapitre présente une revue succincte sur les généralités des briquettes de charbon de biomasse, les foyers domestiques et leurs caractérisations. Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des matières premières étudiées et des différents outils et méthodes utilisés lors de la réalisation de cette étude. Le dernier chapitre concerne l'étude expérimentale ; cette partie consiste, dans un premier temps, à la présentation des résultats des tests de carbonisation des biomasses ; dans un second temps, celle des résultats des tests de performances des foyers et des émissions de gaz. Une conclusion générale fera l'objet d'une synthèse des trois chapitres du mémoire avant de dégager d'éventuelles perspectives pour de prochaines études.

CHAPITRE 1 : Généralités sur les briquettes de charbon de biomasse, les foyers domestiques et leurs caractérisations

Introduction

Dans ce premier chapitre il s'agit tout d'abord de faire la revue des briquettes de charbon de biomasse par leurs tailles moyennes, formes et leurs caractérisations physico-chimiques. Nous présenterons également quelques foyers (ou cuiseurs) domestiques présents au Sénégal en énumérant les principaux polluants gazeux des briquettes et finirons par présenter les paramètres de calcul sur la détermination des facteurs d'émission et des performances (rendement énergétique, puissance de consommation, ...) des briquettes dans les foyers.

1.1. Généralités

Les briquettes sont des blocs de matériaux de biomasse densifiés. Elles peuvent se présenter sous l'état carbonisé ou non carbonisé. La briquette de charbon est une forme de combustible solide, produite à partir de matière végétale, qui peut être utilisée en substitution du charbon ou du bois de chauffe utilisé pour la cuisson domestique voire la production de chaleur dans les industries.

Dans le cas des briquettes de charbon carbonisées, la présence d'un liant est nécessaire pour la densification alors que pour les briquettes de charbon non carbonisées (granulés, pelletes), la biomasse peut être directement densifiée. La densification directe de la biomasse nécessite des pressions importantes par rapport à la densification de char (produit de la carbonisation) en présence de liant. Plusieurs types de liants sont utilisés dans la fabrication des briquettes de charbon. Parmi ces liants, on peut citer : l'amidon, l'argile, la mélasse, les feuilles de baobab [1] etc. Ces liants peuvent être de nature organique ou inorganique. Pour des questions sanitaires et d'efficacité énergétique, il est souvent conseillé d'utiliser des liants de type organique. Ainsi l'amidon demeure le liant le plus utilisé au niveau industriel.

Dans la littérature, on rencontre plusieurs formes de briquettes de charbon. La figure 1.1 illustre des coupes photographiques de quelques briquettes de charbon rencontrées dans la littérature.



Figure 1.1 : Photos illustrant les différentes formes de combustibles [2]

Au Sénégal, la culture de l'arachide occupe une part importante de l'agriculture industrielle ; elle génère d'importants résidus constitués principalement de coques d'arachide. Selon les statistiques de l'ANSD, la production moyenne de l'arachide au Sénégal serait estimée à environ 717 000 tonnes en 2020. A titre d'exemple, en tenant compte du ratio coques d'arachide sur production, égale à 0,47 (données FAO), on peut estimer la quantité de coques d'arachide générée qui serait estimée égale à 336 990 tonnes.

Pour ce qui concerne la noix de cajou, sa production est très présente en basse et moyenne Casamance plus particulièrement dans les régions de Kolda, Ziguinchor et Sédhiou. Cependant, des statistiques fiables concernant la production réelle font défaut puisque la majorité de la production est exportée vers l'Inde et la Chine. Selon les statistiques de l'organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), la production moyenne de la noix de cajou non décortiquée, au Sénégal serait estimée à 8 374,4 tonnes/an durant les campagnes commerciales de 2014 à 2019. La coque de noix de cajou représentant 73 % en masse de la noix de cajou, on estime ainsi la quantité de coques de noix de cajou produites durant la période de 2014 à 2019, à 6113,3 tonnes/an.

En ce qui concerne le mil, les résidus occasionnés sont principalement constitués de tiges de mil. Sur la période de 2014 à 2019, selon l'ANSD, en tenant compte de la production annuelle de mil, on estime une quantité moyenne de résidus de 729 231 tonnes/an en moyenne. La production moyenne annuelle associée à ce résidu est de 1 852 247 tonnes/an au Sénégal.

Sur la même période, pour le maïs, la production moyenne est évaluée à 485 703 tonnes ; celle de 2018 était de 410 364 tonnes. Le rendement en rafles correspondant à la période 2014 à 2019 serait estimée à 315 706,95 tonnes ; sachant que la rafle représente en poids massique environ 65 % celle des graines de maïs provenant du même régime (rafle plus graines).

L'estimation de la disponibilité d'une biomasse donnée ne saurait se faire sans au préalable une estimation du potentiel énergétique qui va de pair avec la détermination des principales caractéristiques physico-chimiques (analyses immédiate et élémentaire). L'analyse immédiate renseigne sur les teneurs en humidité (E), en matières volatiles (MV), en cendres (Ce) et en carbone fixe (CF). L'analyse élémentaire, quant à elle, renseigne sur les éléments constituant la biomasse. Parmi ces éléments, on peut citer : le carbone (C), l'hydrogène (H), l'azote (N), l'oxygène (O), etc. Le tableau 1.1 ci-dessous présente les résultats de caractérisation de quelques briquettes de charbon.

Tableau 1.1 : Caractéristiques physico-chimiques de quelques briquettes de charbon [2]

Échantillons	Analyse immédiate				Analyse élémentaire				Pouvoir calorifique	
	(%) ^s				(%) ^s				(MJ/kg) ^s	
	E ^b	MV	Cendre s	CF	C	H	N	O	PCS	PCI
Briquette 1	0,63	6,44	15,16	78,40	76,59	1,11	1,66	5,49	26,64	26,41
Briquette 2	0,64	8,94	13,00	78,07	76,31	1,29	1,68	7,72	26,82	26,55
Briquette 3	0,60	20,80	17,15	62,05	65,03	3,28	2,02	12,52	25,04	24,35
Briquette 4	0,73	22,35	14,85	62,79	65,61	3,35	2,00	14,19	25,34	24,63
Briquette 5	0,49	7,76	16,90	73,34	74,64	1,11	1,60	5,74	26,09	25 ,86
Briquette 6	0,62	10,46	15,94	73,60	74,17	1,30	1,64	6,94	25,88	25,61
Briquette 7	0,80	22,13	13,22	64,65	68,43	3,34	2,08	12,93	26,35	25,64
Briquette 8	0,49	24,45	15,03	60,52	65,80	3,52	2,03	13,63	25,20	24,46

^b : exprimé sur base humide, ^s : exprimé sur base sèche

Dans ce tableau, il s'agit des résultats de caractérisation de différentes briquettes de charbon à base de coques d'arachide carbonisées. Les résultats obtenus lors des travaux de thèse de Himbane [2] montrent qu'il est possible à partir de biomasse carbonisée d'obtenir des briquettes de charbon hautement énergétiques ; par exemple, ce dernier a pu obtenir des briquettes de charbon dont le PCI était compris entre 24 et 27 MJ/kg avec des teneurs en carbone fixe élevées (supérieures à 60 %) et des teneurs en cendres en dessous de 18 % conformément à la norme EN 1860-2.

1.2. Les briquettes de charbon au Sénégal

Les combustibles dits traditionnels (charbon de bois et bois de chauffe) demeurent les principales sources d'énergie des pays subsahariens, en particulier le Sénégal. Selon le Ministère du pétrole et des énergies du Sénégal, ces deux combustibles contribuent à hauteur de 84 % dans leur consommation énergétique et constituent par ailleurs la source d'énergie dominante dans le bilan énergétique national avec 42 % [3]. L'exploitation de ces deux combustibles expose les forêts à des dégradations importantes et à des risques environnementaux majeurs. Cette problématique explique ainsi la mise en place de nombreux projets, proposant ainsi une diversification des sources d'énergie domestique.

Cependant une substitution des énergies dites « traditionnelles » par d'autres formes d'énergie est extrêmement délicate en raison de la pauvreté de la population concernée.

Les ménages qui choisissent d'utiliser le bois-énergie pour la cuisson des aliments n'ont pas souvent accès à d'autres sources d'énergie, car elles sont trop coûteuses ou inaccessibles.

La composante briquette de charbon n'est pas une nouveauté au Sénégal. D'ailleurs, au Sénégal, on appelle aussi les briquettes de charbon sous le terme de biocharbon ou charbon vert. Quelques entreprises de production de biocharbon ont été répertoriées au Sénégal. Parmi ces entreprises, nous pouvons citer Brades, Carbosen, Pro-Natura, etc.

Au Sénégal les briquettes de charbon sont obtenues via des déchets issus de l'agriculture pouvant être des tiges de mil, des coques d'arachides, des coques de cajou, de la balle de riz, du typha et récemment avec la présente étude avec des rafles de maïs etc.), la poudre de charbon ou des déchets de papiers. Elles sont utilisées comme combustibles dans les ménages pour la cuisson, le chauffage de l'eau et le chauffage des locaux.

1.3. Les foyers domestiques au Sénégal et leurs caractéristiques

Les foyers à combustibles ligneux sont les plus utilisés dans la plupart des familles du tiers-monde. Ils font partie de la vie courante et chaque ménage en utilise pour la cuisson de ces repas. Plusieurs formes de foyers sont utilisées dans le monde depuis le foyer trois pierres jusqu'aux foyers améliorés. Parmi les foyers utilisés, on distingue les foyers à charbon (charbon de bois, biocharbon...) ainsi que les foyers à bois. Dans cette étude bibliographique, nous allons nous consacrer aux foyers à charbon. Ils se distinguent par deux catégories : les foyers dits traditionnels et les foyers dits améliorés.

1.3.1. Les foyers à charbon dits traditionnels

Ce sont des foyers de base n'ayant connu aucune amélioration. Ces foyers ont été fabriqués par des producteurs artisanaux sans respect des normes de sécurité et d'économie de combustible. Au Sénégal, le foyer à charbon traditionnel le plus utilisé est le foyer malgache.

❖ Le foyer traditionnel « malgache »

Le foyer « malgache » est un équipement de cuisson traditionnel utilisé au Sénégal. Le foyer malgache (voir figure 1.2) est caractérisé par un poids léger et conçu à partir d'un matériau métallique (le fer). Ce type d'équipement présente une chambre de combustion de forme pyramidale. Le combustible usuel demeure le charbon de bois. Ces types de foyers sont généralement prévus pour fonctionner dans une cuisine, à un endroit où l'effet du vent ne doit pas dévier leur flamme. Dans la pratique, ils sont le plus souvent utilisés à l'extérieur des endroits de cuisson, ce qui veut dire qu'ils seront fréquemment exposés de tous côtés à l'influence du vent. Le foyer malgache demeure le plus connu et le plus répandu parmi les foyers à charbon au Sénégal. Malgré son faible coût par rapport aux foyers améliorés, le cuiseur malgache n'est pas économe en charbon car une grosse partie de l'énergie est rayonnée à l'extérieur, donc perdue du fait que le foyer n'est pas bien isolé.

Le foyer malgache constitue le foyer de référence en ce qui concerne les tests des performances des foyers améliorés au Sénégal. Le prix d'un foyer malgache varie de 1 500 à 5 000 FCFA. Sa durée de vie est moins importante que celle des foyers améliorés (environ 1 an). Ce foyer est peu efficace avec un rendement thermique tournant autour de 20 % [4].



Figure 1.2 : Foyer traditionnel malgache

1.3.2. Les foyers dits améliorés

A l'instar du foyer malgache, d'autres foyers à charbon dits améliorés sont également commercialisés et utilisés dans les ménages au Sénégal. Parmi ces foyers, nous citons le foyer "Jambar", le foyer "Sakkanal", le foyer "Eclair-Taaru", ...

➤ Le foyer "Jambar"

C'est le foyer amélioré qui connaît une diffusion sur presque tout le territoire national. Les foyers "Jambar" (voir figure 1.3) existent sous deux formats : nous distinguons les foyers "Jambar" à charbon et les foyers "Jambar" à bois. Le foyer "Jambar" est conçu à partir d'un revêtement métallique en tôle d'acier d'épaisseur minimum de 0,6 mm, d'un insert céramique dont le produit de base est de l'argile (granulométrie inférieure à 0,5 mm) cuite entre 700 °C et 900 °C et d'un matériau isolant servant de lien entre l'insert céramique et le revêtement métallique [5]. L'insert céramique permet la conservation de la chaleur. Du fait de l'inertie thermique de son insert céramique, le foyer "Jambar" est mieux adapté pour les cuissons des repas demandant beaucoup d'heures. Le foyer "Jambar" a plus d'avantages par rapport aux autres cuiseurs traditionnels (foyer malgache par exemple) car il permet d'avoir une économie de combustibles d'environ 30 % à 40 % pour ce qui est de l'utilisation du charbon de bois.

Le prix d'un foyer "Jambar" au Sénégal varie entre 5 000 et 15 000 FCFA. La durée de vie est estimée entre 2 et 3 ans et son rendement thermique est compris entre 30 et 50 % [5].



Figure 1.3 : Foyer "Jambar"

➤ **Le foyer "Sakkanal"**

Le foyer "Sakkanal" (voir figure 1.4) est un foyer métallique conçu soit par un artisan du secteur informel, de petites et moyennes entreprises de construction métallique ou des usines de fabrication semi-industrielles. Le principal matériau utilisé pour sa construction est la tôle de récupération provenant des carcasses de véhicules ou de barils de pétrole ou de produits chimiques. Ce choix est dû au fait que la tôle de récupération coûte moins cher que la tôle neuve. Les foyers "Sakkanal" existent sous deux modèles : les foyers "Sakkanal" monomarmite et les foyers "Sakkanal" multimarmite. Ces foyers sont soit spécifiques à l'utilisation du charbon ou du bois de chauffage. Le foyer "Sakkanal" à charbon peut économiser de l'énergie jusqu'à 30 % par rapport au foyer traditionnel (foyer malgache). Le prix d'un foyer "Sakkanal" tourne autour de 5 000 FCFA. Le rendement thermique d'un foyer "Sakkanal" est de l'ordre de 24 % pour le sakkanal multimarmite et de 19 % pour le "Sakkanal" monomarmite. Un foyer "Sakkanal" peut durer environ 2 à 3 ans, mais sa grille se doit d'être souvent renouvelée plusieurs fois et sa durée de cuisson est estimée à environ une heure [6].



Figure 1.4 : Exemple de foyer "Sakkanal" monomarmite

➤ **Le foyer amélioré "Eclair-taaru"**

Le foyer "Eclair taaru" est conçu au CERER (Centre d'Étude et de Recherche sur les Énergies Renouvelables) en 2012 en collaboration avec le PERACOD (Programme pour la promotion des énergies renouvelables, de l'électrification rurale et l'approvisionnement durable en combustibles domestiques) et expérimenté dans ledit centre.

Le tronc du foyer est composé de deux cylindres concentriques creux ; l'espace entre les deux cylindres permet à l'air d'y circuler et d'atteindre la chambre de combustion. La particularité du foyer "Eclair taaru" par rapport aux autres foyers cités ci-dessus est la présence des volets (trous) d'air secondaire sous le cylindre externe et une chambre de combustion ayant des supports pour la marmite afin qu'elle ne soit pas en contact direct avec le charbon. Le constat fait avec les autres cuiseurs à l'exception du foyer "Jambar" est que lorsque la marmite repose directement sur le tas de charbons, celle-ci descend au fur et à mesure que le charbon se consume et réduisant ainsi les sorties ou les entrées d'air par les côtés de la marmite et finit par les obstruer. L'air qui circule entre les deux cylindres creux est brûlé par la chaleur, ce flux d'air chaud augmente la combustion donc l'efficacité du foyer [7]. La figure 1.5 nous montre une image du foyer "Eclair-taaru".



Figure 1.5 : Foyer " Eclair-taaru" [7]

1.4. Émissions de polluants gazeux, particulaires et performances des foyers à charbon

1.4.1. Émissions de gaz et particules

Lors de la combustion de briquettes de charbon de biomasse dans les cuiseurs domestiques plusieurs gaz et particules sont émis. Parmi ceux-ci nous pouvons citer le dioxyde de carbone (CO_2), les particules fines ($\text{PM}_{2,5}$ par exemple), le monoxyde de carbone CO , les oxydes d'azote (NO_x), les composés organiques volatils (COV), les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), etc.

❖ Dioxyde de carbone (CO_2)

Le CO_2 est l'un des principaux gaz dégagés lors de la combustion de tous les types de biomasse en raison de leur contenu en carbone élevé. Ce dernier réagit ainsi avec l'oxygène de l'air pour former du CO_2 . Bien que la combustion de biomasse en émette de grandes quantités de CO_2 , elle est reconnue comme une source d'énergie neutre à l'égard de l'impact sur le réchauffement climatique.

❖ Particules fines $\text{PM}_{2,5}$

Les particules sont classées suivant leur diamètre aérodynamique. En dessous de $2,5 \mu\text{m}$, elles sont dites non sédimentées car elles sont incapables de se déposer au sol sous l'effet de la gravitation.

Ces particules fines ont un effet reconnu sur la santé humaine. Deux types d'impacts, dépendant de la durée d'exposition, sont à considérer :

- court terme : augmentation de la sensibilité aux allergènes ;
- long terme : maladies respiratoires et cardiovasculaires.

Dans la littérature, il est communément admis que la toxicité des particules est d'autant plus importante que leur taille/granulométrie est fine [8]. En effet, elles vont avoir la possibilité de pénétrer plus loin dans le système respiratoire humain si elles sont de petites tailles. Les particules qui pénètrent le plus profondément dans le système respiratoire humain sont des nanoparticules de 15 à 680 nm de diamètre [9]. D'autre part, la toxicité des particules est intimement liée à la combustion elle-même. Ainsi, une mauvaise combustion produit des particules plus toxiques.

❖ Monoxyde de carbone (CO)

Le CO est le principal sous-produit de la combustion incomplète du carbone du combustible. Le carbone est oxydé en CO₂ sous des conditions spécifiques de température et d'O₂ lors d'une combustion complète. Les émissions de CO se produisent donc lorsque la température de combustion est trop faible, quand l'apport d'O₂ est insuffisant ou encore lorsque le temps de séjour est trop court. Pour une température donnée, il existe un taux d'apport d'air qui minimise les rejets de CO. Par ailleurs, l'OMS a fixé des valeurs seuils ou limite de 0,59 g/min et 0,16 g/min [10], respectivement pour les foyers avec conduits de fumées et les foyers sans conduits de fumées, au-delà desquelles les expositions aux émissions de CO peuvent s'avérer dangereuses pour la santé humaine. Le CO est alors considéré comme un bon indicateur de la qualité du procédé et, par conséquent, il est généralement mesuré lors des tests d'efficacité des équipements de combustion.

❖ Oxydes d'azote (NOx)

Les émissions de NOx issues de la combustion de biomasse proviennent de l'oxydation complète de l'azote contenu dans la biomasse. La majorité des NOx produits se retrouvent sous forme de monoxyde d'azote (NO), qui se convertit en NO₂ une fois dans l'atmosphère.

Le dégagement de NOx survient selon trois mécanismes reliés respectivement au combustible, à la température et à la concentration d'hydrocarbures :

- le premier mécanisme, appelé NOx-combustible, correspond à la conversion de l'azote de la biomasse en NO (> 90 %) et en NO₂ (< 10 %) par une série de réactions élémentaires faisant intervenir le NH₃ et le cyanure d'hydrogène (HCN) en tant que produits intermédiaires ;
- le second procédé, nommé NOx-thermique, fait intervenir le N₂ de l'air avec l'O₂ pour former du NO à des températures supérieures à 1300 °C ;

- le troisième phénomène, désigné comme NO_x-prompt, provient de la réaction du N₂ de l'air avec des hydrocarbures, formant ainsi du HCN puis du NO.

❖ Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

Les HAP sont usuellement mentionnés séparément des autres hydrocarbures à cause de leurs effets cancérigènes. Les HAP peuvent être émis en phase gazeuse ou particulaire. Durant l'analyse de 16 HAP issus de plusieurs chaudières à bois, des études ont démontré que la plupart des HAP (89 %) se présentaient sous forme gazeuse, dont le naphthalène (C₁₀H₈) et le phénanthrène (C₁₄H₁₀) [11].

❖ Les composés organiques volatils (COV)

Les COV sont des gaz et des vapeurs qui comprennent tous les hydrocarbures à l'exception du CH₄ et des HAP. Les COV les plus représentatifs sont l'éthane (C₂H₆), l'éthylène (C₂H₄), le propène (C₃H₆), l'acétylène (C₂H₂) et le benzène (C₆H₆).

1.4.2. Performance des foyers

Pour évaluer les performances énergétiques des foyers et déterminer les différentes émissions par rapport aux combustibles utilisés, des méthodes pratiques sont employées. Parmi ces méthodes, nous pouvons citer les tests d'ébullition de l'eau (TEE) et les tests à cuisine contrôlée (TCC) réalisés souvent en laboratoire. Ces deux tests ne reflétant pas exactement la réalité sur le terrain, il serait donc important de parler également des tests de terrain (ou encore tests de performance de la cuisine) qui, sont habilités à fournir des indications d'économie de combustible.

❖ Test d'ébullition d'eau (TEE)

Le test à ébullition d'eau permet de faire une simulation simple et rapide des différentes phases de la cuisson d'un repas. Pour Lask *et al*, il s'agit d'une méthode standard, basée sur l'ébullition de l'eau, utilisée pour évaluer les performances des foyers domestiques [12]. La méthodologie de test à ébullition d'eau consiste à noter les conditions météorologiques (température ambiante, vent, humidité relative), à peser les quantités d'eau et de combustible en début et fin de phase de montée rapide à ébullition et enfin de phase de mijotage.

Il s'agit de charger le foyer de manière optimale pour un allumage rapide avec un feu vif afin de faire des relevés de températures de l'eau dans la marmite.

Ce type de test nous permet d'avoir des informations sur le pourcentage de chaleur utilisée pendant la première phase (rapport de l'énergie récupérée par le contenu de la marmite à l'énergie produite par la combustion pendant la première phase).

Le pourcentage total de chaleur utilisée (rapport de l'énergie récupérée par le contenu de la marmite à l'énergie produite par la combustion durant la totalité de l'essai) et sur l'économie de combustible par rapport au cuiseur de référence (généralement modèle traditionnel ou concurrent). Dans certains cas d'études, les auteurs utilisent une méthode modifiée du test à ébullition d'eau lors de l'évaluation des foyers [9], [11].

Ainsi, trois phases sont généralement observées lors d'un test à ébullition d'eau :

- La phase de démarrage à froid : cette phase débute au moment où le foyer est à une température ambiante. La quantité de combustible ainsi que la quantité d'eau dans la marmite sont pesées. Par la suite, lorsque l'ébullition est atteinte, l'eau chaude est remplacée par une nouvelle marmite d'eau à température ambiante pour effectuer la seconde phase de test.
- La phase de démarrage à chaud : elle est effectuée au moment où le foyer est encore chaud. La procédure demeure la même que la première phase mais ici le foyer est chaud.
- La phase de mijotage : cette étape fournit la quantité de combustible requise pour faire mijoter une quantité d'eau juste au-dessous de la température d'ébullition pendant une période de 45 minutes. La température de l'eau doit être maintenue à des variations de températures niveau bas ($94\text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{ébul}}-6\text{ }^{\circ}\text{C}$) et niveau de ($97\text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{ébul}}-3\text{ }^{\circ}\text{C}$) (voir figure 1.6).

Les foyers traditionnels sont inappropriés pour répondre à la flexibilité du phénomène de mijotage. Pour mijoter, la femme est parfois obligée d'enlever le combustible allumé du foyer ; ce qui constituerait un gaspillage d'énergie. La meilleure solution serait de baisser la combustion en freinant l'entrée d'air dans la chambre de combustion.

La figure 1.6 ci-contre illustre les différentes phases de test à ébullition d'eau.

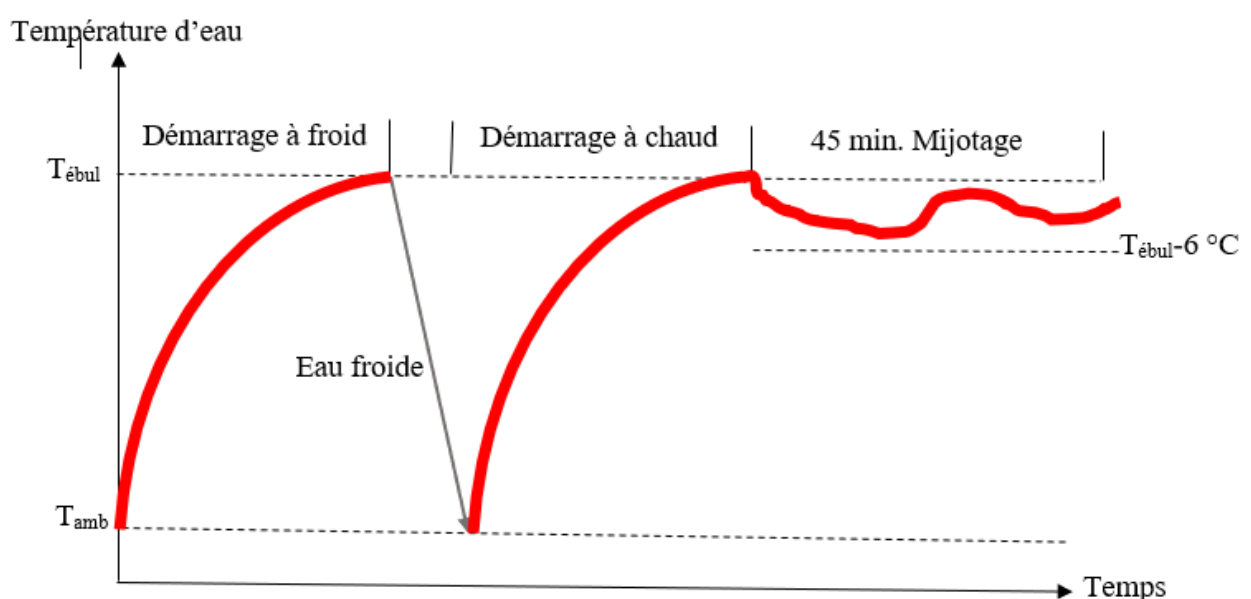


Figure 1.6 : Diagramme de phases du TEE [2]

Le test d'ébullition d'eau constitue un test rapide et simple, reproductible et facile à réaliser. Il fournit une compréhension préliminaire de la performance du foyer et donc, informe sur le processus de conception. Néanmoins, il ne fournit que des indications approximatives de la cuisson réelle. D'ailleurs, des études passées ont montré que les tests d'ébullition d'eau ne sont pas de bons prédicteurs de l'utilisation réelle du combustible par rapport aux mesures de consommation de combustibles dans les ménages [8], [10], [12].

❖ **Test à cuisine contrôlée (TCC)**

Le test de cuisine contrôlée est un test qui peut se dérouler en laboratoire comme sur le terrain. Ce test permet de mesurer la performance d'un foyer par rapport aux pratiques de cuisson traditionnelles lorsqu'un cuisinier prépare un repas local. Le test de cuisine contrôlée est réalisé pour évaluer la performance d'un foyer en milieu contrôlé en adoptant une méthode standard choisie pour simuler les pratiques culinaires locales. Ce type de test ne reproduit pas réellement ce qui est réalisé par les ménages durant la cuisson quotidienne, mais il révèle ce qui est possible dans les ménages dans des conditions idéales. Le test de cuisine contrôlée nécessite la connaissance du repas, des pratiques culinaires traditionnelles et du foyer domestique en cours de test. La méthodologie de test de cuisine contrôlée présente l'avantage d'être relativement simple, reproductible, rapide et réalisable. Il fournit une compréhension préliminaire de la performance d'un foyer pour la cuisson et donc, peut être utile à travers le processus de conception et de diffusion. Cependant, son inconvénient réside du fait qu'il ne reflète pas une utilisation incontrôlée sensible aux différences de comportement de l'utilisateur ou à des combustibles dont les propriétés (humidité, taille et composition) varient.

Durant le test de cuisine contrôlée, les paramètres suivants sont à évaluer :

- l'équivalent de combustibles consommés (ECC) ;
- la quantité d'aliments cuits (QC) ;
- le temps de cuisson (t) ;
- l'équivalent de combustible consommé ramené à la quantité d'aliments cuits (ou consommation spécifique de combustible (CSC)).

La consommation spécifique de combustible est donnée dans le cas de l'étude réalisée par [13] comme suit :

$$CSC = \frac{ECC(g)}{QC(kg)} \quad (1.1)$$

Où QC représente la quantité d'eau bouillie dans le cas du test d'ébullition ou la quantité d'aliments cuits dans le cas du test de cuisine contrôlée.

Par ailleurs, les auteurs [17] ont calculé l'équivalent de combustibles consommés sur la base de la formule suivante :

$$ECC = CC \times (1 - 1,08 \times E) \quad (1.2)$$

Où CC est la quantité de combustibles consommés et E de l'humidité du combustible.

❖ **Test de terrain ou test de performance de cuiseur (TPC)**

C'est le principal test de terrain utilisé pour évaluer les performances des foyers domestiques dans des conditions réelles de pratique. Cette méthode est adoptée pour évaluer les impacts réels de consommation de combustible. Le test de performance de la cuisine se déroule dans les maisons des utilisateurs de foyers domestiques. Les tests de terrain sont généralement menés dans le cadre d'un effort de diffusion en synergie avec les populations locales qui cuisinent de façon normale. La réalisation de ces tests nécessite plusieurs jours sur le terrain. Le test de terrain a l'avantage de permettre une meilleure compréhension des performances du foyer sur le terrain, y compris les impacts des foyers sur l'utilisation du combustible et sur le comportement des ménages. Cependant, l'intensité de main d'œuvre, l'intrusion dans les activités quotidiennes des ménages et la plus grande variabilité des résultats (essais non contrôlés) demeurent les faiblesses de ce test.

Les projets de foyers améliorés dans les pays en développement ont le potentiel de réduire la déforestation, d'améliorer la santé et de ralentir le changement climatique. Pour répondre à ces exigences, les foyers doivent être soigneusement conçus et validés grâce à des tests et une vérification approfondie de leurs performances.

Vu la variété de foyers améliorés commercialisés dans le marché, il serait très judicieux de choisir parmi ceux-là, ceux qui permettraient de réaliser d'une manière très efficace une bonne combustion des briquettes de charbon et qui produisent moins de polluants.

1.5. Calcul des facteurs d'émission et des paramètres de performances des foyers

Les paramètres de performance énergétique des foyers et leurs facteurs d'émission sont calculés à la suite de tests réalisés. Il peut s'agir de l'un des tests cités plus haut : le TEE ou le TCC ou le TPC.

1.5.1. Les paramètres de performances des foyers

Parmi les paramètres de performance des foyers, nous pouvons citer : la puissance brute, la puissance utile et le rendement énergétique.

❖ **La puissance brute moyenne (Pb)** est définie comme l'énergie thermique libérée par la combustion du combustible pendant un temps donné. Elle est définie comme suit :

$$Pb (w) = \frac{\Delta m \times PCI_{humide}}{\Delta t} \quad (1.3)$$

Où Δm est la masse de combustible consommé en g, PCI_{humide} le pouvoir calorifique inférieur en J/g prenant en compte la teneur en eau des briquettes et Δt est la durée sur laquelle est calculée cette puissance en s.

❖ **La puissance utile moyenne (Pu)** est définie comme l'énergie thermique transférée à la masse d'eau contenue dans la marmite pendant un temps donné. Elle est calculée comme suit :

$$Pu(w) = \frac{C_{p,e} \times m_e \times (T_f - T_i)}{\Delta t} \quad (1.4)$$

Où C_p , est la chaleur massique de l'eau (4,18 J/g.K), m_e est la masse de l'eau en g contenue dans la marmite, T_f, T_i les températures finale et initiale en °C et Δt est la durée sur laquelle est calculée cette puissance en s.

❖ **Le rendement énergétique (η_E)** exprime la capacité du foyer à restituer l'énergie contenue dans la masse de combustible consommé. Il est calculé par la formule suivante :

$$\eta_E (\%) = \frac{C_{p,e} \times m_e \times (T_f - T_i)}{m_c \times PCI} \quad (1.5)$$

Où C_p, e est la chaleur massique de l'eau (4,18 J/g.K), m_e est la masse de l'eau en g contenue dans la marmite, T_f et T_i les températures finale et initiale en °C, m_c est la masse de combustible consommé et PCI est le pouvoir calorifique inférieur du combustible.

1.5.2. Les facteurs d'émission des cuiseurs

Selon la méthode de mesure, la détermination des facteurs d'émission peut être différente. Nous reprenons dans cette partie les équations utilisées par Himbane [2], dans le cadre de sa thèse, pour déterminer quelques facteurs d'émissions.

❖ Concentration en masse de CO et facteurs d'émission CO

Par l'analyse de la concentration volumique en monoxyde de carbone d'un échantillon de gaz, il est alors possible de connaître à chaque pas de temps la masse de monoxyde de carbone émise dans les gaz de combustion (débit mesuré).

Pour ramener au facteur d'émission par kilogramme de briquettes de charbon anhydre, il suffira de totaliser les masses ainsi calculées sur toute la durée de l'essai en prenant en compte la masse de briquettes de charbon anhydre consommée durant l'essai.

La masse de monoxyde de carbone (CO) émise et les différents facteurs d'émissions de CO sont calculés à l'aide des équations suivantes :

$$CO \text{ (mg)} = \sum_{i=0}^n V_{f,i} \times \frac{CO_{ppm,i} \times M_{CO}}{10^6 \times V_{m,i}} \times 1000 \quad (1.6)$$

$$V_{f,i} \text{ (L)} = \frac{1000}{3600} \times \Delta t \times Q \quad (1.7)$$

$$CO \left(\frac{g}{kg} \right) = \frac{CO(g)}{m_c} \quad (1.8)$$

$$CO \left(\frac{g}{min} \right) = \frac{CO(g)}{t} \quad (1.9)$$

$$CO \left(\frac{g}{MJ} \right) = \frac{CO \left(\frac{g}{kg} \right)}{PCI \times \eta_E} \quad (1.10)$$

Où $V_{f,i}$ est le volume des gaz collectés par la hotte sur le pas de temps (fourni par la mesure du débit). CO_{ppm} , est la concentration volumique en partie par million dans le gaz refroidi et sec (la concentration volumique se conserve avec la variation de température pour des gaz parfaits). M_{CO} , la masse molaire (g/mol) du monoxyde de carbone soit 28 g/mol, V_m , est le volume molaire des gaz émis qui sont assimilés à des gaz parfaits (22,4 l/mol aux conditions normales de températures et de pression, il est calculé à la température d'échantillonnage des fumées à chaque pas de temps). Q , le débit volumique d'extraction des gaz et particules durant le pas de temps concerné. Δt est le pas de mesure en s et n le nombre de points de mesure, m_c est la masse de combustible sec consommé en kg, t est la durée du test en minutes (min). PCI , le pouvoir calorifique inférieur du combustible en kg/MJ et η_E est le rendement énergétique du cuiseur en %.

❖ Concentration en masse de CO₂

La masse de dioxyde de carbone émise est la masse totale de dioxyde de carbone accumulée durant tout l'essai.

Toutefois, compte tenu de la forte dilution des gaz de combustion, il faut tenir compte de la quantité de CO₂ déjà présente dans l'air ambiant. La masse de dioxyde de carbone émise est calculée à l'aide des équations suivantes :

$$CO_2 (g) = \Delta t \sum_{i=0}^n V_{f,i} \times \frac{(CO_2\% - 0.041) \times M_{CO_2}}{t \times V_{m,i}} \quad (1.11)$$

$$V_{f,i} (L) = \frac{1000}{3600} \times \Delta t \times Q \quad (1.12)$$

Où M_{CO_2} est la masse molaire (g/mol) du dioxyde de carbone soit 44 g/mol, et $CO_2 \%$, est la concentration volumique en pourcentage, dans le gaz refroidi et sec, de dioxyde de carbone sur l'intervalle de temps Δt .

❖ Concentration en masse de PM_{2,5} et facteurs d'émission PM_{2,5}

Himbane, dans le cadre de sa thèse, a évalué la concentration en masse des particules fines, $PM_{2,5}$ et leurs facteurs d'émissions en utilisant les équations suivantes :

$$PM_{2,5} (\mu g) = \sum_{i=0}^n \frac{PM_{2,5} \times \left(\frac{\mu g}{m^3} \right) \times V_{f,i}}{1000} \quad (1.13)$$

$$V_{f,i}(L) = \frac{1000}{3600} \times \Delta t \times Q \quad (1.14)$$

$$PM_{2,5} \left(\frac{\text{mg}}{\text{kg}} \right) = \frac{PM_{2,5}}{m_C} \quad (1.15)$$

$$PM_{2,5} \text{ (g/min)} = \frac{PM_{2,5}}{t} \quad (1.16)$$

$$PM_{2,5} \text{ (g/MJ)} = \frac{PM_{2,5}}{PCI \times \eta_E} \quad (1.17)$$

Où m_C est la masse de combustible sec consommé en kg, t est la durée du test en minutes (min), PCI , le pouvoir calorifique inférieur du combustible en kg/MJ et η_E est le rendement énergétique du cuiseur en %.

Conclusion

Cette étude bibliographique a permis de faire une revue sur les briquettes de charbon de biomasse, principalement celles utilisées au Sénégal. Dans ce chapitre, le travail s'est également focalisé sur les foyers domestiques à charbon utilisés au Sénégal et sur un rappel des différents protocoles de tests des foyers domestiques ainsi que les mesures de leurs facteurs d'émission et de leurs performances. Il ressort de cette revue bibliographique que les briquettes de charbon existent sous plusieurs formes et que la composante briquette de charbon n'est pas une nouveauté au Sénégal. Les résultats de thèse de Himbane montrent qu'il est possible, à partir de biomasse carbonisée, d'obtenir des briquettes de charbons hautement énergétiques. Malgré la présence des foyers améliorés, le cuiseur malgache demeure toujours dans la pratique culinaire des Sénégalais. Toutefois la caractérisation des cuiseurs domestiques requiert l'utilisation de protocoles et de plusieurs méthodes pour évaluer leurs facteurs d'émission et leurs performances énergétiques et environnementales.

CHAPITRE 2 : Matériels et méthodes

Introduction

Il s'agit dans ce deuxième chapitre d'analyser nos échantillons et de présenter nos expérimentations. Nous avons choisi de travailler avec trois biomasses (coques d'arachide, coques de cajou et rafles de maïs) parmi les différents combustibles favorables, disponibles et surtout énergétiques dans la région de Ziguinchor. Ces biomasses ont été ainsi valorisées en briquettes de charbon. Une étude des performances énergétiques, d'une part, a été effectuée sur un foyer "Jambar" et un foyer malgache. D'autre part, les émissions de gaz ont été mesurées lors de la combustion de ces dites briquettes dans le foyer malgache.

2.1. Matières premières

Les biomasses utilisées dans ce travail sont issues de déchets agricoles. Nous avons choisi ces biomasses du fait de leur disponibilité, leur contenance énergétique et de l'importance qu'elle commence à occuper dans les cycles de l'économie circulaire de valorisation d'un produit. Nos biomasses proviennent tout d'endroits différents, c'est le cas de l'entreprise SCPL qui exploite les sous-produits (coques de cajou, CC) issues de la transformation de la noix de cajou pour produire des gaz de synthèse par la technologie de gazéification. Pour ce qui est des coques d'arachide (CA) utilisées dans ce travail, elles ont été collectées dans la commune de Diouloulou. Les rafles de maïs (RM) proviennent de Djibonker ; à notre connaissance, il s'agit d'un déchet jusqu'à là non exploité pour la production de combustible domestique ; justifiant en partie le choix de ce nouveau déchet. La figure 2.1 ci-dessous présente les images des différents échantillons de biomasses utilisées dans ce travail.



Figure 2.1 : Photos illustrant les biomasses brutes : coques d'arachide (à gauche), coques de cajou (au milieu) et rafles de maïs (à droite)

2.2. Carbonisation de la biomasse

Les trois biomasses ont été carbonisées en utilisant un four métallique. Le mode d'apport d'énergie utilisé ici, est celui de la combustion partielle. Une partie de la charge va entrer en combustion pour apporter l'énergie nécessaire à la carbonisation de la biomasse.

Un fût métallique cylindrique (réacteur) d'une hauteur de 100 cm et de diamètre 62 cm a été utilisé. Sur sa surface de base, nous avons créé de petits trous permettant l'admission d'une faible quantité d'air et la traversée de tout liquide (goudrons) de pyrolyse. Ce réacteur possède un couvercle sur lequel, nous avons aussi créé un orifice circulaire de 10 cm à son centre. Cet orifice est un support sur lequel s'appuie une cheminée. Lors des opérations de carbonisation, le fût est posé sur trois pierres, à sa surface de base, de telle sorte qu'elle soit à environ à quelques centimètres du sol. Ainsi, pour d'optimiser le rendement de carbonisation le fût a été rempli à ras-bord jusqu'à atteindre une masse de 24 kg pour la coque d'arachide, 30 kg pour la coque de cajou et 35 kg pour la rafle de maïs. A la suite de ce remplissage, la partie basse surélevée par les trois pierres est couverte de terre afin de la rendre étanche ; aussi quatre trous deux à deux diamétralement opposés sont créés. Enfin la charge est allumée par le haut du fût et le front de flamme du procédé de carbonisation est supposé se déplacer du haut vers le bas. Une fois que la charge a suffisamment pris de l'énergie pour amorcer sa carbonisation, le fût est couvert et la cheminée est posée sur l'orifice du couvercle. A la fin de la carbonisation, tous les trous ainsi que l'orifice du couvercle sont fermés afin de permettre le refroidissement de la charge et d'éviter la combustion de produit carboné.

Pour faciliter la compréhension, les trois charbons obtenus lors de la carbonisation ont été codifiés comme indiqué dans le tableau 2.1 ci-dessous.

Tableau 2.1 : Codification des échantillons de charbon de biomasse

Échantillons	Codification
Charbon de coques d'arachide	Ch_CA
Charbon de coques de cajou	Ch_CC
Charbon de rafles de maïs	Ch_RM

Les photos de la figure 2.2 donnent un aperçu de l'aspect des charbons obtenus après leur carbonisation.



Figure 2.2 : Photos de charbons de coques d'arachide (à gauche), de coques de cajou (au milieu) et de rafles de maïs (à droite)

2.3. Suivi de la température à l'intérieur du fût de carbonisation

Comme nous l'avons souligné précédemment, le front de carbonisation dans un tel carbonisateur se déplace du haut vers le bas. Cela a suscité notre curiosité de créer trois points de prise de température sur la surface latérale du fût de carbonisation. Ces points sont numérotés de 1 à 3 et disposés du haut vers le bas (voir figure 2.3 ci-dessus). Grâce à un programme d'acquisition de températures développé via Arduino dans le travail de mémoire de Master de Georges Ambouor Diedhiou [18], nous avons suivi l'évolution de la température de carbonisation de chacune des trois types de biomasses. Les données ont été enregistrées à l'intervalle d'une minute.

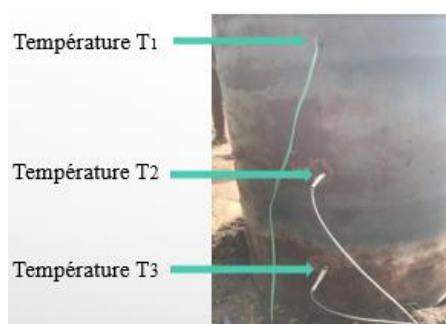


Figure 2.3 : Les trois points des températures de carbonisation du fût

2.4. Production de briquettes de charbon

Pour produire les briquettes de charbon, nous avons opté de travailler sur deux types de formulations :

- La première formulation contient 90 % de fines de charbon et 10 % de liant en pourcentage de masse sèche.
- La seconde formulation contient 91 % de fine de charbon et 9 % de liant en pourcentage de masse sèche.

Au total six formulations de trois types de briquettes ont été effectuées. Les différentes formulations ainsi que leur codification sont données dans le tableau ci-contre :

Tableau 2.2 : Composition des briquettes de charbon

Échantillons	Matières premières	Pourcentage d'amidon (liant)	Pourcentage de fines de charbon	Codification
B1	Coques d'arachide	9	91	Br_CA_9%
B2	Coques de cajou	9	91	Br_CC_9%
B3	Rafles de maïs	9	91	Br_RM_9%
B4	Coques d'arachide	10	90	Br_CA_10%
B5	Coques de cajou	10	90	Br_CC_10%
B6	Rafles de maïs	10	90	Br_RM_10%

2.4.1 Broyage et préparation du liant

Les charbons de biomasse obtenus lors de la pyrolyse sont broyés à l'aide d'un mortier et un pilon (voir figure 2.4). Le broyat obtenu à la suite de cette opération est tamisé de sorte qu'il passe à travers un tamis de 1 mm. Pour la préparation de la solution de liant, une quantité de farine nécessaire a été pesée et puis mélangée en premier avec l'eau froide avec un rapport massique farine/eau compris entre 0,1 et 0,2. L'ensemble a été porté à l'ébullition (température de 100 °C pendant 5 minutes) en utilisant un réchaud à gaz. En effet dans le cadre de ces travaux, nous n'utilisons que de l'énergie renouvelable provenant du biogaz produit par un biodigesteur installé sur la plateforme biocharbon/biogaz. Le mélange est remué jusqu'à l'obtention d'une solution gélatineuse (voir figure 2.5).



Figure 2.4 : Broyage des chars



Figure 2.5 : Présentation du liant

2.4.2 Fabrication des briquettes de charbon

Pour produire les briquettes de charbon, nous avons introduit la fine de charbon de biomasse dans une bassine. Ensuite, nous y avons versé la solution de liant et le tout est mélangé et malaxé pour atteindre une certaine consistance. Le mélange obtenu est ensuite compacté à l'aide d'une presse mécanique motorisée. Les briquettes obtenues ont été séchées au soleil pendant cinq jours et puis, emballées dans des sacs plastiques pour éviter la reprise d'humidité.



Figure 2.6 : Rotor pesse motorisé



Figure 2.7 : Briquettes de charbon

2.5. Caractérisation physico-chimique des différents échantillons

Les analyses physico-chimiques faites sur nos échantillons portent sur des analyses immédiate et élémentaire. Elles sont réalisées aussi bien sur les biomasses brutes que sur les charbons et briquettes de charbons obtenus. Nous signalons que l'analyse immédiate a été déterminée expérimentalement au Laboratoire de Chimie et Physique des Matériaux (LCPM). Les deux autres analyses ont été déduites à partir de formules empiriques.

2.5.1. Analyse immédiate

❖ Détermination du taux d'humidité

L'humidité de l'échantillon représente la quantité d'eau contenue dans cet échantillon. Elle peut être calculée selon deux approches différentes. Sur une base humide, l'humidité est donnée comme étant le rapport entre la masse d'eau contenue dans l'échantillon à la masse totale de l'échantillon. Sur une base sèche, l'humidité est égale au quotient de la masse d'eau contenue dans l'échantillon sur la masse sèche de l'échantillon.

$$E (\%) = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \times 100 \quad (2.1)$$

m_1 : Masse du récipient vide servant à disposer l'échantillon, en grammes

m_2 : Masse du récipient avec l'échantillon avant passage à l'étuve, en grammes ;

m_3 : Masse du récipient avec l'échantillon après passage à l'étuve, en grammes ;

Une balance infrarouge de type KERN a été utilisée pour déterminer la teneur en humidité des échantillons, cette balance, dotée d'une puissance maximale de 400 W, peut fonctionner jusqu'à une température maximale de 200 °C avec une portée maximale en masse de 60 g. Elle enregistre des erreurs de 0,001 g à 0,01 % près. Cet appareil permet d'avoir une lecture directe de la valeur de teneur en humidité.

Le principe de détermination de la teneur en humidité reste le même que celui utilisant l'étuve mais ici la biomasse est chauffée par une source de rayonnement infrarouge. Pour cela, nous rappelons que préalablement les échantillons ont été broyés afin de passer à travers un tamis de 1 mm (pour les biomasses brutes) et à travers un tamis de 200 µm (pour les charbons et briquettes de charbon). Environ 1 g d'échantillon est mis sur la balance et pour chaque échantillon deux essais sont effectués. La figure 2.8 montre une coupe photographique de la balance infrarouge.



Figure 2.8 : Balance infrarouge

❖ Détermination de la teneur en cendres

Les cendres sont définies comme la masse résiduelle obtenue après combustion à l'air, dans des conditions contrôlées de temps et de température.

Les teneurs en cendres des biomasses brutes ainsi que celles des charbons et des briquettes de charbon sont déterminées respectivement selon les normes NF EN ISO 18134-3, NF EN ISO 18122 et NF EN 1860-2.

Les granulométries pour les biomasses brutes, les charbons et les briquettes de charbon restent les mêmes que celles utilisées pour la détermination de la teneur en humidité. Les essais sont réalisés dans un four à moufle de marque Nabertherm (voir figure 2.9).

Pour la biomasse, un creuset contenant l'échantillon est porté à la température de 550 °C sous une vitesse de chauffe 5 °C/min puis maintenue à cette température durant 2 heures au minimum. Pour le charbon ou la briquette de charbon, le creuset contenant l'échantillon est chauffé sous une même rampe de température pour atteindre la température de 710 °C. Ensuite, cette température est maintenue constante pendant au moins 2 heures afin d'assurer une combustion totale de l'échantillon. La teneur en cendres, C_e (%) de l'échantillon analysé, exprimée en pourcentage de masse et déterminée sur une base sèche, est donnée par l'équation suivante :

$$C_e(\%) = \frac{M_3 - M_1}{M_2 - M_1} \times 100 \frac{100}{100 - E} \quad (2.2)$$

➤ M_1 est la masse du creuset, en grammes (g) ;

- M_2 est la masse du creuset et de l'échantillon, en grammes (g) ;
- M_3 est la masse du creuset et des cendres, en grammes (g) ;
- E est le taux d'humidité dans l'échantillon en %.

La figure 2.9 montre une image du four à moufle.



Figure 2.9 : Balance infrarouge

❖ Détermination de la teneur en matières volatiles

La teneur en matières volatiles est déterminée par la perte de masse déduite de celle provoquée par l'humidité lorsque l'échantillon est chauffé sans contact avec l'air dans des conditions normalisées. Sa détermination a été faite en suivant les NF EN ISO 18134-3, NF EN ISO 18123 et NF EN 1860-2. La granulométrie pour la biomasse reste en dessous de 1 mm et pour le charbon ou la brique de charbon, elle reste inférieure à 200 μm . Un four à moufle a également été utilisé pour réaliser les essais. Au minimum 1 g de l'échantillon, mis dans un creuset avec couvercle, est placé dans un four à moufle à 900 °C pendant 7 minutes. L'échantillon est ensuite retiré et placé dans un dessiccateur pour son refroidissement.

Le pourcentage de matières volatiles est déterminé par la perte de masse de l'échantillon après avoir soustrait la masse due à l'humidité. Pour cela, une partie du même échantillon doit être utilisée pour la détermination de la teneur en humidité qui sera reportée dans la formule de calcul de la teneur en matières volatiles. La teneur en matières volatiles, MV (%), déterminée sur une base sèche et exprimée en pourcentage en masse, est donnée par l'équation suivante :

$$MV(\%) = \left[\frac{W_2 - W_3}{W_2 - W_1} \times 100 - E \right] \times \frac{100}{100 - E} \quad (2.3)$$

- W_1 est la masse du creuset à vide avec son couvercle, en grammes (g) ;
- W_2 est la masse du creuset à vide avec son couvercle et de celle l'échantillon, en grammes (g) ;
- W_3 est la masse du creuset à vide avec son couvercle et de celle de son contenu à la sortie du four, en grammes (g) ;

➤ E est le taux d'humidité dans l'échantillon en %.

❖ Détermination de la teneur en carbone fixe

Le carbone fixe est le carbone restant après élimination des matières volatiles et des cendres. La teneur en carbone fixe n'est pas déterminée expérimentalement. Elle est déduite par différence sur base sèche. Elle est donnée par la formule 2.4 ci-contre.

$$CF (\%) = 100 - (MV + Ce) \quad (2.4)$$

2.5.2. Analyse élémentaire à partir de l'analyse immédiate

Docteur Daya Ram Nhuchhen avait proposé en 2016 une relation de corrélation de la teneur en Carbone (C), de la teneur en hydrogène (H) et de la teneur en oxygène (O) à partir de l'analyse immédiate d'une biomasse brute ou d'un charbon végétal ou d'une brique de charbon [19]. Ces corrélations sont données comme suit :

$$C (\%) = -35,9972 + 1,3269 \times CF + 0,7698 \times MV + 0,3250 \times Ce \quad (2.5)$$

$$H (\%) = 55,3678 - 0,5319 \times CF - 0,4830 \times MV - 0,5600 \times Ce \quad (2.6)$$

$$O (\%) = 223,6805 - 2,2296 \times CF - 1,7226 \times MV - 2,2463 \times Ce \quad (2.7)$$

Où, CF= carbone fixe, % sur sec ; MV= matières volatiles, % sur sec ; Ce= Cendres, % sur sec et E=teneur en humidité.

Les équations (2.5) et (2.7) sont applicables dans le cas où :

$$11,25 \% \leq CF \leq 82,74 \%$$

$$13,3 \% \leq MV \leq 88,57 \%$$

$$0,08 \% \leq Ce \leq 47,62 \%$$

Connaissant la formule liant les constituants élémentaires de la biomasse et sa teneur en cendres, dans une base sèche, nous avons par la suite déduit la valeur de la teneur en azote en utilisant l'équation ci-dessous :

$$N(\%) = 100 - (C + H + O + Ce) \quad (2.8)$$

2.5.3. Détermination du pouvoir calorifique à l'aide de la formule de Vondracek

Le pouvoir calorifique (PC) d'un matériau exprime le contenu énergétique d'un matériau ou encore la quantité de chaleur libérée lors de la combustion. En termes d'énergie, il est exprimé par unité de masse ou de volume ; soit en MJ/kg pour les solides soit en MJ/L pour les liquides ou en MJ/Nm³ pour les gaz. On distingue deux sortes de pouvoirs calorifiques :

- Le pouvoir calorifique supérieur (PCS) qui représente la quantité d'énergie libérée lorsqu'on brûle de la biomasse en tenant compte de la chaleur latente de vaporisation de l'eau. Il peut être déterminé à l'aide d'une bombe calorimétrique ou bien par calcul.
- Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) se détermine à l'aide d'une bombe calorimétrique ou par calcul. Il exprime la quantité d'énergie libérée sans tenir compte de la vapeur d'eau. C'est la donnée la plus intéressante à considérer dans le cas de la production du bois-énergie.

Plusieurs formules de prédiction du PCS à partir de l'analyse élémentaire ou immédiate existent. Dans ce mémoire nous avons utilisé la formule de Vondracek pour prédire les valeurs de PCS de nos différents échantillons. Cette formule est définie comme suit :

$$\text{PCS (kcal/kg)} = 85 \times \text{C\%} + 270 \times \text{H\%} + 25 \times \text{S\%} - 27 \times \text{O\%} \quad (2.9)$$

Le PCI a été déduit connaissant la valeur du PCS à l'aide de la formule ci-contre.

$$\text{PCI} = \text{PCS} - 6 \times (9 \times \text{H} + \text{E}) \quad (2.10)$$

Où H est la teneur en hydrogène et E la teneur en humidité de l'échantillon.

2.6. Performances énergétiques et émissions de gaz des foyers

2.6.1 Choix des foyers

Cette partie de l'étude étant axée sur les performances des briquettes de charbons produits, nous avons jugé utile de travailler qu'avec deux foyers et de limiter les expériences dans le temps. De ce fait, nous nous sommes intéressés à un foyer domestique fréquemment rencontré dans les ménages et à un foyer amélioré ayant connu une large diffusion sur le territoire nationale et dont les performances sont connues. C'est à cet effet que nous avons choisi les foyers malgaches et "Jambar".

Ainsi, nous avons planifié les expériences comme suit : effectuer dans un premier temps les tests de performances des briquettes obtenues en utilisant les deux foyers choisis, puis faire un choix de chaque meilleur type des briquettes en fonction des paramètres de performances définis dans la section suivante et enfin effectuer les tests d'émissions de gaz des briquettes choisis dans un générateur d'air chaud, utilisé comme support de hotte d'extraction des fumées, situé sur la plateforme biocharbon/biogaz du laboratoire.

2.6.2. Tests de performances énergétiques

Pour étudier les performances des deux foyers étudiés, un test d'ébullition d'eau (TEE) a été effectué. Il s'agit d'une simulation simple et rapide des étapes de la cuisson des repas. Dans ce travail, l'eau est utilisée pour simuler les mélanges d'eau et d'aliments. Ainsi, nous avons opté de travailler sur le TEE à haute puissance qui consiste à porter l'eau le plus rapidement possible à l'ébullition (voir figure 2.10). Pour cela, une marmite a été remplie avec 5 litres d'eau.

Pour chaque test, une masse de 1 kg de briquettes de charbon est utilisée. Le lit de briquettes de charbon transféré dans le foyer est allumé à l'aide d'un chalumeau. Une fois le lit de briquettes a suffisamment pris de braises et rougeois, la marmite contenant l'eau est posée sur le foyer et les températures du lit de briquettes et de l'eau sont enregistrées toutes les 5 minutes.

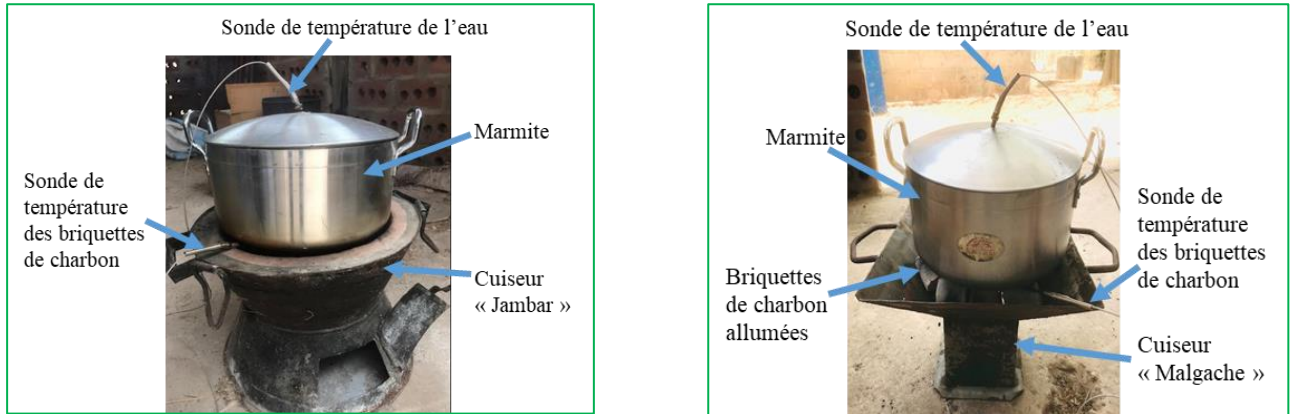


Figure 2.10 : Images illustrant les tests de performances énergétiques

A la suite de ce test, nous nous sommes intéressés sur cinq paramètres essentiellement utilisés pour caractériser les performances énergétiques des foyers. Ces paramètres sont :

- le rendement thermique ;
- la puissance de feu ;
- la puissance de cuisson ;
- la consommation spécifique de combustible ;
- et le temps d'ébullition spécifique.

❖ **Le rendement thermique**

Il exprime la capacité du foyer à restituer l'énergie contenue dans la masse de combustible consommé. C'est le rapport entre l'énergie utile fournie et l'énergie combustible utilisée. Il est exprimé comme suit :

$$\eta_{th} (\%) = \frac{m_{e,i} \times C_{p,e} (T_{e,f} - T_{e,i}) + (m_{e,i} - m_{e,f}) \times L_{vap}}{m \times PCI} \times 100 \quad (2.11)$$

$C_{p,e}$ est la capacité calorifique spécifique de l'eau : $4,18 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$;

$m_{e,i}$ est la masse initiale d'eau dans le récipient de cuisson, en kg ;

$m_{e,f}$ est la masse finale d'eau dans le récipient de cuisson, en kg ;

$T_{e,i}$ est la température initiale de l'eau dans le récipient de cuisson, en °C ;

$T_{e,f}$ est la température du point d'ébullition local ou la température la plus élevée de l'eau dans le récipient de cuisson, en °C ;

L_{vap} est la chaleur latente de la vaporisation d'eau au point d'ébullition local, en kJ/kg ;

m est la masse de combustible d'apport en kg et PCI est le pouvoir calorifique inférieur du combustible tel que brûlé en kJ/kg.

❖ La puissance de feu ou brute

La puissance de feu est définie comme l'énergie thermique libérée par la combustion du combustible pendant un temps donné. Elle est définie comme suit :

$$P_f(kW) = \frac{m_c \times PCI}{\Delta t} \quad (2.12)$$

Où m_c est la masse de combustible consommé en g, PCI le pouvoir calorifique inférieur en J/g prenant en compte la teneur en eau des briquettes et Δt est la durée sur laquelle est calculée cette puissance en s.

❖ La puissance de cuisson ou utile

C'est la puissance moyenne fournie au contenu d'un récipient de cuisson au cours d'une période donnée pendant le déroulement d'une séquence de cuisson ou d'une autre tâche. Elle est calculée comme suit :

$$P_c(kW) = \frac{m_{e,i} \times C_{p,e} \times (T_{e,f} - T_{e,i})(T_{e,f} - T_{e,i}) + (m_{e,i} - m_{e,f}) \times L_{vap}}{\Delta t} = \frac{Q_f}{\Delta t} \quad (2.13)$$

Où Q_f est l'énergie utile fournie en kJ et Δt est la durée de la phase d'essai en s.

❖ La consommation spécifique de combustible

Elle représente la quantité de combustibles nécessaire pour amener un litre ou un kilogramme d'eau de 0 °C à 100 °C. Elle est déterminée à l'aide de l'équation suivante.

$$C_s(kg_c/kg_e) = \frac{m_c \times (1 - E)}{m_{e,i}} \times \frac{100}{100 - T_{e,i}} \quad (2.14)$$

Où m_c est la masse de combustible consommé, E la teneur en humidité du combustible, $m_{e,i}$ la masse d'eau initiale et $T_{e,i}$ la température initiale de l'eau.

❖ Le temps d'ébullition spécifique

Ce paramètre de performance mesure le temps nécessaire pour faire passer un litre d'eau de 0 °C à 100 °C. C'est donc un facteur caractérisant la rapidité d'un cuiseur. Il est exprimé en min/kg_e et est déterminé à l'aide de la formule ci-dessous :

$$TES (min/kg_e) = \frac{TE}{m_{e,i}} \times \frac{100}{100 - T_{e,i}} \quad (2.15)$$

Avec TE le temps d'ébullition, $m_{e,i}$ la masse d'eau initiale et $T_{e,i}$ la température initiale de l'eau.

2.6.3. Choix des briquettes pour les tests d'émissions de gaz

Avant d'effectuer les tests d'émissions de gaz, un choix a été fait en se basant sur les paramètres de performances énergétiques définis précédemment.

Ainsi, pour chaque type de briquettes de charbon, il s'agit de choisir la briquette présentant les meilleures performances ; soit au total trois briquettes sur les six disponibles. Pour chaque paramètre de performance, un rang a été attribué à chaque briquette. Pour les paramètres tels que le rendement énergétique, la puissance de feu et la puissance de cuisson, le rang est attribué par ordre décroissant, par exemple pour le cas du rendement énergétique du foyer jambar, la plus grande valeur correspond à celui des briquettes de coques de cajou (Br_CC_10%) qui est de 23,71 % et occupe la première place tandis que les briquettes des coques d'arachide (Br_CA_10%) ont le plus faible rendement énergétique de 11,36 % et occupent ainsi la dernière place du classement. Cependant pour les paramètres tels que la consommation spécifique en combustible et le temps d'ébullition spécifique, le rang est attribué par ordre croissant, par exemple la consommation spécifique en combustible dans le foyer jambar la plus faible de 0,08 % correspond à la briquette des coques de cajou (Br_CC_10%), elle occupe le premier rang et la consommation la plus élevée de 0,16 % correspond à la briquette des coques d'arachide (Br_CA_10%) et elle est classée en dernière position. Par la suite, le calcul des moyennes des rangs de chaque briquette a permis d'effectuer un classement global et de choisir par conséquent les trois briquettes. Plus la moyenne est faible, meilleure est la performance du combustible.

2.6.4. Mesure des émissions de gaz et calcul des facteurs d'émissions

Pour mesurer les émissions de gaz lors de la combustion des différentes briquettes produites, il était nécessaire de disposer d'une hotte d'extraction pouvant extraire l'ensemble des fumées dégagées. Malheureusement, ce dispositif n'était mis à notre disposition. Il a fallu adapter le test en se servant du générateur d'air chaud comme hotte d'extraction. Ce dernier, tel que conçu, dispose d'une dépression permettant d'aspirer les fumées à travers une cheminée long de 576 cm avec un diamètre de 15 cm.

Une masse de 600 g de briquettes de charbon est utilisée pour chaque test. Le lit de briquettes de charbon disposé dans un foyer malgache situé dans la chambre de combustion du générateur d'air chaud (voir figure 2.11) est allumé à l'aide d'un chalumeau. Une fois le lit de briquettes suffisamment pris de braises, la porte de la chambre de combustion est fermée et la mesure des émissions de gaz est démarrée. Les gaz émis sont mesurés à l'aide de l'analyseur de gaz Rasi700 Bio connecté sur la cheminée du générateur d'air chaud. Avec un débit d'échantillonnage de 1 L/min, les

gaz ont été mesurés par intervalle de 1 minute. Les données de mesures ont été interfacées avec le logiciel MRU4win via Bluetooth dans le but de les centraliser directement dans la machine.

Nous rappelons que parmi les différents gaz polluants susceptibles d'être générés, nous avons choisi, en fonction de la gamme de mesure de l'analyseur, des capteurs disponibles et de la neutralité du bilan de la biomasse, d'étudier les émissions en CO et en NOx.



Figure 2.11 : Photos illustrant les tests d'émissions des briquettes de charbon

Pour le calcul des facteurs d'émissions, les données issues de l'analyseur Rasi700 Bio ont été exploitées et traitées. Nous nous sommes intéressés à la mesure des concentrations de CO et de NOx. La quantité émise et les facteurs d'émissions de chacun de ces deux constituants gazeux, ont été déterminés comme suit :

$$X (g) = \sum_{i=0}^n V_{f,i} \frac{X_{ppm,i} \times M_X}{10^6 \times V_{m,i}} \quad (2.16)$$

$$V_{f,i}(L) = \frac{1000}{3600} \times \Delta t \times Q \quad (2.17)$$

$$Q(m^3/h) = 3600 \times v \times S \quad (2.18)$$

$$X (g/kg) = \frac{X (g)}{M_c} \quad (2.19)$$

$$X (g/min) = \frac{X (g)}{t} \quad (2.20)$$

$$X (g/MJ) = \frac{X (g)}{M_c \times PCI} \quad (2.21)$$

Où X représente le constituant gazeux, $V_{f,i}$ est le volume des gaz collectés sur le pas de temps, $X_{ppm,i}$ est la concentration volumique en partie par million dans le gaz refroidi et sec par pas de temps, M_X la masse molaire (g/mol) du gaz, $V_{m,i}$ est le volume molaire des gaz émis qui sont assimilés à des gaz parfaits (22,4 l/mol aux conditions normales de températures et de pression, il est calculé à la température d'échantillonnage des fumées à chaque pas de temps),

Q le débit volumique d'extraction des gaz durant le pas de temps concerné, Δt est le pas de mesure en s (60 s dans notre cas) et n le nombre de points de mesure (autour de 131, soit 2 heures 10 minutes), M_c est la masse de combustible sec consommé en kg, t est la durée du test en minutes (environ 130 min), PCI le pouvoir calorifique inférieur du combustible en kg/MJ, v est la vitesse moyenne des fumées dans la cheminée et S la section de la cheminée.

Conclusion

Ce chapitre reposait sur la présentation des matières premières et appareils ainsi que des méthodes expérimentales appliquées. D'abord, un rappel contextuel sur le choix des matières premières ainsi que le choix des cuiseurs ont été fait. Par la suite, la technologie de carbonisation ainsi que le mode de production des briquettes de charbon ont été illustrées. A cela, s'ajoute la présentation des différentes caractérisations physico-chimiques détaillées dans ce chapitre. Ce chapitre a également abordé le test de performances des foyers domestiques en définissant différents paramètres permettant l'évaluation des performances des foyers à combustibles domestiques. La méthodologie de détermination des émissions de gaz vient enfin clore la dernière partie de ce chapitre.

CHAPITRE 3 : Résultats et discussions

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons tout d'abord commenter les résultats obtenus durant la phase de carbonisation des biomasses brutes. Ensuite, présenter les résultats de caractérisation des différentes briquettes de charbon et enfin nous aborderons l'analyse sur l'étude des performances et la mesure des émissions de polluants des foyers étudiés.

3.1 Variation de la température de carbonisation au sein du fût de carbonisation

Comme nous l'avons souligné dans le chapitre 2, il était question de suivre le front de déplacement de la carbonisation dans le fût de carbonisation lors de la carbonisation des trois biomasses étudiées. Nous rappelons que le front de déplacement de la carbonisation dans ce type de fût (voir figure 3.1) se fait du haut vers le bas.

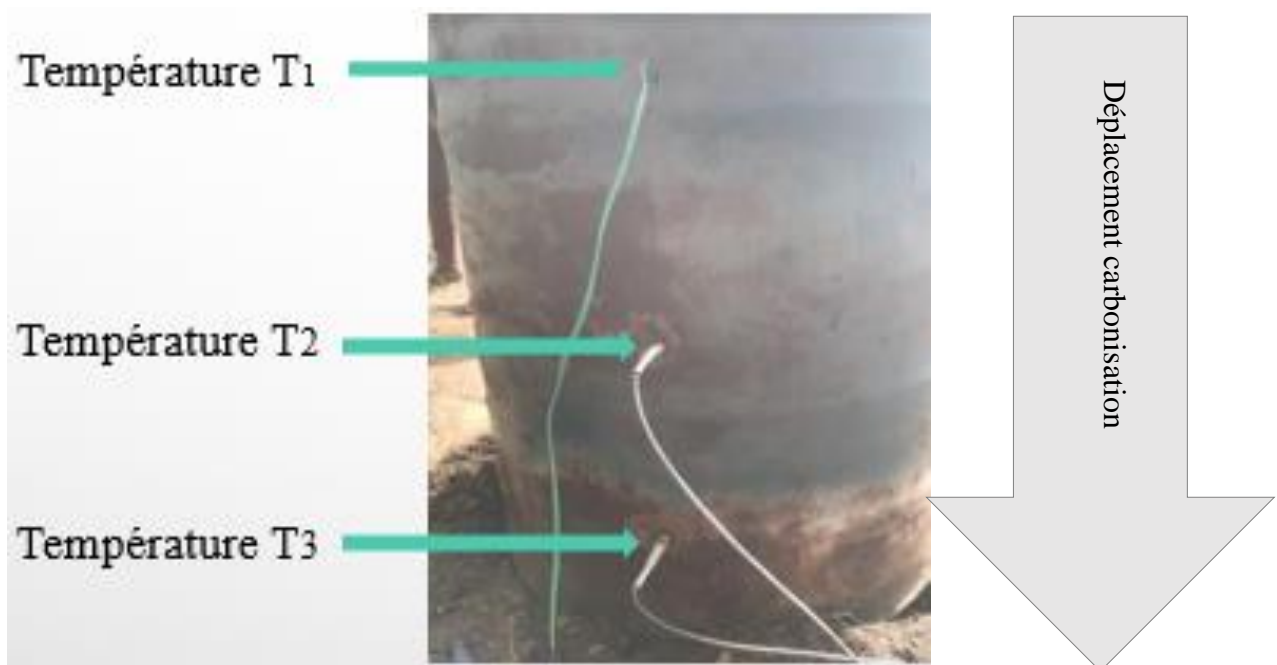


Figure 3.1 : Thermocouples de mesure de températures le long du fût de carbonisation

❖ Cas de la carbonisation des coques de cajou

La figure 3.2 montre une variation successive des différentes températures au sein du fût de carbonisation. D'abord, nous avons observé une variation de la moyenne des températures T_1 atteignant un maximum de 700 °C , puis celle T_2 avec une température maximale de 720 °C et enfin celle de T_3 atteignant une valeur de 800 °C . Le pic le plus haut de la température T_3 est certainement dû à la dévolatilisation une partie des goudrons formés. A la vue de ces variations, nous confirmons, que lors de la carbonisation de coques de cajou, le front de déplacement de la carbonisation se fait bel et bien du haut vers le bas.

Nous pouvons également souligner que la variation de la température au sein du fût de carbonisation se fait de façon plus ou moins homogène avec de légère variation de la température au sein du réacteur.

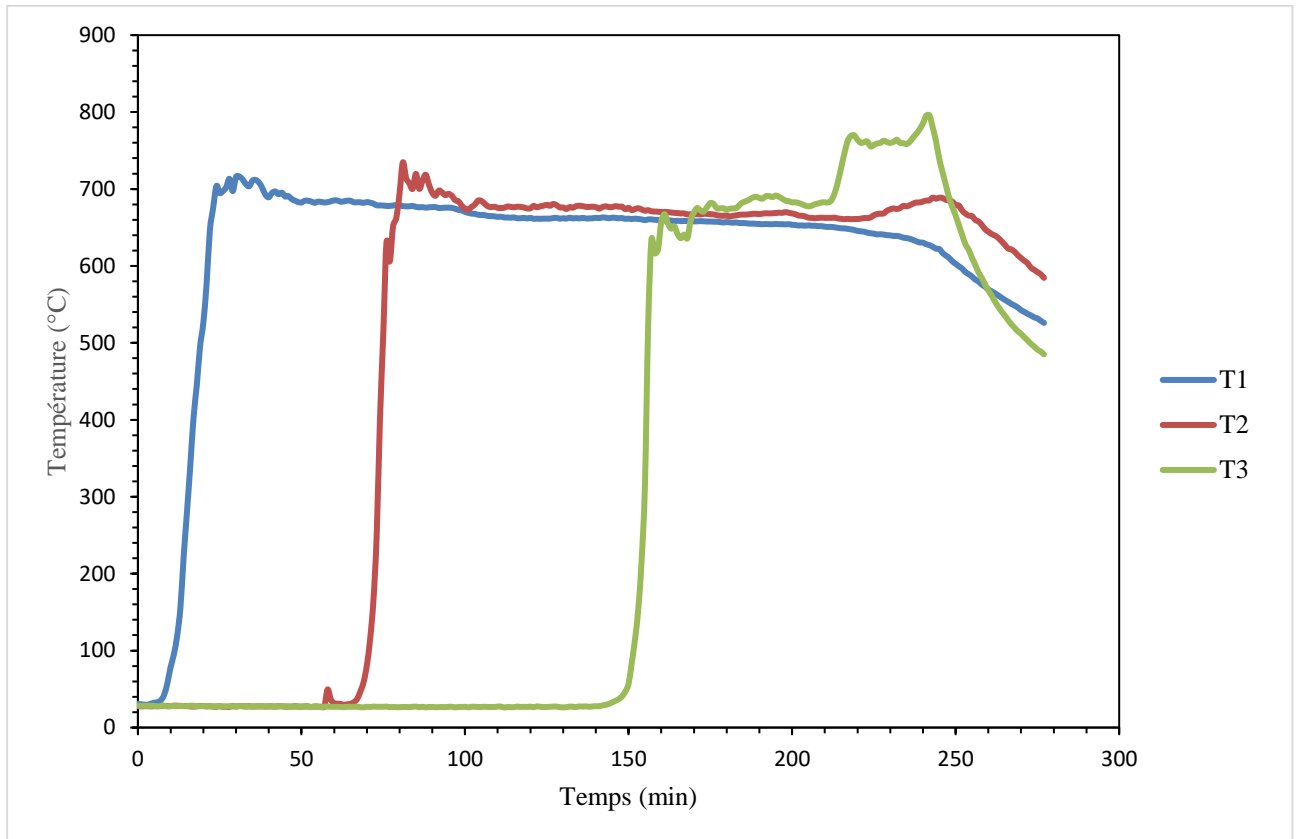


Figure 3.2 : Variations de la température de carbonisation des coques de cajou en fonction du temps

❖ Cas de la carbonisation des rafles de maïs

Comme le montre la figure 3.3 nous ne pouvons pas, dans le cas de la carbonisation des rafles de maïs, parler de variation successive des différentes températures. Nous pouvons plutôt parler de fluctuations très différentes de la température. Nous avons donc une carbonisation plutôt plus complexe comparée à celle des coques de cajou. Du fait de la taille de rafles de maïs et de leur disposition au sein du fût de carbonisation, des espacements entre les rafles de maïs se créent. Ces espacements peuvent favoriser des déplacements privilégiés du front de déplacement de la carbonisation. Cela pourrait être la raison de la variation aléatoire des différentes températures. Les températures maximales atteintes lors de la carbonisation des rafles de maïs varient entre 650 °C et jusqu'à environ 800 °C.

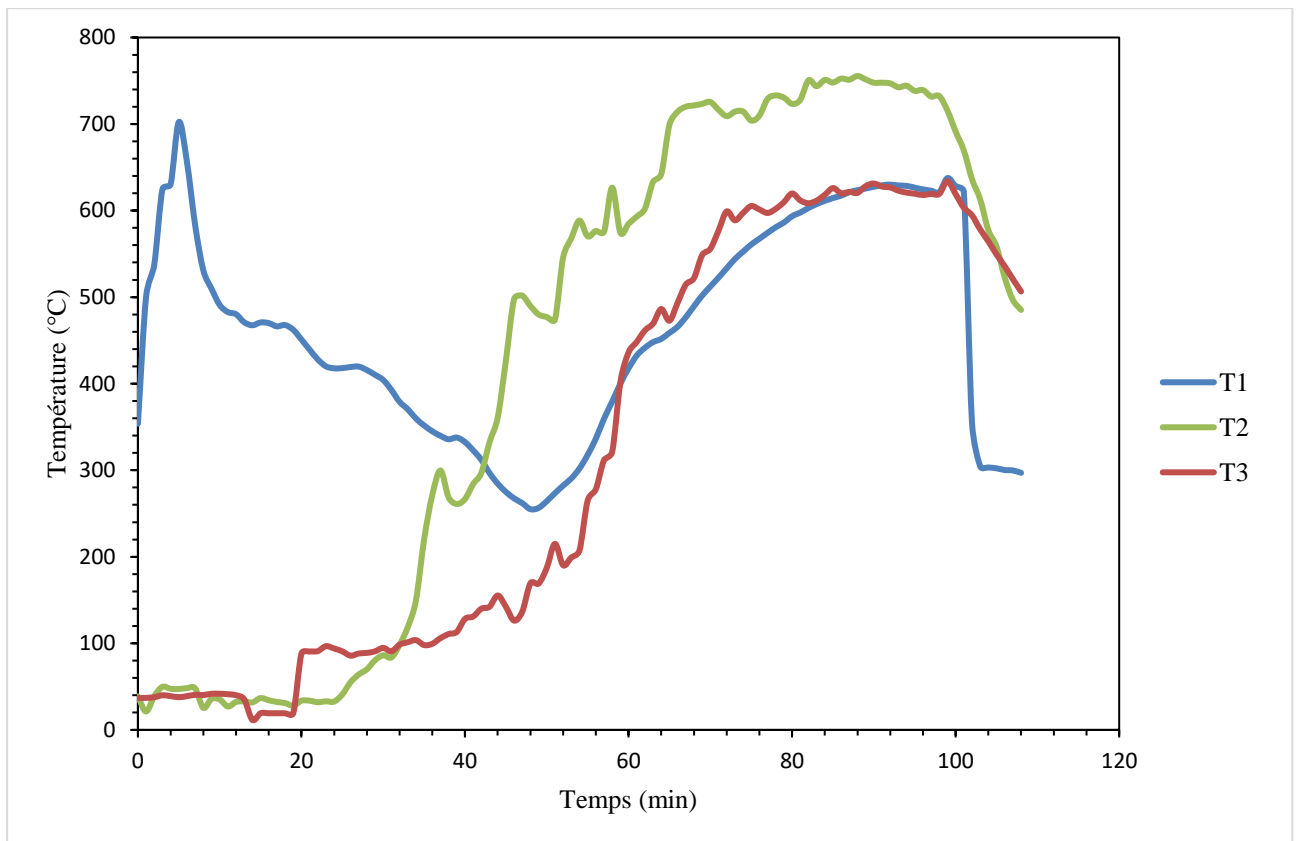


Figure 3.3 : Variations de la température de carbonisation des rafles de maïs en fonction du temps

❖ **Cas de la carbonisation des coques d’arachide**

Lors de la carbonisation des coques d’arachide, la sonde de température T₂ a été endommagée. Cela implique que les valeurs mesurées avec cette sonde sont erronées. Ce qu’il faut noter est que la température maximale au sein du fût de carbonisation fluctuait entre 480 °C et 885 °C.

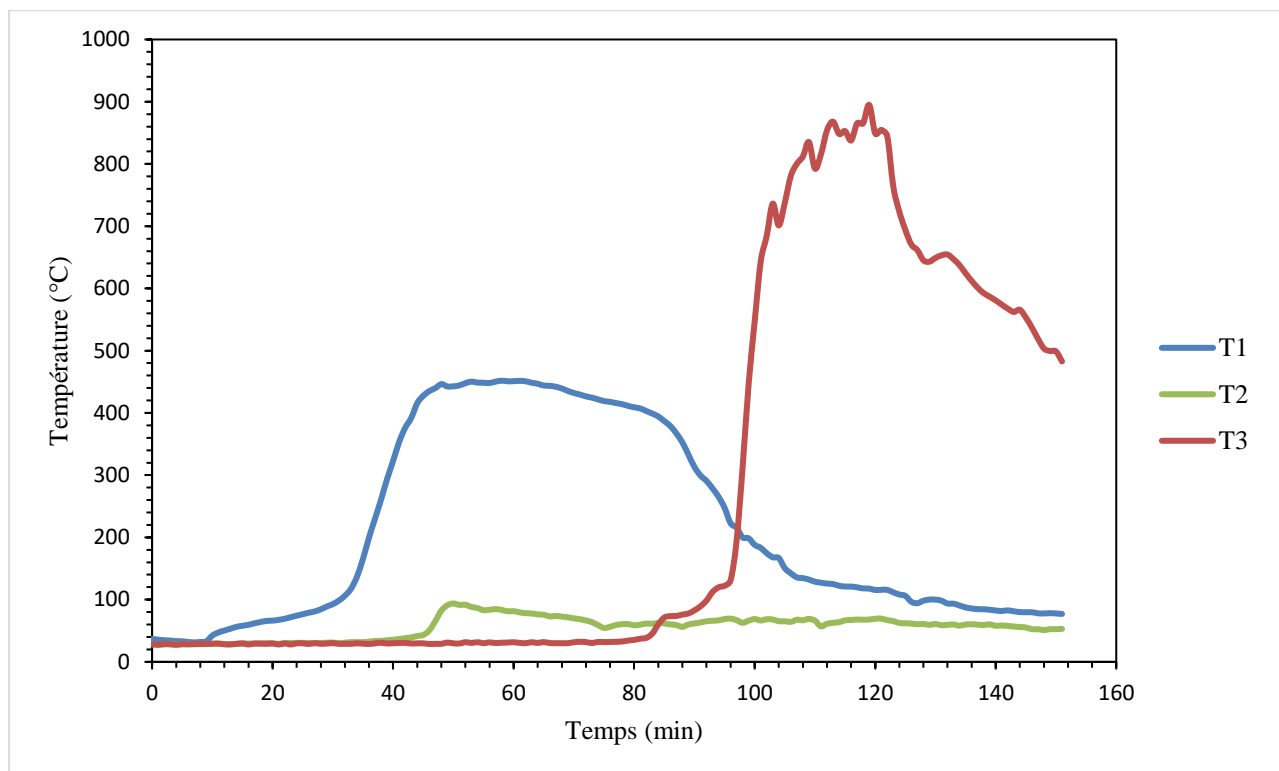


Figure 3.4 : Variations de la température de carbonisation des coques d'arachide en fonction du temps

3.2 Caractérisation des échantillons étudiés

Les résultats des analyses immédiate, élémentaire et celui de la valeur calorifique des différents échantillons étudiés sont consignés dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Résultats des analyses élémentaire et immédiate des biomasses

Échantillons	Analyse immédiate (%) ^s				Analyse élémentaire (%) ^s				Valeur calorifique (MJ/kg) ^s	
	E ^b	MV	Cendre	CF	C	H	N	O	PCS	PCI
Biomasses										
CA	8,52	72,85	3,49	23,66	52,61	5,64	0,66	37,60	20,82	19,33
CC	4,26	83,33	2,53	14,11	47,73	6,18	0,63	42,93	19,09	17,59
RM	6,37	78,55	2,20	19,25	50,73	5,96	0,61	40,51	20,17	18,67
Charbons de biomasse										
Ch_CA	5,15	15,86	25,80	58,34	62,01	2,23	1,63	8,33	23,61	22,97
Ch_CC	2,52	5,40	10,64	83,96	83,02	2,14	0,91	3,28	31,55	31,00
Ch_RM	4,82	27,15	7,62	65,22	73,93	3,29	0,80	14,36	28,36	27,45
Briquettes de charbons de biomasse										
Br_CA_9 %	9,66	11,32	18,67	70,01	71,68	2,21	1,29	6,15	27,26	26,52
Br_CC_9 %	10,13	19,62	15,50	64,88	70,23	2,70	1,16	10,41	26,82	25,96
Br_RM_9 %	9,72	9,99	19,18	70,84	71,92	2,13	1,32	5,46	27,33	26,61
Br_CA_10%	6,97	13,47	20,02	66,51	69,13	2,27	1,36	7,22	26,31	25,62
Br_CC_10%	7,86	18,13	15,54	66,33	71,02	2,63	1,16	9,65	27,11	26,31
Br_RM_10%	7,20	20,90	17,65	61,46	67,37	2,70	1,26	11,02	25,74	24,95

^s : exprimée en base sèche ; ^h : exprimée en base humide

Les résultats de caractérisation physico-chimiques mettent clairement en relief les différences des propriétés physico-chimiques entre les biomasses, les charbons issus de la carbonisation et aussi des briquettes de charbons produits. En ce qui concerne les biomasses brutes, les teneurs en cendres obtenues sont assez comparables entre elles. Nous notons également que la teneur en carbone fixe dans la biomasse brute est plus importante avec les coques d'arachides alors que la teneur en matières volatiles demeure plus élevée avec les coques de cajou. Pour ce qui est des charbons de biomasse, il est important de souligner la présence élevée de cendres dans le charbon de coques d'arachide (25,80 %). Tous les charbons de biomasse ainsi que les briquettes de charbons produits sont en majorité constitués de l'élément carbone. La teneur en carbone fixe dans ces échantillons (charbon de biomasse et briquettes de charbon) est supérieure à 60 %, teneur idéal pour un charbon de qualité tel que stipulé dans la norme NF EN 1860-2. Nous pouvons également remarquer la présence un peu élevée de la teneur en cendres dans certaines briquettes de charbon. Les briquettes de charbons produits présentent des valeurs de PCI variant de 24,95 à 26,61 MJ/kg. Ces valeurs sont comparables à celles obtenues par Himbane *et al.*[20].

Globalement ces résultats sont comparables à ceux trouvés dans la littérature ([21] [22] [23]).

3.3 Performances énergétiques

Les résultats expérimentaux obtenus sur la détermination des performances énergétiques des deux foyers étudiés sont regroupés dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2 : Performances énergétiques des briquettes de charbon avec les foyers "Jambar" et Malgache

		Pc	η_{th}	TES	CS	Pf
		(KW)	(%)	(min/kg_e)	(kg_c/kg_e)	(KW)
Foyer Jambar	Br_CA_9%	0,58	11,95	12,89	0,14	4,83
	Br_CC_9%	0,55	17,84	13,48	0,10	3,08
	Br_RM_9%	0,76	16,67	10,00	0,10	4,53
	Br_CA_10%	0,49	11,36	15,36	0,16	4,30
	Br_CC_10%	0,57	23,71	14,16	0,08	2,41
	Br_RM_10%	0,64	12,54	12,16	0,15	5,11
Foyer Malgache	Br_CA_9%	0,84	10,62	8,88	0,16	7,91
	Br_CC_9%	0,51	11,97	14,61	0,15	4,28
	Br_RM_9%	0,76	15,44	10,85	0,11	4,53
	Br_CA_10%	0,62	10,41	11,89	0,17	5,92
	Br_CC_10%	0,57	14,28	12,82	0,12	4,01
	Br_RM_10%	0,60	11,75	13,08	0,16	5,11

L'analyse du tableau 3.2 montre que le rendement énergétique varie entre 11,36 et 23,71 % (cas du foyer "Jambar") et entre 10,41 % et 15,44 % (cas du foyer malgache).

Le rendement énergétique diffère d'un combustible à un autre. En moyenne sur six essais, le rendement énergétique était de 15,68 % (cas du foyer "Jambar") et de 12,41 % (cas du foyer malgache). Nous remarquons que le rendement énergétique est plus élevé au niveau bas de la teneur en liant pour ceux qui est des briquettes de coques d'arachide et des briquettes de rafles de maïs. Autrement dit, les briquettes de charbon de coques d'arachide et de rafles de maïs avec une faible teneur en liant se consomment plus lentement que celles avec une teneur élevée en liant. La raison à cela pourrait être une teneur en matières volatiles plus élevée avec les briquettes à haute teneur en liant.

En revanche, pour les briquettes de charbon de coques de cajou, le rendement énergétique est plus élevé au niveau haut de teneur en liant. Cela confirme l'hypothèse de l'influence de la matière volatile sur le rendement énergétique car pour ces types de briquettes, nous avons des teneurs en matières volatiles (voir tableau 3.1) plus importantes au niveau haut de la teneur en liant.

La diminution du rendement énergétique avec l'augmentation de la teneur en liant a été également observée [18] lors de la combustion de briquettes de charbon de coques d'arachide dans un foyer "Jambar".

Concernant le temps d'ébullition spécifique (TES) nous avons remarqué de façon générale que les briquettes à 9 % de liant donnent le meilleur TES sauf pour les briquettes de charbon de coques de cajou avec le cuiseur malgache. Quel que soit le foyer utilisé, la meilleure performance est atteinte par les briquettes de charbon de rafles de maïs.

La consommation spécifique de combustibles varie de 0,08 à 0,16 kg_c/kg_e (cas du foyer "Jambar") et de 0,11 à 0,17 kg_c/kg_e (cas du cuiseur malgache). Dans le cas du foyer "Jambar", les briquettes de charbon de coques de cajou à haut teneur en liant présentent la meilleure performance tandis que les briquettes de rafles de maïs à bas teneur en liant ont la meilleure performance dans le cas du foyer malgache.

Dans le cas du foyer malgache, la puissance de feu la plus élevée a été observée avec les briquettes d'arachide à faible teneur en liant alors que les briquettes de rafles de maïs à haute teneur en liant fournissent la puissance de feu la plus élevée avec le foyer "Jambar".

3.4 Choix des briquettes

L'analyse des résultats précédents et ceux à venir va nous permettre de faire un choix de briquettes, les meilleures à être testées afin d'étudier celles qui donneront les émissions polluantes les moindres. Le tableau 3.3 résume les résultats du classement de différentes briquettes étudiées en tenant compte des paramètres de performances précédemment cités dans le chapitre 2.

Tableau 3.3 : Classification des briquettes de charbon

		Pc (kW)	η_{th} (%)	TES (min/kg_e)	CS (kg_c/kg_e)	P_f (kW)	Moyenne Rangs
Foyer Jambar	Br_CA_9%	3	5	3	4	2	3,4
	Br_CC_9%	5	2	4	2	5	3,6
	Br_RM_9%	1	3	1	3	3	2,2
	Br_CA_10%	6	6	6	6	4	5,6
	Br_CC_10%	4	1	5	1	6	3,4
	Br_RM_10%	2	4	2	5	1	2,8
Foyer Malgache	Br_CA_9%	1	5	1	5	1	2,6
	Br_CC_9%	6	4	6	3	5	4,8
	Br_RM_9%	2	1	2	1	4	2
	Br_CA_10%	4	6	3	6	2	4,2
	Br_CC_10%	5	2	5	2	6	4
	Br_RM_10%	3	3	4	4	3	3,4

Nous rappelons que le choix se fait par type de briquette et qu'une briquette de charbon présenterait la meilleure performance si sa moyenne globale de rangs est plus faible. L'analyse du tableau 3.3 montre que quel que soit le foyer utilisé, la briquette de charbon de rafles de maïs à 9 % en teneur en liant (Br_RM_9%) présente globalement la meilleure performance énergétique. Elle est donc choisie pour les tests d'émissions de gaz. Les briquettes à base de coques d'arachide à 9 % en teneur en liant (Br_CA_9%), présente le deuxième meilleur rendement d'où son choix. La briquette de coques de cajou à 10 % en teneur en liant (Br_CC_10%) a aussi été choisie parce qu'elle présente un meilleur rendement énergétique que celles ayant des teneurs en liant de 9 % de liant (Br_CC_9%).

3.5. Émissions de gaz des briquettes de charbons choisis

Les résultats issus de l'analyseur de gaz de combustion Rasi700 Bio par intervalle d'échantillonnage de 60 s ont été intégrés sur la durée du test afin de fournir les facteurs d'émission correspondants. Ces intégrations ont été rapportées au kg de briquettes de charbon, au mégajoule d'énergie de la briquette de charbon et à la durée totale du test.

3.5.1. Facteurs d'émissions de CO

Les résultats des facteurs d'émissions de monoxyde de carbone sont résumés dans le tableau 3.4. Afin de mieux appréhender l'analyse des émissions de CO, nous avons énumérés dans le tableau 3.5, les facteurs d'émissions et les niveaux de performances atteints par un foyer dans le cadre d'un scénario à faible ventilation tel qu'indiqué par la norme ISO/TR 19867-3 :2018.

Les résultats présentés sur les facteurs d'émission ont été obtenus uniquement, pour des raisons techniques opératoires, sur le foyer Malgache.

Tableau 3.4 : Émissions de CO des briquettes choisies

Échantillons	Facteurs d'émissions de CO		
	g/kg	g/min	g/MJ
Br_CA_9%	79,26	0,25	2,60
Br_RM_9%	127,35	0,40	4,19
Br_CC_10%	129,20	0,30	4,25

L'analyse du tableau 3.4 faite conjointement avec les résultats du tableau 3.5, montre qu'en terme de performance, le foyer malgache atteint le niveau de performance 1 pour ce qui est des taux d'émissions rapportés à l'unité de temps et ce, quel que soit la briquette de charbon étudié. Pour ce qui est du facteur d'émission de CO, rapporté au mégajoule d'énergie de la briquette de charbon, les niveaux de performances atteints par le foyer malgache sont 2 et 3. Il est donc clair que l'utilisation des briquettes de charbon dans un foyer malgache dans un endroit faiblement ventilé peut s'avérer dangereux pour la santé humaine puisque les émissions de CO sont relativement hautes.

Concernant les facteurs d'émissions de CO, rapportés au kg de briquettes de charbon, les briquettes de charbon Br_CA_9% présentent la plus faible valeur du facteur d'émission (79,26 g/kg). Dans la littérature, des facteurs d'émissions variant de 34,2 à 208,35 g/kg de foyers à charbon de bois et briquettes de charbon ont été rapportés ([25],[26]). Dans le cas de cette étude, les facteurs d'émissions sont bel et bien dans cette gamme d'émissions.

Tableau 3.5 : Facteurs d'émissions de CO pour le scénario à faible ventilation

Niveaux	mg/min	g/MJ
5	≤ 60	≤ 1,4
4	≤ 95	≤ 2,2
3	≤ 160	≤ 3,7
2	≤ 240	≤ 5,5
1	≤ 430	≤ 9,9
0	> 430	> 9

3.5.2. Variation instantanée des émissions de CO

Dans cette partie, nous avons voulu voir le nombre de fois où les émissions de CO des différentes briquettes étudiées ont dépassé les valeurs limites fixés par l'OMS. Autrement dit les valeurs cibles de 0,59 g/min pour les foyers avec conduits de fumées ou ventilés (Limite foyer ACF ou ventilé) et 0,16 g/min pour les foyers sans conduit de fumées ou non ventilés (Limite foyer SCF ou non ventilé).

❖ Cas de la briquette Br_CA_9%

La figure 3.5 montre l'évolution instantanée par intervalle d'une (01) minute des émissions de CO des briquettes de charbon de coques d'arachide au cours de la phase de combustion.

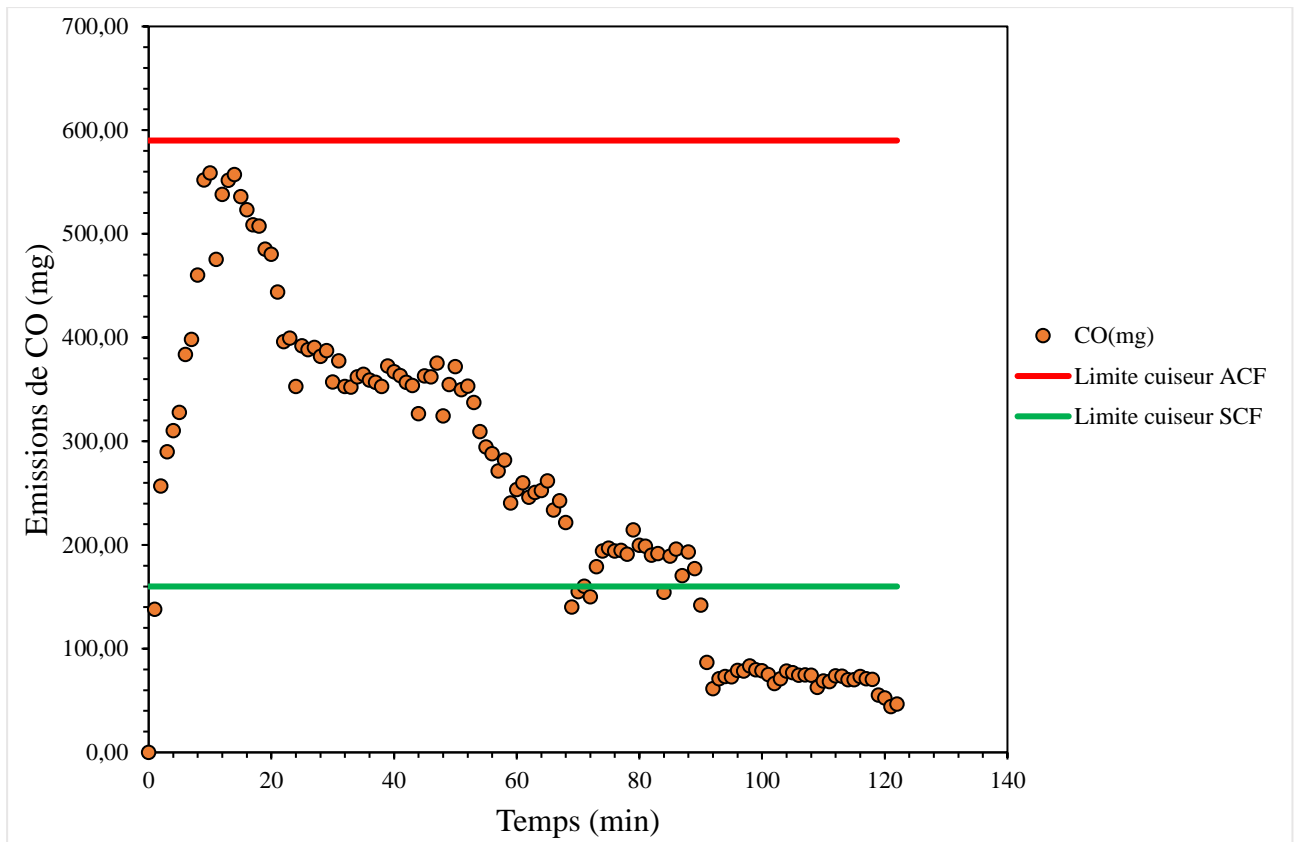


Figure 3.5 : Variation des émissions de CO durant la phase de combustion des briquettes de charbon de coques d'arachide

La figure 3.5 montre clairement que durant la combustion des briquettes de charbon de coques d'arachide (**Br_CA_9%**), les émissions de CO n'atteignent pas la valeur cible de 0,59 g/min (Limite foyer ACF). En revanche, sur un grand intervalle de durée de l'essai, la valeur cible de 0,16 g/min (Limite foyer SCF) a été dépassée. Cette valeur a été dépassée 84 fois sur 122 mesures.

❖ Cas de la briquette Br_RM_9%

La figure 3.6 montre l'enregistrement en temps réel des émissions de CO provenant de la combustion des briquettes de charbon de rafles de maïs dans un foyer malgache. Ces tendances d'émissions de CO ont été aussi comparées aux valeurs limites de la directive de l'OMS.

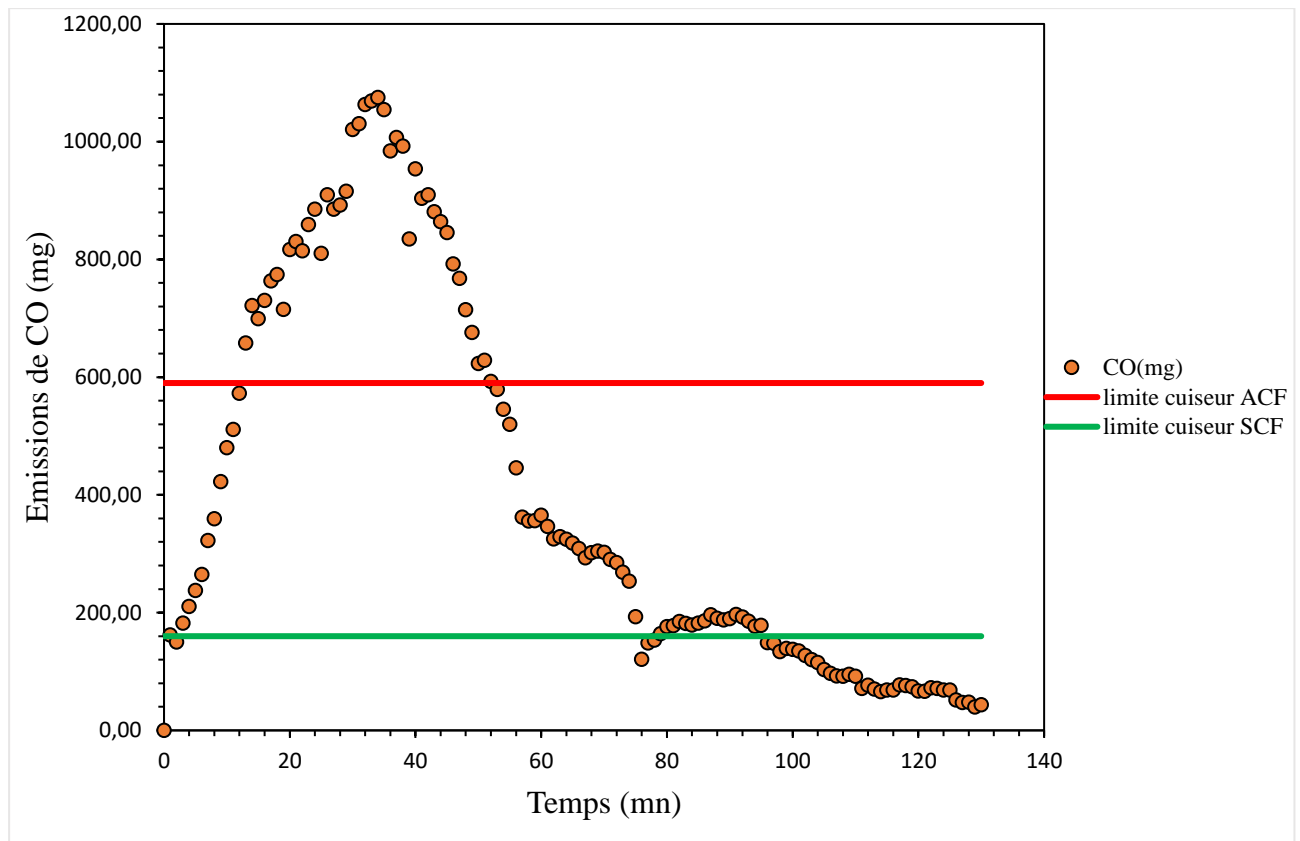


Figure 3.6 : Variation des émissions de CO durant la phase de combustion des briquettes de charbon de rafles de maïs

Contrairement à la combustion des briquettes de charbon de coque d'arachide, Br_CA_9%, la combustion des briquettes de charbon de rafles de maïs a émis des émissions de CO dépassant la valeur limite de 0,59 g/min. Cette valeur a été dépassée 40 fois sur 130 mesures au cours de l'essai. La valeur seuil de 0,16 g/min a également été dépassée de 90 fois sur 130 mesures.

❖ **Cas de la briquette Br_CC_10%**

La figure 3.7 montre également l'enregistrement en temps réel des émissions de CO provenant de la combustion des briquettes de charbon de coques de cajou dans un foyer malgache. Ces tendances d'émissions de CO ont été aussi comparées aux valeurs limites de la directive de l'OMS.

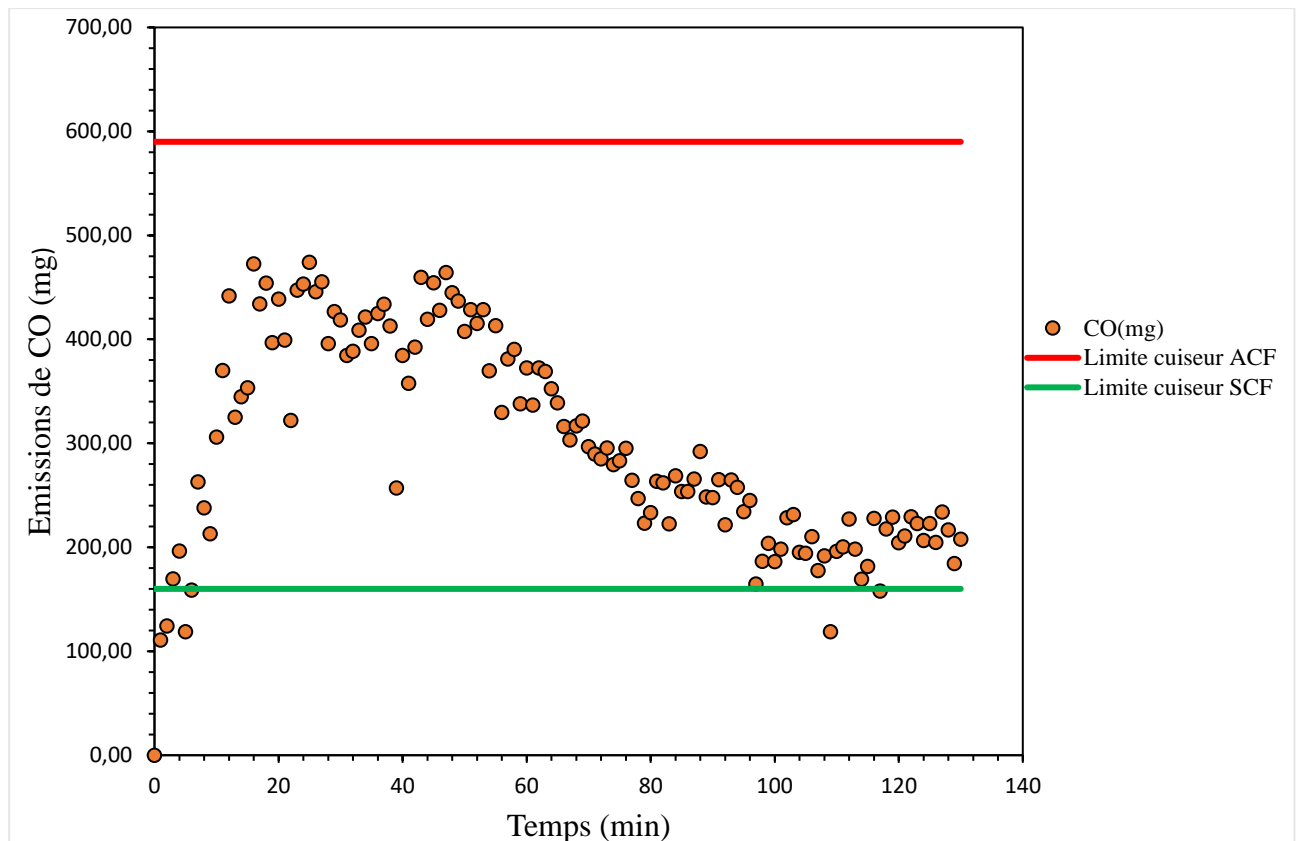


Figure 3.7 : Variation des émissions de CO durant la phase de combustion des briquettes de charbon de coques de cajou

Comme pour les briquettes de charbon de coques d'arachide, les émissions de CO des briquettes de charbon de coques de cajou sont restées en dessous de la valeur seuil de 0,59 g/min (ACF). Cependant, les émissions de CO sont restées dans la quasi-totalité du test au-dessus de la valeur seuil de 0,16 g/min (ASF). Cette valeur a été dépassée 124 fois sur 130 mesures au cours de l'essai.

Globalement, pour tous les essais effectués, les émissions de CO, quel que soit la briquette étudiée, n'ont pas dépassé la valeur seuil de 0,59 g/min en revanche le seuil de 0,16 g/min a été largement dépassé (voir figure 3.8).

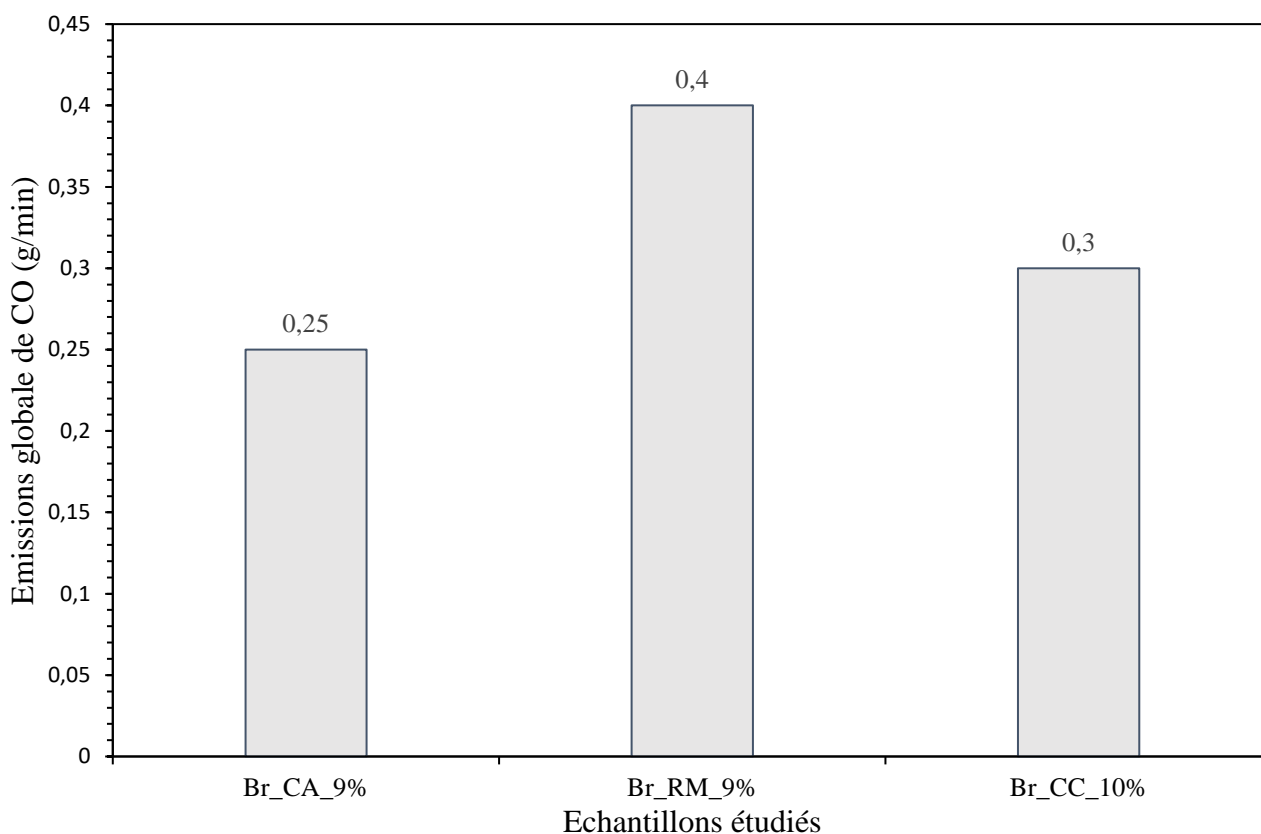


Figure 3.8 : Émissions totales de CO durant la phase de combustion des différentes briquettes de charbons étudiées

3.5.3. Facteurs d'émissions de NOx

Dans le tableau 3.6, nous avons consigné les résultats portant sur la détermination des facteurs d'émissions de NOx.

Tableau 3.6 : Résultats de détermination des facteurs d'émissions NOx.

Échantillons	Facteurs d'émissions de NOx		
	mg/kg	mg/min	g/MJ
Br_CA_9%	1,24	3,98	0,04
Br_RM_9%	3,09	9,79	0,10
Br_CC_10%	2,28	5,32	0,08

L'analyse du tableau 3.6 montre clairement que quel soit la base dans laquelle les facteurs d'émissions de NOx sont rapportés, la briquette de charbon Br_RM_9% demeure la plus polluante et la moins polluante est celle Br_CA_9%. Il faut rappeler que la formation de NOx est en partie due à la teneur en azote dans le combustible mais aussi à la température de combustion. L'analyse élémentaire avait bien montré que la teneur en azote de la briquette Br_RM_9% (1,32 %) était supérieure à celle des autres (1,29 % pour Br_CA_9% et 1,16 % pour Br_CC_10%).

Cependant, entre la briquette à coques d'arachide et celle à coques de cajou, le facteur d'émission de NOx avec Br_CC_10% est plus élevé que celui des Br_CA_9% cela pourrait être due à une température plus élevée lors de la combustion de la briquette Br_CC_10% se justifiant par un taux élevé de liant.

Les facteurs d'émissions de ces briquettes, rapportés au kilogramme de briquettes, restent de loin inférieurs à ceux trouvés par Bhattacharya, et al [26]. Sur différents cuiseurs utilisant du charbon de bois, leurs émissions ont été évaluées entre 29 et 510 mg/kg. Mitchell, et al [27] ont aussi trouvé dans leur travail, un facteur d'émission de NOx supérieure à 20 mg/kg en utilisant du charbon de bois.

3.5.4. Variation instantanée des émissions de NOx

Sur la figure 3.9, les variations instantanées des émissions de NOx, par intervalle d'une (01) minute, des différentes briquettes choisies, sont représentées.

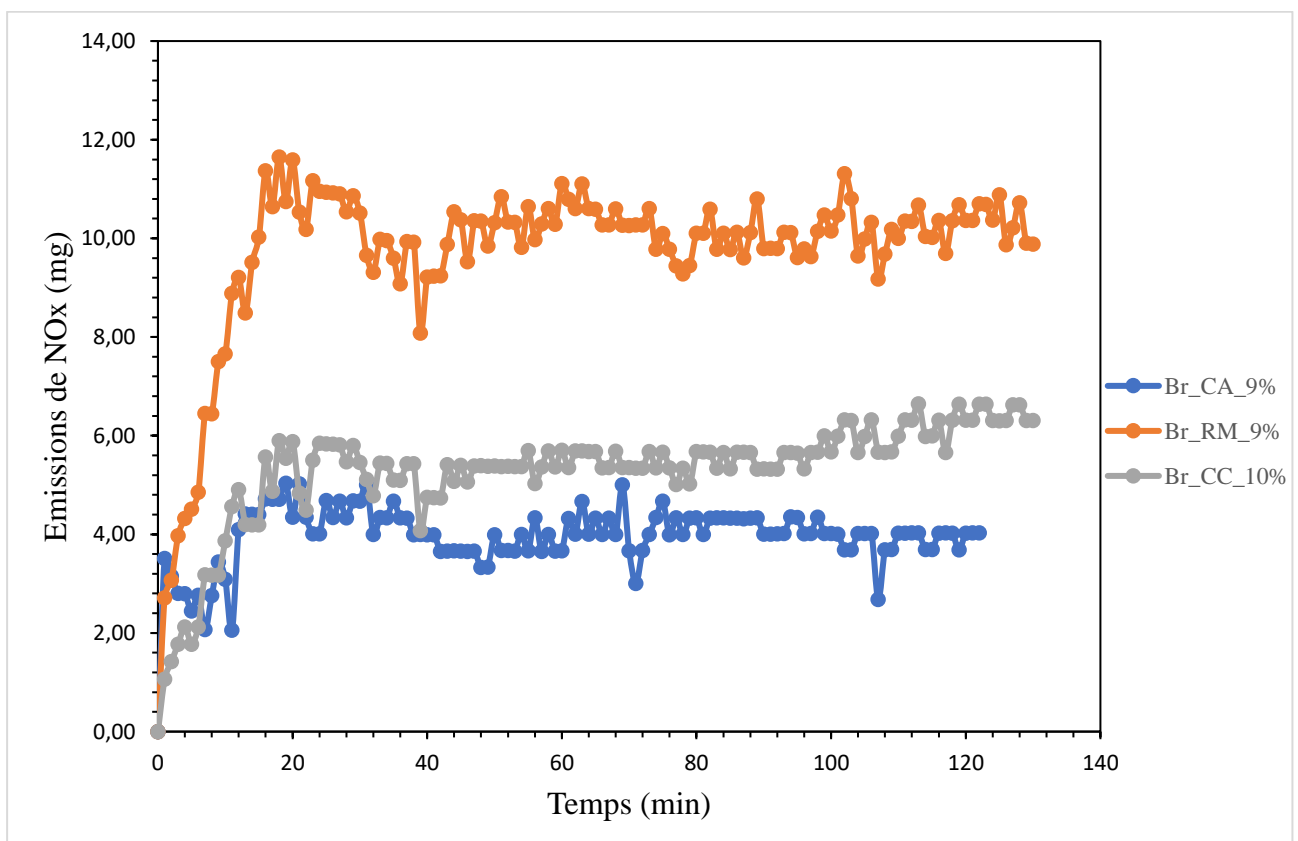


Figure 3.9 : Variation des émissions de NOx durant la phase de combustion des briquettes choisies
L'analyse de la figure 3.9 montre qu'après l'allumage des briquettes, les concentrations de NOx ont rapidement augmenté dans les 20 premières minutes, atteignant ainsi des concentrations maximales de 5,03 mg pour Br_CA_9%, 11,65 mg pour Br_RM_9% et 5,90 mg pour Br_CC_10%.

Cette rapide augmentation de la concentration de NO_x serait certainement due à l'augmentation de la température de la charge de briquettes au début de la phase de combustion, favorisant ainsi la réaction entre l'azote contenu dans les briquettes et l'oxygène de l'air. Sur le reste de l'essai, les concentrations de NO_x de toutes les briquettes sont restées quasi-constantes et fluctuent autour de 2,68 et 5,02 mg pour Br_CA_9% ; entre 8,08 et 11,31 pour Br_RM_9% et entre 4,07 et 6,65 mg pour Br_CC_10%. Ces différentes tendances ont été également observées par Chen, et al. [28] ; qui expliquent que la formation de NO_x provient principalement de la réaction entre l'azote du combustible et l'oxygène.

Conclusion

La combustion de trois (03) types de briquettes de charbons issus de résidus agricoles dans un foyer Malgache a permis de mettre en avant des résultats de caractérisation des émissions de CO d'une part, et de NO_x d'autre part.

Les concentrations de ces différents polluants émis (CO et NO_x) lors de la combustion de nos briquettes choisies et ce dans un foyer malgache varient d'une briquette à une autre dans des proportions allant de 79,26 à 129,20 g/kg pour le CO et de 1,24 à 3,09 mg/kg pour le NO_x. Ces différents écarts seraient évalués à la différence de caractéristiques des briquettes. Il est important aussi à noter que les émissions de CO pour toutes les 03 briquettes étaient supérieures à 0,16 g/min ; valeur limite fixée selon les lignes directives de l'OMS.

Comme première approche, nous avons carbonisé trois biomasses d'origine agricole et forestière (coques d'arachide, rafles de maïs et coques de cajou) dans un fût métallique et suivi le front de déplacement de la chaleur par la mesure de la température tout au long du fût. Un des résultats importants de cette recherche est que le front de déplacement de la chaleur se fait de façon homogène dans le cas de la carbonisation des coques de noix de cajou et de façon complexe pour les rafles de maïs.

Dans une deuxième approche, nous avons produit 06 lots de briquettes de charbons différents et ensuite procédé à leurs caractérisations physico-chimiques. Les résultats obtenus sur les tests d'ébullition d'eau à la fois dans un foyer malgache et un foyer "Jambar" ont permis de déterminer les performances énergétiques des briquettes de charbon.

Ces différents résultats nous ont permis de faire le choix des trois (03) briquettes parmi les 06 qui, présentent les meilleures performances énergétiques.

CONCLUSION GENERALE ET PRESPECTIVES

Les résultats obtenus au cours de ce mémoire ont permis de démontrer la possibilité de produire des briquettes de charbon de haute qualité à partir notamment de coques de cajou, de rafles de maïs et de coques d'arachide pour les besoins de cuisson domestique au sein des populations rurales. Ce présent travail a pour objectif principal de mesurer les performances énergétiques et les émissions de gaz des foyers de cuisson utilisant des briquettes de charbon de biomasse. Après une revue de la littérature à la fois sur les biomasses disponibles et les plus énergétiques, dans les régions sud du Sénégal, nous avons présenté les deux cuiseurs sur lesquels des tests de performances seront réalisés, le générateur d'air chaud permettant la mesure des émissions polluantes, le programme de mesure de température sur Arduino utilisé et le petit matériel (thermomètre digital et ...) pour les tests d'ébullition de l'eau. Lors de cette étude, nous avons eu également à utiliser un analyseur de gaz RASI 700 Bio pour mesurer les émissions de gaz générées lors de la combustion des trois biomasses (briquettes de coques d'arachide, briquettes de coques de cajou et briquettes de rafles de maïs). Les paramètres de performances énergétiques mesurées dans ce travail étaient la puissance de consommation, le rendement thermique, le temps d'ébullition spécifique, la consommation spécifique et la puissance de feu ; ces paramètres nous ont permis ainsi de connaître les briquettes les plus énergétiques et ensuite d'en mesurer leurs émissions de gaz dans le cas du foyer malgache. Pour les émissions de polluants, le monoxyde de carbone (CO) et les oxydes d'azote NOx sont les principaux gaz mesurés. Une étude explicative des tendances observées sur ces gaz polluants a été effectuée.

A l'issue de ces expériences, trois conclusions essentielles ont été tirées :

- Quel que soit le foyer utilisé sur tous les trois combustibles, la briquette de charbon de rafles de maïs à 9 % en teneur en liant (Br_RM_9 %) présente globalement la meilleure performance énergétique, suivie de la briquette à base de coques d'arachide à 9 % en teneur en liant (Br_CA_9 %) et enfin la briquette de coques de cajou à 10 % de teneur en liant (Br_CC_10 %).
- Le foyer jambar demeure le meilleur comparé au foyer malgache en termes de rendement énergétique. Pour le foyer « jambar », le rendement énergétique varie de 11,36 % à 23,71 % et pour le foyer malgache, il varie de 10,41 % à 15,44 %. En moyenne sur les six essais effectués, nous notons que le rendement énergétique du foyer « jambar » était de 15,68 % alors que celui du foyer malgache de 12,41 %.
- En général, pour tous les essais effectués, les émissions de CO, quel que soit la briquette étudiée, n'ont pas dépassé la valeur limite de 0,59 g/min ; cependant, le seuil de 0,16 g/min a été largement dépassé.

Les analyses du tableau 3.6 nous montre clairement que quel que soit la base dans laquelle les facteurs d'émissions de NOx sont rapportés, la briquette de charbon de rafles de maïs, Br_RM_9% demeure la plus polluante et celle de coques de cajou, Br_CA_9%, la moins polluante.

En perspective, vu l'apport et le rendement énergétique générés par les rafles de maïs, il serait intéressant d'effectuer d'autres études sur cette biomasse en variant le type de liant afin de l'utiliser de manière beaucoup plus efficiente (bilan énergétique et rendement thermique) dans les foyers domestiques. Il serait aussi intéressant d'effectuer des mesures d'émissions sur les rafles de maïs par variation de la teneur en liant mais aussi d'étudier les possibilités d'utiliser les biochars produits pour l'amendement des sols.

Références bibliographiques

- [1] « rapport-Ndeye-Magatte_Seck_Lgndiaye.docx 2019 ».
- [2] P. B. Himbane, « Elaboration et caractérisation des briquettes de charbon végétal pour la haute performance énergétique et environnementale des cuiseurs améliorés », Thèse de doctorat, Université Assane Seck de Ziguinchor, Sénégal, 2020.
- [3] « Analyse de la politique d'efficacité énergétique du Sénégal », p. 22, mai 2018.
- [4] J.-P. Jorez, « Guide technique de l'économie du bois de feu: l'expérience du Sahel », Lund University (Sweden) Lund Centre for Habitat Studies, 1991. Consulté le: 2 septembre 2021. [En ligne]. Disponible sur:
https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Guide+technique+de+l%27economie+du+bois+de+feu%3A+l%27experience+du+Sahel&author=Jorez%2C+J.-P.&publication_year=1991
- [5] « GUIDE_DE_FABRICATION_DU_FOYER_AMELIORE_JAMBAR.pdf ».
- [6] « fr-036-04_02.pdf ».
- [7] A. Ndécky, S. Gamache, F. I. Barro, et I. Youm, « Application of Statistical Design of Experiments to Performance Analysis of Charcoal Cooks Stoves », *Int. J. Clean Coal Energy*, vol. 7, n° 3, Art. n° 3, août 2018, doi: 10.4236/ijcce.2018.73003.
- [8] Lewtas, « Air pollution combustion emissions: Characterization of causative agents and mechanisms associated with cancer, reproductive, and cardiovascular effects - ScienceDirect », 2007.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1383574207000312> (consulté le 29 novembre 2021).
- [9] Löndahl et al, « Deposition of Biomass Combustion Aerosol Particles in the Human Respiratory Tract: Inhalation Toxicology: Vol 20, No 10 », 2008.
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/08958370802087124> (consulté le 29 novembre 2021).
- [10] World Health Organization, « Increasing access to clean cooking through subsidies », World Health Organization, Geneva, 2022. Consulté le: 29 juin 2022. [En ligne]. Disponible sur:
<https://apps.who.int/iris/handle/10665/357177>
- [11] K. L. Bignal, S. Langridge, et J. L. Zhou, « Release of polycyclic aromatic hydrocarbons, carbon monoxide and particulate matter from biomass combustion in a wood-fired boiler under varying boiler conditions », *Atmos. Environ.*, vol. 42, n° 39, p. 8863-8871, déc. 2008, doi: 10.1016/j.atmosenv.2008.09.013.
- [12] K. Lask *et al.*, « Performance comparison of charcoal cookstoves for Haiti: Laboratory testing with Water Boiling and Controlled Cooking Tests », *Energy Sustain. Dev.*, vol. 26, p. 79-86, juin 2015, doi: 10.1016/j.esd.2015.02.002.
- [13] K. Booker *et al.*, « Performance of Charcoal Cookstoves for Haiti Part 1: Results from the Water Boiling Test », LBNL-5021E, 1050448, juin 2011. doi: 10.2172/1050448.
- [14] J. Jetter *et al.*, « Pollutant Emissions and Energy Efficiency under Controlled Conditions for Household Biomass Cookstoves and Implications for Metrics Useful in Setting International Test Standards », *Environ. Sci. Technol.*, vol. 46, n° 19, p. 10827-10834, oct. 2012, doi: 10.1021/es301693f.
- [15] M. Johnson, R. Edwards, C. Alatorre Frenk, et O. Masera, « In-field greenhouse gas emissions from cookstoves in rural Mexican households », *Atmos. Environ.*, vol. 42, n° 6, p. 1206-1222, févr. 2008, doi: 10.1016/j.atmosenv.2007.10.034.
- [16] K. R. Smith *et al.*, « Monitoring and evaluation of improved biomass cookstove programs for indoor air quality and stove performance: conclusions from the Household Energy and Health Project », *Energy Sustain. Dev.*, vol. 11, n° 2, p. 5-18, juin 2007, doi: 10.1016/S0973-0826(08)60396-8.

- [17] K. Booker *et al.*, « Performance of Charcoal Cookstoves for Haiti Part 1: Results from the Water Boiling Test », LBNL-5021E, 1050448, juin 2011. doi: 10.2172/1050448.
- [18] G. A. Diédhiou, « Instrumentation et mesures de température, des émissions de CO et de particules de matière (PM) dans un générateur d'air chaud à biomasse. », 2021, Consulté le: 16 juillet 2022. [En ligne]. Disponible sur: <http://rivieresdusud.uasz.sn/xmlui/handle/123456789/1287>
- [19] D. R. Nhuchhen, « Prediction of carbon, hydrogen, and oxygen compositions of raw and torrefied biomass using proximate analysis », *Fuel*, vol. 180, p. 348-356, sept. 2016, doi: 10.1016/j.fuel.2016.04.058.
- [20] P. B. Himbane *et al.*, « Influence of binder rate, pyrolysis temperature and volume of biochar briquettes on CO and PM2.5 emission factors and thermal efficiency », *Energy Sustain. Dev.*, vol. 68, p. 525-531, juin 2022, doi: 10.1016/j.esd.2022.04.012.
- [21] A. Diedhiou, L.-G. Ndiaye, A. Bensakhria, et O. Sock, « Thermochemical conversion of cashew nut shells, palm nut shells and peanut shells char with CO2 and/or steam to aliment a clay brick firing unit », *Renew. Energy*, vol. 142, p. 581-590, nov. 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.04.129.
- [22] A. Demirba, « Calculation of higher heating values of biomass fuels », p. 4.
- [23] Y. Lu, L. Guo, C. Ji, X. Zhang, X. Hao, et Q. Yan, « Hydrogen production by biomass gasification in supercritical water: A parametric study », *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 31, n° 7, p. 822-831, juin 2006, doi: 10.1016/j.ijhydene.2005.08.011.
- [24] « Influence of binder rate, pyrolysis temperature and volume of biochar briquettes on CO and PM2.5 emission factors and thermal efficiency - ScienceDirect ». <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S097308262200059X> (consulté le 1 juillet 2022).
- [25] « Influence of binder rate, pyrolysis temperature and volume of biochar briquettes on CO and PM2.5 emission factors and thermal efficiency - ScienceDirect ». <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S097308262200059X?via%3Dihub> (consulté le 1 juillet 2022).
- [26] S. C. Bhattacharya, D. O. Albina, et P. A. Salam, « Emission factors of wood and charcoal-wood cookstoves », *Biomass Bioenergy*, p. 17, 2002.
- [27] E. J. S. Mitchell *et al.*, « Pollutant Emissions from Improved Cookstoves of the Type Used in Sub-Saharan Africa », *Combust. Sci. Technol.*, vol. 192, n° 8, p. 1582-1602, août 2020, doi: 10.1080/00102202.2019.1614922.
- [28] X. Chen, J. Xie, S. Mei, et F. He, « NOx and SO2 Emissions during Co-Combustion of RDF and Anthracite in the Environment of Precalciner », *Energies*, vol. 11, n° 2, p. 337, févr. 2018, doi: 10.3390/en11020337.

ANNEXES

Tableau A.1 : Données brutes des tests d'ébullition sur le cuiseur "Jambar"

	$m_{e,i}$ (kg)	$m_{e,f}$ (kg)	$C_{p\text{eau}}$ (KJ/kg/K)	$T_{e,i}$ (°C)	$T_{e,f}$ (°C)	L_{vap} (kJ/kg)	Δt (s)	m_c (kg)	$t_{\text{ébu}}$ (min)
Br_CA_9%	5,00	4,96	4,18	30,20	100,50	2257,00	2700,00	0,55	45
Br_CC_9%	5,00	4,96	4,18	25,80	100,30	2257,00	3000,00	0,40	50
Br_RM_9%	5,00	4,95	4,18	30,00	100,50	2257,00	2100,00	0,40	35
Br_CA_10%	5,00	4,95	4,18	28,40	100,20	2257,00	3300,00	0,60	55
Br_CC_10%	5,00	4,90	4,18	29,40	100,50	2257,00	3000,00	0,30	50
Br_RM_10%	5,00	4,92	4,18	26,00	100,10	2257,00	2700,00	0,60	45

Tableau A.2 : Données brutes des tests d'ébullition sur le cuiseur malgache

	$m_{e,i}$ (kg)	$m_{e,f}$ (kg)	$C_{p\text{eau}}$ (KJ/kg/K)	$T_{e,i}$ (°C)	$T_{e,f}$ (°C)	L_{vap} (kJ/kg)	Δt (s)	m_c (kg)	$t_{\text{ébu}}$ (min)
Br_CA_9%	5,00	4,96	4,18	32,40	100,40	2257,00	1800,00	0,60	30
Br_CC_9%	5,00	4,96	4,18	38,40	100,20	2257,00	2700,00	0,50	45
Br_RM_9%	5,00	4,95	4,18	35,50	100,40	2257,00	2100,00	0,40	35
Br_CA_10%	5,00	4,97	4,18	32,70	100,20	2257,00	2400,00	0,60	40
Br_CC_10%	5,00	4,97	4,18	37,60	100,10	2257,00	2400,00	0,40	40
Br_RM_10%	5,00	4,92	4,18	31,20	100,1	2257,00	2700,00	0,60	45

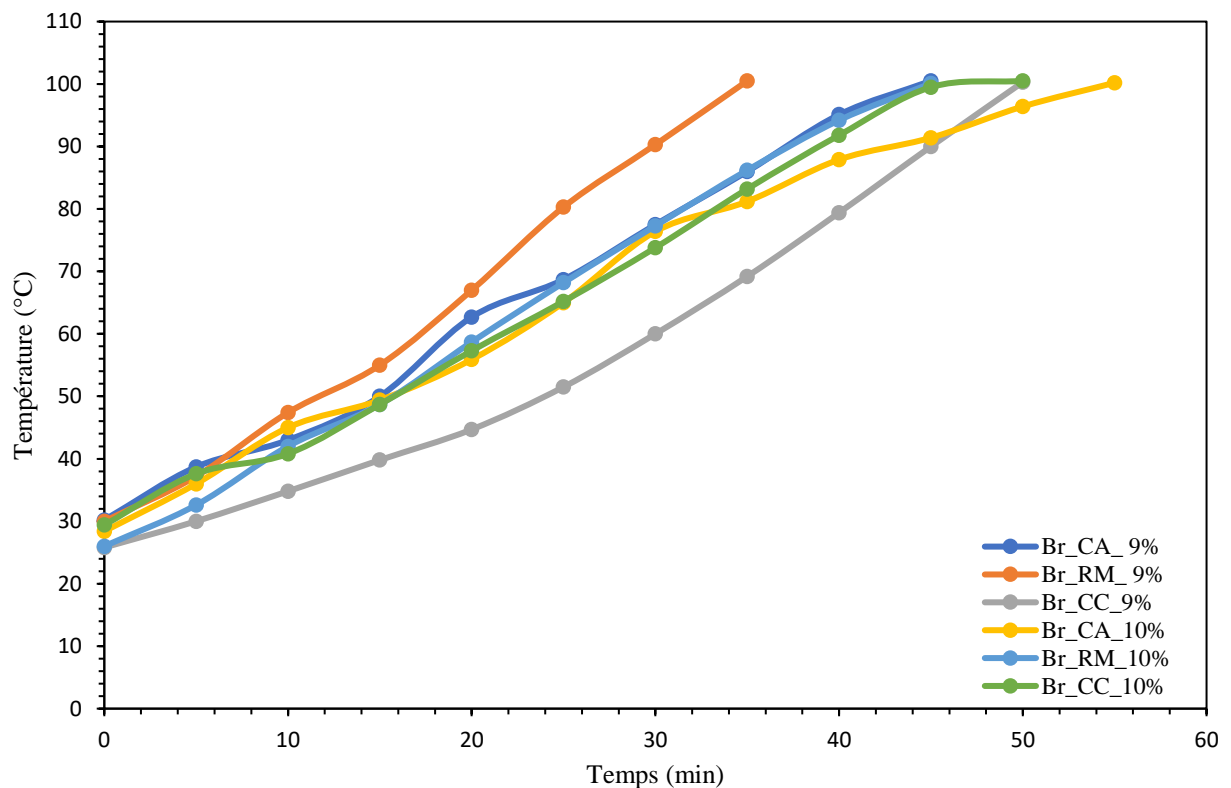


Figure A.1 : Variations de la température de l'eau lors des tests d'ébullition sur le cuiseur "Jambar"

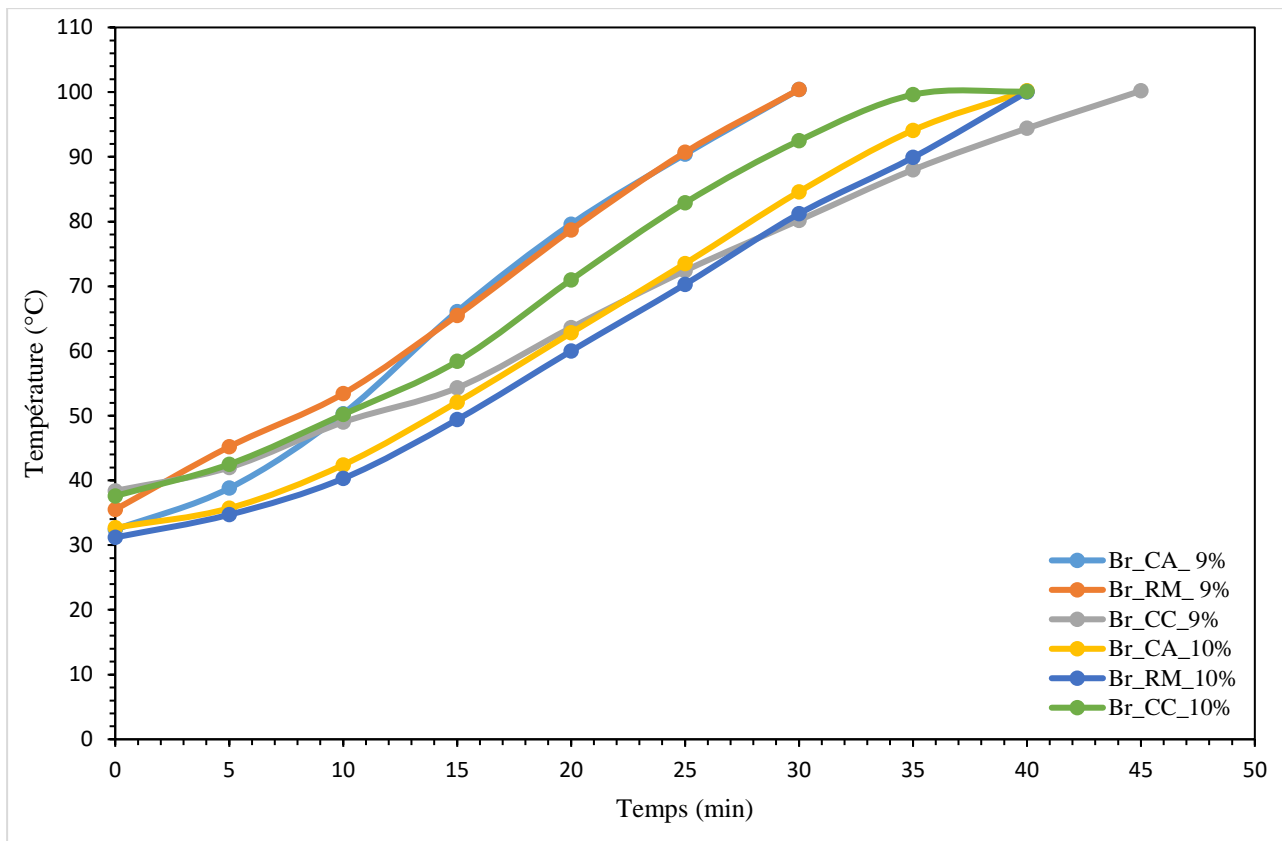


Figure A.2 : Variations de la température de l'eau lors des tests d'ébullition sur le cuiseur malgache

Tableau A.3 : Facteurs d'émissions de CO₂ des trois briquettes choisies

Echantillons	Facteurs d'émissions de CO ₂		
	kg/kg	g/min	g/MJ
Br_CA_9%	3,97	12,76	130,43
Br_RM_9%	2,57	8,13	84,52
Br_CC_10%	6,72	15,67	221,07

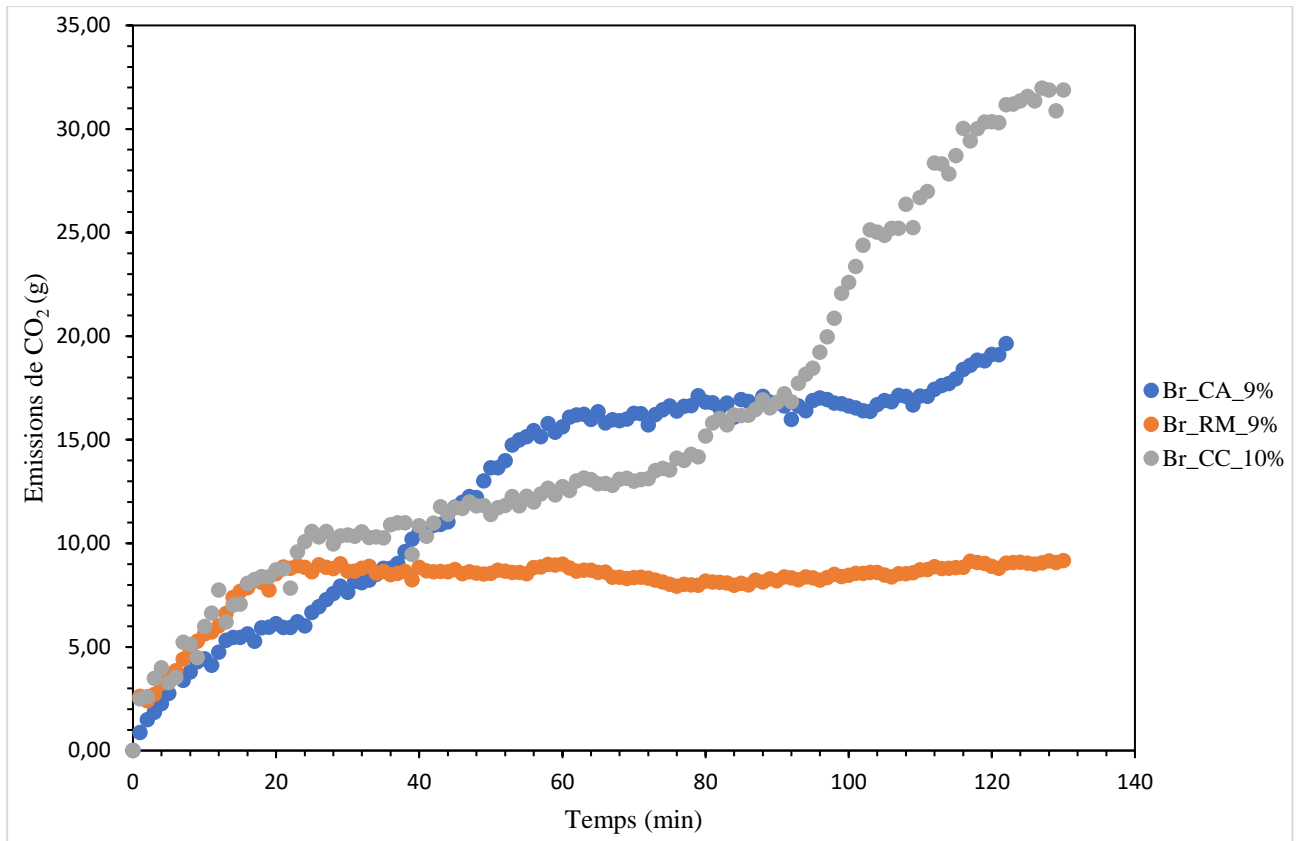


Figure A. 3 : Variations instantanées des émissions de CO₂