



HAL
open science

ÉTUDE ET CARACTÉRISATION DU CHARBON ÉCOLOGIQUE PRODUIT À PARTIR DES DÉCHETS AGRICOLES EN VUE DE SON UTILISATION DANS LES MÉNAGES AU CAMEROUN

Bill Vaneck Bot

► **To cite this version:**

Bill Vaneck Bot. ÉTUDE ET CARACTÉRISATION DU CHARBON ÉCOLOGIQUE PRODUIT À PARTIR DES DÉCHETS AGRICOLES EN VUE DE SON UTILISATION DANS LES MÉNAGES AU CAMEROUN. Thermique [physics.class-ph]. Université de Douala-Cameroun, 2022. Français. NNT: . tel-04165370

HAL Id: tel-04165370

<https://hal.science/tel-04165370v1>

Submitted on 18 Jul 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

REPUBLIQUE DU CAMEROUN
Paix - Travail - Patrie

UNIVERSITE DE DOUALA

ECOLE DOCTORALE DES SCIENCES
FONDAMENTALES ET APPLIQUEES

Unité de Formation Doctorale
des Sciences de l'Ingénieur

Laboratoire E3M



REPUBLIC OF CAMEROON
Peace - Work - Fatherland

THE UNIVERSITY OF DOUALA

POSTGRADUATE SCHOOL FOR
PURE AND APPLIED SCIENCES

Postgraduate Training Unit
for Engineering Sciences

Laboratory E3M

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE POLYTECHNIQUE DE DOUALA

THÈSE

PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION DU TITRE DE Docteur/PhD

EN SCIENCES DE L'INGÉNIEUR

SPÉCIALITÉ : ÉNERGIE et ENVIRONNEMENT

Option : Valorisation des déchets et formulation des biocarburants

solides

ÉTUDE ET CARACTÉRISATION DU CHARBON ÉCOLOGIQUE
PRODUIT À PARTIR DES DÉCHETS AGRICOLES EN VUE DE SON
UTILISATION DANS LES MÉNAGES AU CAMEROUN

Par

Bill Vaneck BOT

Soutenue le 10 Septembre 2022

Directeur

Pr Jean Gaston TAMBA

Maître de Conférences

Université de Douala

Co-Directeur

Pr Olivier Thierry SOSSO MAYI

Maître de Conférences

Université de Douala

Année académique 2021 – 2022

REPUBLIQUE DU CAMEROUN
Paix - Travail - Patrie

UNIVERSITE DE DOUALA

ECOLE DOCTORALE DES SCIENCES
FONDAMENTALES ET APPLIQUEES

Unité de Formation Doctorale
des Sciences de l'Ingénieur
Laboratoire E3M



REPUBLIC OF CAMEROON
Peace - Work - Fatherland

THE UNIVERSITY OF DOUALA

POSTGRADUATE SCHOOL FOR
PURE AND APPLIED SCIENCES

Postgraduate Training Unit
for Engineering Sciences
Laboratory E3M

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE POLYTECHNIQUE DE DOUALA

THÈSE

PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION DU TITRE DE Docteur/PhD EN SCIENCES
DE L'INGÉNIEUR

SPÉCIALITÉ : ÉNERGIE et ENVIRONNEMENT

*Option : Valorisation des déchets et formulation des biocombustibles
solides*

ÉTUDE ET CARACTÉRISATION DU CHARBON ÉCOLOGIQUE
PRODUIT À PARTIR DES DÉCHETS AGRICOLES EN VUE DE SON
UTILISATION DANS LES MÉNAGES AU CAMEROUN

Par

Bill Vaneck BOT

Ingénieur en Environnement Industriel

Soutenue publiquement le devant le jury composé de :

| | | |
|---|--|------------|
| M. Ruben Martin Mouangue, Professeur | Université de N'Gaoundéré | Président |
| M. Achille Bernard Biwolé, Maître de conférences | Université de Douala | Rapporteur |
| M. Claude Valéry Ngayihi Abbé, Maître de conférences | Université de Douala | Rapporteur |
| M. Armand Fopah Lele, Maître de conférences | Université de Buéa | Rapporteur |
| M. Jean Gaston Tamba, Maître de conférences (Directeur de thèse) | Université de Douala | Membre |
| M. Olivier Thierry Sosso Mayi, Maître de conférences (Co-Directeur de thèse) | Université de Douala | Membre |
| M. Petros Axaopoulos, Professeur | Université d'Attique Occidentale, Athènes-Grèce | Membre |

Dédicace

À mes parents Martin et Monique,

À Sharon et Monica,

À Arii Wesley Bot III.

Remerciements

L'achèvement de ce travail qui a débuté il y'a trois ans, est une grande satisfaction personnelle. C'est l'occasion de se remémorer les différentes embûches qu'il a fallu surmonter mais surtout les personnes qui m'ont permis d'y arriver.

J'adresse ma gratitude à Monsieur Olivier Thierry Sosso Mayi, Maître de Conférences à l'École Normale Supérieure d'Enseignement Technique (ENSET) de l'Université de Douala, mon co-directeur de thèse. Je lui dis merci de m'avoir adopté comme un fils depuis le début de mon cycle universitaire, pendant près d'une décennie il n'a ménagé aucun effort pour faire de moi un scientifique rigoureux et persévérant : qu'il trouve dans ces lignes l'expression de ma franche reconnaissance.

Je suis reconnaissant envers Monsieur Jean Gaston Tamba, Maître de conférences à l'Institut Universitaire de Technologie (IUT) de l'Université de Douala, mon Directeur de thèse d'avoir accepté de guider ce travail malgré ses nombreuses occupations. Je le remercie pour son implication, son soutien et de m'avoir fait bénéficier tout au long de ce travail de sa rigueur intellectuelle, son esprit critique et son dynamisme.

J'adresse mes remerciements au département de Génie Mécanique de l'Université d'Attique Occidentale d'Athènes pour l'accueil et les conditions de travail privilégiées, principalement à Monsieur Petros Axaopoulos, Professeur, responsable du Laboratoire d'Énergie Renouvelable qui m'a accueilli pour un stage de recherche d'un semestre durant la troisième année de ma thèse. J'ai eu l'honneur d'être initié à l'utilisation d'outils relatifs aux aspects économétriques de l'énergie.

Je remercie également Monsieur Evangelos Sakellariou enseignant au département de Génie Mécanique de l'Université d'Attique Occidentale d'Athènes pour les conseils, encouragements et le café qu'il nous faisait siroter en nous adressant des plaisanteries afin de maintenir une ambiance conviviale au laboratoire d'Énergie renouvelable.

J'exprime ma gratitude à l'équipe des enseignants du Laboratoire d'Énergie, Matériaux, Modélisation et Méthodes de l'École Nationale Polytechnique de l'Université de Douala pour la formation, particulièrement à Monsieur Claude Ngayihi Abbe, Maître de conférences qui met tout en œuvre pour le bon déroulement des activités scientifiques au sein du laboratoire.

Je suis redevable envers Monsieur Aloys Ekoe, chargé de cours à la Faculté des Sciences de l'Université de Douala d'avoir accepté de me faire une recommandation afin de faciliter mon stage de recherche à l'Université d'Attique Occidentale qui a aboutit à la finalisation de ce manuscrit.

J'adresse mes remerciements au laboratoire de Génie Chimique de l'Université de Ngaoundéré et le laboratoire de Physique de l'Université de Yaoundé 1 qui ont bien voulu me prêter leurs espaces de travail afin de mener des expérimentations.

Je dis également merci à tous mes camarades du Laboratoire d'énergie, Matériaux, Modélisation et Méthodes pour les discussions et échanges constructifs que nous avons eu

au cours de l'élaboration de ce travail. J'ai une pensée particulière pour mes camarades doctorants Dominique Manga et Wirnkar Basil avec qui nous avons partagé des moments de joie et de stress au Laboratoire d'Énergie Renouvelable de l'Université d'Attique Occidentale d'Athènes en Grèce.

Je tiens également à remercier Monsieur Benjamin Diboma (chargé de cours), Monsieur Jacques Bikai (chargé de cours), Monsieur Elvis Mbou Tiaya (chargé de cours) et Monsieur Julbin Paul Njock enseignants au Laboratoire de Thermique et Environnement du département de Génie Électrique de l'ENSET de l'Université de Douala pour l'ambiance conviviale qui régnait au laboratoire et pour les discussions et échanges constructifs qui ont enrichi ce travail.

Je suis reconnaissant envers l'équipe de l'entreprise Kemit Ecology pour son soutien matériel et de m'avoir ouvert ses portes afin de faire des expérimentations "in situs" et la relève des données. Je tiens particulièrement à saluer le Directeur Général Monsieur Muller Tenkeu et le Directeur des opérations Monsieur Joseph Dassi qui ont sacrifié de leur temps pour répondre aux questions ayant permis la rédaction de ce manuscrit.

Je ne peux oublier mes collègues du département de froid et climatisation du Lycée Polyvalent de Bonabéri pour leurs encouragements : leur soutien sur le plan humain aura été sans faille.

Je m'en voudrais d'oublier mes amis de longue date Claude Ngom, Raoul Biack, Franklin Possi, Christian Leumassi, Sévérin Mbog, Felix Ngouem, Emmanuel Nguidjol, Priscille Moussi, Rodrigue Kameni, Junior Njoya, Serge Penda qui m'ont moralement soutenu.

À titre personnel, j'adresse mes remerciements à ma famille. En premier lieu, je remercie mes parents Martin et Monique qui ont cru en moi et m'ont apporté toute l'aide dont j'ai eu besoin jusqu'à présent. Je souhaite ensuite exprimer ma sincère gratitude à mes deux sœurs qui ont eu le droit et le privilège de me supporter pendant plus de vingt ans. Je dis merci à ma grand-mère Esther qui me dit sans cesse "Mbombo je te porte tous les jours dans mes prières". J'ai une pensée toute particulière pour ma fiancée Danielle Flora et ses parents pour leur soutien indéfectible ; merci d'avoir accepté de me partager avec les livres et les laboratoires.

Bien entendu, cette liste n'est pas exhaustive et je remercie tous ceux et celles qui me connaissent et qui me permettent de me sentir exister. Merci à tous !!!

Table des matières

| | |
|---|----------|
| Dédicace | i |
| Remerciements | ii |
| Résumé | xii |
| Abstract | xiii |
| Introduction générale | 1 |
| 1 Cadre conceptuel et revue de la littérature | 5 |
| 1.1 Généralités et Concepts fondamentaux | 5 |
| 1.1.1 Le charbon écologique | 5 |
| 1.1.2 Processus de production du charbon écologique | 6 |
| 1.1.3 Applications des briquettes | 12 |
| 1.1.4 Avantages et inconvénients du charbon écologique | 12 |
| 1.1.5 Caractérisation des briquettes de charbon écologique | 13 |
| Analyse Proximale | 13 |
| Analyse élémentaire | 15 |
| Pouvoir Calorifique | 16 |
| Masse volumique apparente | 17 |
| Analyse ThermoGravimétrique | 17 |
| 1.2 Situation énergétique des ménages au Cameroun et apport de la biomasse agricole | 17 |
| 1.2.1 Contexte général | 17 |
| Présentation générale du Cameroun | 17 |
| Situation de la biomasse au Cameroun | 18 |
| Situation des ménages au Cameroun | 19 |
| 1.2.2 Politique et cadre institutionnel de la promotion du charbon écologique au Cameroun | 20 |
| 1.2.3 État des lieux de la production du charbon écologique au Cameroun | 21 |
| Matériels et Méthodes de production | 22 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1.3 | État de l'art sur l'évaluation du potentiel de la biomasse agricole, la production, la caractérisation et l'analyse économique des briquettes | 25 |
| 1.3.1 | Potentiel de la biomasse agricole | 26 |
| 1.3.2 | Choix des déchets et caractérisation des briquettes | 26 |
| 1.3.3 | Choix du liant | 29 |
| 1.3.4 | État des lieux de la conversion de la biomasse en briquettes | 29 |
| 1.3.5 | Transition énergétique et intégration des briquettes dans les ménages | 30 |
| 1.3.6 | Analyse économique de la production des briquettes de charbon écologique | 32 |
| | 1. Coûts de production des briquettes | 32 |
| | 2. Faisabilité économique de la production des briquettes | 34 |
| | 3. Analyse de sensibilité économique | 35 |
| 2 | Matériels et méthodes | 37 |
| 2.1 | Évaluation du potentiel énergétique des déchets agricoles au Cameroun | 37 |
| 2.2 | Production des briquettes de charbon écologique | 40 |
| 2.2.1 | Justification du choix des déchets | 40 |
| 2.2.2 | Matériel utilisé | 41 |
| 2.2.3 | Processus de production | 42 |
| 2.3 | Caractérisation des briquettes | 43 |
| 2.3.1 | Masse volumique apparente | 43 |
| 2.3.2 | Taux d'Humidité | 43 |
| 2.3.3 | Taux de Cendres | 44 |
| 2.3.4 | Taux de Matières Volatiles | 44 |
| 2.3.5 | Pourcentage de Carbone Fixe | 44 |
| 2.3.6 | Pouvoir Calorifique Inférieur et Supérieur | 45 |
| 2.3.7 | Analyse Thermogravimétrique | 45 |
| 2.3.8 | Analyse élémentaire | 46 |
| 2.3.9 | Caractérisation thermique | 46 |
| 2.4 | Analyse énergétique de la production des briquettes | 51 |
| 2.4.1 | Hypothèses de travail | 51 |
| 2.4.2 | Description de la production dans l'usine témoin | 51 |
| 2.4.3 | Calcul de la consommation énergétique | 52 |
| 2.5 | Analyse économique de la production des briquettes | 55 |
| 2.5.1 | Évaluation des paramètres économiques | 56 |
| 2.5.2 | Analyse de sensibilité économique | 57 |
| 2.6 | Analyse économique de l'utilisation des briquettes dans un ménage moyen | 57 |
| 2.6.1 | Évaluation des coûts du cycle de vie de l'utilisation des briquettes | 58 |
| 2.6.2 | Analyse de sensibilité économique | 59 |

| | |
|--|------------|
| 3 Résultats et Discussion | 61 |
| 3.1 Potentiel énergétique de la biomasse agricole | 61 |
| 3.2 Bénéfices de la conversion de la biomasse agricole en briquettes | 65 |
| 1. Préservation de l'environnement | 65 |
| 2. Approvisionnement en énergie | 65 |
| 3. Aspect socio-économique | 66 |
| 4. Santé et sécurité | 66 |
| 3.3 Contraintes de la conversion de la biomasse agricole en briquettes et pro- | |
| positions de solutions | 67 |
| 3.3.1 Technologique | 67 |
| 3.3.2 Disponibilité saisonnière | 67 |
| 3.3.3 Logistique | 68 |
| 3.4 Résultats de la production et caractérisation des briquettes | 69 |
| 3.4.1 Analyse de la diminution de la masse de la matière au cours du | |
| processus | 69 |
| 3.4.2 Résultats de l'analyse physico-chimique | 71 |
| - Masse volumique apparente | 72 |
| - Taux d'humidité | 72 |
| - Taux de Cendre | 73 |
| - Taux de Matières Volatiles | 73 |
| - Pourcentage de Carbone Fixe | 73 |
| - Pouvoir Calorifique | 73 |
| 3.4.3 Résultats de l'analyse élémentaire | 74 |
| 3.4.4 Résultats de l'analyse thermogravimétrique | 75 |
| 3.4.5 Résultats de la caractérisation thermique | 78 |
| 3.5 Analyse énergétique de la production des briquettes | 82 |
| 3.5.1 Bilan de la consommation énergétique | 82 |
| 3.5.2 Énergie primaire consommée par étape | 84 |
| 3.5.3 Énergie primaire consommée par résidu | 86 |
| 3.6 Analyse économique de la production des briquettes | 87 |
| 3.6.1 Coûts de production des briquettes | 87 |
| 3.6.2 Les paramètres économiques | 88 |
| 3.6.3 Analyse de sensibilité économique | 90 |
| 3.7 Résultats de l'analyse économique de l'utilisation des briquettes | 93 |
| 3.7.1 Coûts de Cycle de Vie liés à l'utilisation des briquettes | 93 |
| 3.7.2 Analyse de sensibilité économique | 95 |
| Conclusion générale | 103 |
| Références bibliographiques | 105 |
| Travaux issus de la thèse | 122 |

Liste des tableaux

| | | |
|-----|---|----|
| 2.1 | Caractéristiques des déchets issus des cultures vivrières | 39 |
| 2.2 | Détails des paramètres des opérations de briquetage | 53 |
| 2.3 | Paramètres énergétiques | 54 |
| 2.4 | Paramètres économiques | 56 |
| 2.5 | Valeur calorifique et prix du marché local des combustibles étudiés | 58 |
| 2.6 | Paramètres de l'analyse économique | 59 |
| 3.1 | Potentiel énergétique des déchets | 62 |
| 3.2 | Résultats de la caractérisation physico-chimique | 71 |
| 3.3 | Composition élémentaire des briquettes | 74 |
| 3.4 | Caractéristiques thermiques des briquettes | 81 |
| 3.5 | Bilan de la consommation énergétique | 83 |
| 3.6 | Coûts de production unitaires (XAF/kg) | 87 |
| 3.7 | Paramètres économiques | 89 |
| 3.8 | Valeurs Actuelles de Bénéfices Nettes | 95 |

Table des figures

| | |
|--|----|
| 1.1 Aperçu charbon écologique | 6 |
| 1.2 Processus de production de charbon écologique | 6 |
| 1.3 Collecte des déchets | 7 |
| 1.4 Quelques exemples de déchets séchés (de la gauche vers la droite, déchets de rotin, bagasse de canne à sucre, coques de noix de coco et pelures d'ananas) | 9 |
| 1.5 Fût de carbonisation | 9 |
| 1.6 Broyeur | 10 |
| 1.7 Malaxeur | 10 |
| 1.8 Compacteur | 11 |
| 1.9 Séchage des briquettes | 12 |
| 1.10 Carte du Cameroun | 18 |
| 1.11 Fours utilisés dans les ménages | 20 |
| 1.12 Localisation des producteurs | 22 |
| 1.13 Carbonisateurs | 23 |
| 1.14 Technologies de broyage | 23 |
| 1.15 Technologies de malaxage | 24 |
| 1.16 Technologies de compactage | 24 |
| 1.17 Technologies et modes de séchage | 25 |
| 1.18 Méthodes de conditionnement | 25 |
| 2.1 Schéma de production de déchets | 41 |
| 2.2 Mesure de la masse et des dimensions | 43 |
| 2.3 Bombe calorimétrique | 45 |
| 2.4 Schéma du Four amélioré | 47 |
| 2.5 Four amélioré | 47 |
| 2.6 Module d'acquisition de données | 48 |
| 2.7 Schéma du protocole expérimental | 48 |
| 2.8 Montage du protocole expérimental | 49 |
| 3.1 Potentiel énergétique et répartition nationale des cultures | 64 |
| 3.2 Évolution annuelle du potentiel énergétique de la biomasse agricole | 66 |
| 3.3 Potentiel énergétique mensuel | 68 |
| 3.4 Diminution de la masse des peaux de banane et bagasse de canne à sucre | 70 |

| | | |
|------|--|-----|
| 3.5 | Diminution de la masse des peaux de banane et bagasse de canne à sucre | 70 |
| 3.6 | Échantillon de briquettes produites | 71 |
| 3.7 | Courbes TG, DSC et DTG des briquettes BCS | 75 |
| 3.8 | Courbes TG, DSC et DTG des briquettes PBN | 76 |
| 3.9 | Courbes TG, DSC et DTG des briquettes DRT | 77 |
| 3.10 | Courbes TG, DSC et DTG des briquettes CNC | 77 |
| 3.11 | Allumage des briquettes | 79 |
| 3.12 | Combustion et extinction des briquettes | 80 |
| 3.13 | Répartition de la consommation énergétique par étape de production | 85 |
| 3.14 | Énergie consommée par source primaire | 86 |
| 3.15 | Répartition des coûts liés à chaque système de production | 88 |
| 3.16 | Évolution des coûts de production sur 20 ans | 89 |
| 3.17 | Sensibilité de la VAN par rapport au taux d'actualisation | 90 |
| 3.18 | Sensibilité de la VAN fonction du coûts du capital initial | 91 |
| 3.19 | Sensibilité de la VAN en fonction du prix local des briquettes | 92 |
| 3.20 | Coûts du cycle de vie | 94 |
| 3.21 | Valeur actuelle du bénéfice nette pour la briquette de CNC | 96 |
| 3.22 | Sensibilité de la VABN des briquettes DRT par rapport au taux d'actualisation | 96 |
| 3.23 | Sensibilité de la VABN des briquettes PBN par rapport au taux d'actualisation | 97 |
| 3.24 | Sensibilité de la VABN des briquettes BCS par rapport au taux d'actualisation | 97 |
| 3.25 | Sensibilité de la VABN des briquettes CNC par rapport au prix du système de briquettes | 98 |
| 3.26 | Sensibilité de la VABN des briquettes DRT par rapport au prix du système de briquettes | 98 |
| 3.27 | Sensibilité de la VABN des briquettes PBN par rapport au prix du système de briquettes | 99 |
| 3.28 | Sensibilité de la VABN des briquettes BCS par rapport prix du système de briquettes | 99 |
| 3.29 | Sensibilité de la VABN des briquettes par rapport au prix du GPL | 100 |
| 3.30 | Sensibilité de la VABN des briquettes par rapport prix du bois | 100 |
| 3.31 | Sensibilité de la VABN des briquettes par rapport prix de charbon de bois | 101 |

Sigles, Abréviations et Symboles

| | Signification | Unités |
|------------------|--|---------------|
| AIE | Agence Internationale de l'Énergie | / |
| GES | Gaz à Effet de Serre | / |
| BAD | Banque Africaine Développement | / |
| ONACC | Observatoire National de Changements Climatiques | / |
| GPL | Gaz de Pétrole Liquéfié | / |
| OMS | Organisation Mondiale de la Santé | / |
| MAISCAM | Maïs du Cameroun | / |
| MINEE | Ministère de l'Eau et de l'Énergie | / |
| MINEPDED | Ministère de l'Environnement de la Protection de la Nature et du Développement Durable | / |
| MINRESI | Ministère de la Recherche Scientifique et de l'Innovation | / |
| MINFI | Ministère des Finances | / |
| MINEPAT | Ministère de l'Économie, de la Planification et de l'Aménagement du Territoire | / |
| SOSUCAM | Société Sucrière du Cameroun | / |
| SODECOTON | Société de Développement de Coton | / |
| CNC | Coques de Noix de coco | / |
| DRT | Déchets de Rotin | / |
| PBN | Peaux/Pelures de Banane | / |
| BCS | Bagasse de Canne à Sucre | / |
| SND | Stratégie Nationale de Développement | / |
| RRP | Rapport Résidus/Produit | / |
| ATG | Analyse ThermoGravimétrique | / |
| IP | Indice de Profitabilité | / |
| XAF | Francs CFA zone CEMAC | / |
| PJ/an | Péroule par an | / |
| TJ/an | Téroule par an | / |
| PCI | Pouvoir Calorifique Inférieur | MJ/kg |
| PCS | Pouvoir Calorifique Supérieur | MJ/kg |
| PCF | Pourcentage de Carbone Fixe | % |

| | | |
|-------------|---|-------|
| TMV | Taux de Matières Volatiles | % |
| TC | Taux de Cendres | % |
| TH | Taux d'Humidité | % |
| CR | Quantité de biomasse agricole produite | tonne |
| PrC | Quantité de cultures récoltée | tonne |
| VABN | Valeur Actuelle du bénéfice Nette | (XAF) |
| MC | Coûts annuels de maintenance | XAF |
| VAN | Valeur Actuelle Nette | XAF |
| CCV | Coûts du Cycle de Vie | XAF |
| INV | Investissement Initial | XAF |
| d | Taux d'actualisation | % |
| i | Taux d'inflation sur le marché | % |
| j | Taux d'inflation des coûts de maintenance | % |
| TRI | Temps de Retour sur Investissement | an |

Résumé

Ce travail porte sur la caractérisation du charbon écologique et met en exergue une étude énergétique et économique de la production dudit charbon ainsi que son utilisation dans les ménages au Cameroun. Le but de l'étude est d'analyser la faisabilité de l'adaptation du charbon écologique produit à partir de coques de noix de coco, déchets de rotin, bagasse de et pelures de banane comme combustible de cuisson. Les objectifs sont d'évaluer le potentiel énergétique de la biomasse agricole, déterminer les caractéristiques physico-chimiques du charbon écologique produit, et faire une analyse énergétique et de la faisabilité économique de la production et de l'utilisation domestique dudit charbon. Une évaluation théorique du potentiel énergétique de la biomasse agricole a été faite par la méthode du Rapport Résidu/Produit ; les test d'ébullition de l'eau et les protocoles expérimentaux documentés dans les normes American Society for Testing and Materials (ASTM) et Comité Européen de Normalisation (CEN) ont permis d'aboutir à la caractérisation du charbon. La collecte de données dans une industrie de conversion de la biomasse agricole en charbon écologique a conduit à l'analyse énergétique du processus de production de charbon. La simulation des modèles de calculs de Valeur Actuelle Nette, Indice de Profitabilité et coûts de cycle de vie a permis d'évaluer la viabilité économique de la production des briquettes ainsi que leur utilisation comme combustible de cuisson dans un ménage. Les résultats montrent que le Cameroun dispose d'un potentiel important de biomasse agricole pour la production de briquettes. Avec une production annuelle de 46 236 156 tonnes, les résidus agricoles peuvent produire 7 706 260 tonnes de briquettes chaque année pour un potentiel énergétique de 106 139 TJ. Ce potentiel agricole est sous-exploité à cause de la technologie inadéquate, du choix des matières premières et le manque d'accompagnement financier par les pouvoirs publics entre autres. La caractérisation du charbon produit à partir des coques de noix de coco, déchets de rotin, bagasse de canne à sucre et pelures de banane révèle qu'elles ont des propriétés de combustion intéressantes. Le pouvoir calorifique inférieur varie de 16,98 à 32,16 MJ/kg, le taux d'humidité est inférieur à 8,00 % et le taux de carbone fixe est compris entre 15,15 et 19,49 %. L'analyse du système de production de charbon écologique montre que ce processus est énergétiquement viable, l'énergie primaire consommée va de 0,09 à 0,56 kWh pour un kilo Wattheure d'énergie produite. Les calculs économiques révèlent que seule la conversion des coques de noix de coco et déchets de rotin est un processus économiquement rentable. La substitution du charbon écologique au Gaz de Pétrole Liquéfié, au bois de chauffe ou au charbon de bois peut être économiquement bénéfique pour les ménages. Ces derniers peuvent faire des économies allant jusqu'à 52,00 % de leurs dépenses liées aux combustibles de cuisson. Le charbon écologique peut donc être considéré comme un combustible adapté pour les ménages au Cameroun, mais d'autres aspects comme l'étude de la logistique ou le point de vue des ménages doivent être investigués pour le confirmer.

Mots-clés : Déchet agricole - Charbon écologique - Caractérisation - Cuisson - Viabilité économique - .

Abstract

This work focuses on the characterization of eco-friendly charcoal and highlights an energy and economic analysis of the production and household use of eco-friendly charcoal in Cameroon. The aim of the study is to analyse the feasibility of adapting eco-friendly charcoal produced from coconut shells, rattan waste, bagasse and banana peels as cooking fuel. The objectives are to assess the energy potential of agricultural biomass, determine the physico-chemical characteristics of the charcoal produced, and analyse the energy and economic feasibility of the production and household cooking use of the charcoal. A theoretical assessment of the energy potential of agricultural biomass is performed using the Residue/Product Ratio method. Water boiling tests and experimental protocols documented by the American Society for Testing and Materials (ASTM) and the European Committee for Standardization (CEN) allow the characterization of charcoal. Data collection in an eco-friendly briquetting company leads to the energy analysis of the production process. Simulation of the Net Present Value, profitability index, and life cycle cost models allows one to investigate the economic viability of charcoal production as well as its use as cooking fuel in a typical household in Cameroon. The results show that Cameroon has a significant potential for agricultural biomass for briquette production. With an annual production of 46,236,156 tonnes, agricultural residues can produce 7,706,260 tonnes of briquettes each year for an energy potential of 106,139 TJ. This agricultural potential is under-exploited because of inadequate technology, the choice of raw materials, and the lack of financial support from the public authorities, among others. The characterization of charcoal produced from coconut husks, rattan waste, sugarcane bagasse, and banana peels reveals that they have interesting combustion properties. The net calorific value varies between 16.98 and 32.16 MJ/kg, the moisture content is less than 8.00%, and the fixed carbon content ranges between 15.15 and 19.49%. An analysis of the production shows that the process is energy efficient, with primary energy consumption ranging from 0.09 to 0.56 kWh for one kilowatt-hour of energy produced. Economic calculations reveal that only the conversion of coconut husks and rattan waste is an economically viable process. The substitution of Liquefied Petroleum Gas, firewood or wood charcoal can be economically beneficial for households. Households can save up to 52% on their cooking fuel expenses. Eco-friendly charcoal could therefore be considered a suitable fuel for households in Cameroon. Eco-friendly charcoal can therefore be considered a suitable fuel for households in Cameroon, but other such considerations as the study of logistics or the views of households need to be investigated to validate this.

Key words : agricultural waste - eco-friendly charcoal - characterisation - cooking - economic viability.

Introduction générale

L'énergie représente un facteur essentiel dans le fonctionnement de l'économie d'un pays et dans l'amélioration des conditions de vie des populations. Aucun développement n'est donc possible sans énergie. L'une des formes d'utilisation de l'énergie est la cuisson; dans les pays en voie de développement, ce besoin est généralement satisfait par la combustion directe du bois et de ses produits dérivés. Le Bois-énergie (Bois de feu, charbon de bois, sciure, copeau) utilisé pour la cuisson et le chauffage contribue à plus de 80 % à l'approvisionnement de l'énergie en Afrique [1]. Il est important que la source d'énergie utilisée brûle efficacement et soit adaptée à la situation économique des ménages.

Au Cameroun, les chiffres sur la consommation énergétique publiés en 2021 par Kidmo et al. montrent que la biomasse est la principale source d'énergie et représente 74,22 % de la consommation totale, suivie du pétrole (18,48 %) et l'électricité (7,30 %) [2]. Le secteur résidentiel consomme 63,68 % de l'énergie finale totale et dépend largement de la biomasse. Sur la base des chiffres de l'Institut National de la Statistique et du dernier recensement, les besoins énergétiques de cuisson d'un ménage moyen peuvent être estimés à 950 kWh/an [3]. Selon les statistiques publiés en 2020 par Tamba, parmi les différentes sources d'énergie pour la cuisson, consommées dans les ménages (bois de chauffage, kérosène, gaz de pétrole liquéfié et électricité), le bois énergie est la plus importante avec 95 % (le bois de feu représente 91 %, le charbon de bois 2 % et la sciure/copeaux 2 %) des parts de la consommation totale d'énergie dans les ménages, tandis que le gaz de pétrole liquéfié (GPL), dont la consommation augmente, est le moins important et ne représente que 1,50 % des parts de la consommation totale d'énergie des ménages [4]. Un regard particulier sur les grandes agglomérations comme Douala et Yaoundé montre que 0,37 kg de bois de feu sont consommés par personne et par jour à Douala et 0,12 kg de charbon de bois sont consommés par personne et par jour à Yaoundé [1]. Hormis l'expansion de l'agriculture, des infrastructures et de l'exploitation minière, l'extraction du bois est l'une des causes de la déforestation. Le bois de feu et le charbon de bois représentent 90% des prélèvements dans les forêts d'Afrique et un tiers de la production mondiale de bois-énergie [5]. Le déboisement est ainsi indirectement responsable de nombreux problèmes environnementaux et sanitaires. Le Cameroun a un taux de déforestation de 1 %, [6], il est important de mettre en œuvre des stratégies et programmes de substitution ou de diminution d'exploitation de cette ressource.

Le secteur agricole camerounais est un pilier important pour l'économie du pays ; la majeure partie de son potentiel de biomasse provient de l'agro-industrie. La biomasse agricole est constituée des résidus tels que les enveloppes, les troncs, les feuilles, les coques et les tiges ont un potentiel énergétique élevé et sont définis comme des sous-produits de la biomasse provenant des systèmes agricoles [7]. Une mineure partie de ces résidus est utilisée comme engrais dans les champs, pour limiter l'érosion des sols ou comme litière dans les poulaillers, mais la partie la plus importante de ces résidus n'est ni traitée ni recyclée de façon efficace. Les déchets agricoles peuvent constituer une matière première adéquate pour la fabrication du charbon écologique [8]. Ce dernier est un biocombustible qui a l'avantage d'être renouvelable, ses caractéristiques physico-chimiques sont plus intéressantes que celles d'autres sources de combustibles solides et sa combustion peut être plus efficace que celle du charbon de bois dépendamment de la matière première utilisée pour sa production [9]. Le processus de fabrication du charbon écologique passe par plusieurs étapes, à savoir : le séchage des déchets, la carbonisation, le broyage, le malaxage avec l'ajout d'un liant, le compactage et enfin le séchage du charbon écologique produit [10].

La valorisation énergétique de la biomasse est aujourd'hui encouragée par des questions d'ordres social, économique, et surtout énergétique et environnemental.

- Intérêt économique et social :

L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) estime qu'un million six cent mille femmes et enfants meurent prématurément chaque année à cause des fumées de bois dans les habitations mal ventilées. la réduction de l'utilisation du bois-énergie réduira l'ensemble des contraintes graves liées à son utilisation par les populations et constituera une perspective d'amélioration des conditions de vie.

- Intérêt énergétique :

La valorisation énergétique de la biomasse peut permettre de contribuer de manière significative en matière de développement des énergies renouvelables.

Par ailleurs, la diffusion de l'exploitation de la biomasse pourrait réduire les problèmes d'interdépendance géographiques entre zones à haute concentration des ressources d'énergie (pétrole, gaz, etc ...)

- Intérêt Environnemental :

La valorisation des déchets agricoles est un moyen de gestion de déchets qui peut permettre l'assainissement de l'environnement.

Ce travail s'inscrit dans la contribution à l'étude énergétique et économique de la conversion de la biomasse agricole en charbon écologique au Cameroun. À cause de leur disponibilité dans la ville de Douala où les expérimentations sont faites et de leurs caractéristiques physico-chimiques, les coques de noix de coco, les déchets de rotin, la bagasse

de canne à sucre et les peaux de banane sont les résidus qui feront office de matières premières en vue de la production des briquettes. La production des briquettes est faite selon le protocole d'une entreprise localisée dans la ville de Douala-Cameroun. Bien que certaines petites entreprises produisent des briquettes depuis quelques années avec les ressources limitées disponibles à partir des peaux de bananes, des coques de noix de coco, de la bagasse de canne à sucre entre autres, une seule étude scientifique a été enregistrée au Cameroun sur le briquetage de la biomasse agricole jusqu'à date [11]; la caractérisation des briquettes produites est donc nécessaire. Les conditions climatiques et hydrogéologiques varient d'une région à l'autre et influencent les propriétés des déchets agricoles [12, 13]; par conséquent, il peut avoir une variation dans les propriétés des briquettes produites. Ce travail est une continuité des efforts appliqués à la caractérisation géo-spécifique des briquettes pour le développement énergétique durable.

Comme la plupart des pays du Sud, le Cameroun est confronté aux problèmes de déficits énergétiques. La biomasse est la ressource énergétique la plus utilisée et le secteur résidentiel consomme la plus grosse part de l'énergie produite. Les besoins énergétiques de cuisson d'une population sans cesse croissante accentuent les impacts environnementaux négatifs. D'un autre côté, l'économie camerounaise essentiellement basée sur l'agriculture rend la biomasse agricole disponible. La question centrale de cette thèse est de savoir si le charbon écologique produit à partir de la biomasse agricole peut être adapté comme combustible de cuisson dans les ménages au Cameroun. Pour répondre à cette question, quatre hypothèses de recherche sont formulées :

1. Le Cameroun a un potentiel agricole nécessaire pour produire suffisamment de déchets agricoles qui sont la matière première pour la production du charbon écologique.
2. Les caractéristiques des briquettes de charbon écologique produites au Cameroun à partir des déchets de rotin, coques de noix de coco, de bagasse de canne à sucre et pelures de banane leur confèrent les qualités d'un bon combustible de cuisson.
3. La production de charbon écologique est une activité économiquement rentable.
4. Les besoins énergétiques des ménages peuvent être satisfaits à moindre coûts en adoptant les briquettes.

Le but de ce travail est d'évaluer la faisabilité de l'utilisation de quatre types de charbon écologique produits respectivement à base de coques de noix de coco, déchets de rotin, bagasse de canne à sucre et peaux de banane comme combustible de cuisson dans les ménages au Cameroun.

Les objectifs spécifiques ci-dessous sont formulés pour atteindre le but :

- Évaluer le potentiel de la biomasse agricole camerounaise pour la production des briquettes de charbon écologique. Il est question de recenser les résidus agricoles disponibles et évaluer leur potentiel à produire du charbon vert.

- Déterminer les caractéristiques physico-chimiques, élémentaires et les paramètres de combustion des briquettes à base de coques de noix de coco, déchets de rotin, bagasse de canne à sucre et peaux de banane. Cette caractérisation permet de prédire les performances énergétiques des briquettes en tant que combustible de cuisson.
- Étudier la production des briquettes de charbon écologique. Cette étude vise à évaluer la performance énergétique et la rentabilité économique de la production des briquettes.
- Étudier la rentabilité économique de l'utilisation des briquettes dans les ménages. Il s'agit d'analyser la viabilité économique de l'utilisation des briquettes de coques de noix de coco, déchets de rotin, bagasse de canne à sucre et peaux de banane en lieu et place du GPL, du bois de chauffe et du charbon de bois dans un ménage au Cameroun.

Cette étude est organisée et présentée en trois chapitres. Le premier intitulé **Cadre conceptuel et revue de la littérature**, permet de se familiariser avec les concepts fondamentaux liées au charbon écologique. Ce chapitre retrace l'histoire du charbon écologique, décrit explicitement le processus de production de ces biocombustibles au Cameroun. Il est également question ici de faire la synthèse des travaux documentés relatifs à la caractérisation du charbon écologique, ainsi qu'à la politique d'intégration du charbon écologique dans les ménages dans d'autres pays. Le deuxième chapitre formulé **Matériels et méthodes**, décrit toute la méthodologie déployée pour atteindre les objectifs visés. La méthode de l'évaluation théorique du potentiel énergétique de la biomasse agricole est explicitée, le protocole expérimental de la caractérisation du charbon écologique est explicitement décrit. Par la suite, la démarche d'estimation des coûts énergétiques et économiques liés à la production de charbon écologique est présentée. Enfin, les outils d'analyse des coûts de cycle de vie employés pour l'analyse économique de l'utilisation du charbon écologique dans un ménage camerounais moyen sont explicités. Le troisième chapitre **Résultats et discussion**, présente les résultats et les discussions des dits résultats. Les chiffres et la cartographie du potentiel énergétique de la biomasse agricole sont présentés et la disponibilité des déchets agricoles est discutée. Les performances énergétiques des briquettes produites à partir des peaux de banane, de la bagasse de canne à sucre, des déchets de rotin et des coques de noix de coco sont discutées sur la base des résultats de la caractérisation des-dites briquettes. Puis, la performance énergétique du système de production des briquette ainsi que sa rentabilité économique sont analysées. Ce chapitre ressort et discute également l'estimation des bénéfices ou pertes financières liées à substitution des briquettes aux combustibles de cuisson classiques tels que le charbon de bois, le bois de chauffage et le gaz domestique dans un ménage camerounais moyen. Enfin, une conclusion présente une synthèse succincte des résultats obtenus ainsi que les perspectives pour les recherches futures.

Chapitre 1

Cadre conceptuel et revue de la littérature

Introduction

Au rythme actuel de l'évolution démographique ; la déforestation, les changements climatiques et le déficit énergétique s'accroissent également, si des mesures précises, concrètes et efficaces ne sont pas prises, les conditions de vie à la surface de la terre risquent être de plus en plus difficiles. La production du charbon dit écologique à partir de la biomasse apparaît comme une idée innovante. Cette source d'énergie alternative peut être une solution efficace tant sur le plan environnemental que sur le plan énergétique et mérite par conséquent une attention particulière. Ce chapitre rappelle quelques concepts fondamentaux liés à l'étude du charbon écologique tels que charbon déchet, biomasse, caractérisation. Il permet également de décrire le contexte énergétique des ménages au Cameroun. Enfin, il revisite les études documentées dans la littérature relative aux défis de la conversion de la biomasse en charbon écologique, la caractérisation, l'analyse énergétique et économique liée à la production et à l'utilisation dudit charbon.

1.1 Généralités et Concepts fondamentaux

1.1.1 Le charbon écologique

Le charbon écologique encore appelé charbon vert est un combustible solide produit à partir des déchets biodégradables riches en carbone, principalement à partir des déchets agricoles, ménagers ou forestiers ou plus généralement à partir de la biomasse. La biomasse est l'ensemble de la matière organique d'origine végétale ou animale qui peut être utilisée comme source d'énergie. On distingue La biomasse oléagineuse, riche en lipides : colza, palmier à huile, etc, La biomasse à glucide : les céréales, les betteraves sucrières et les cannes à sucre que l'on peut facilement liquéfier et la biomasse lignocellulosique constituée de biomasse agricole et forestière. Cette dernière classe de biomasse est la plus utilisée

pour la fabrication du charbon écologique, mais d'autres matières premières sont aussi utilisées telles que les déchets industriels et les déchets solides municipaux. La qualification "écologique" tire son origine du fait qu'il est fabriqué à partir des déchets ; ce qui lui confère le caractère d'un combustible renouvelable et d'un moyen de lutte contre la pollution de l'environnement. Ce charbon se présente sous forme de boules de la taille des morceaux de charbon de bois classique ou sous forme de briquettes comme l'illustre la figure [1.1].



FIGURE 1.1 – Aperçu charbon écologique [14]

Dans le cadre de ce travail, l'expression briquette de "charbon écologique" ou le terme "briquette" sera utilisé pour désigner le charbon écologique.

1.1.2 Processus de production du charbon écologique

La production de briquette de charbon écologique est un procédé ancien qui a été introduit pour la première fois en 1864 aux États-Unis [15]. Il obéit à sept étapes à savoir : la collecte des déchets, le séchage des déchets, la carbonisation, le broyage, le malaxage avec ajout du liant, le compactage et le séchage des briquettes produites. Le procédé conventionnel de briquetage a été rapporté par Kapen et al [11] (présenté dans la figure [1.2]).

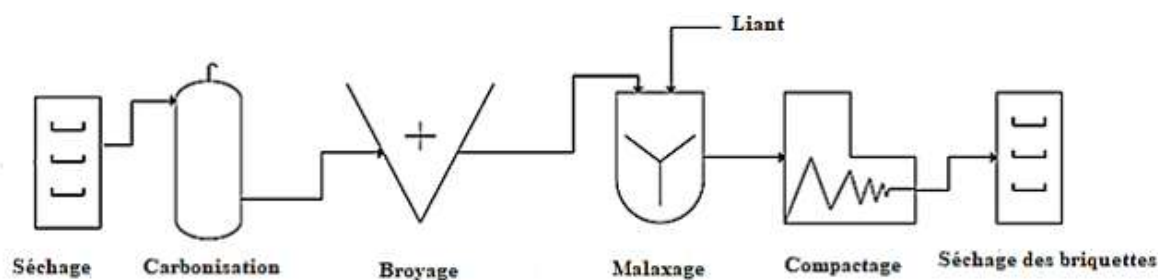


FIGURE 1.2 – Processus de production de charbon écologique [10]

1. Collecte des déchets

Cette étape consiste à choisir les déchets qui constituent la matière première de la production des briquettes (comme l'illustre la figure [1.3]). la notion de déchet a des définitions variées selon les normes et les approches. Dans le cadre de cette étude,

le déchet est défini conformément à la loi camerounaise N°96/12 du 5 août 1996 relative à la gestion de l'environnement c'est-à-dire comme tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance ou tout matériau produit ou, plus généralement, tout bien meuble ou immeuble abandonné ou destiné à l'abandon. Et partant, dans la suite du travail le terme résidu sera confondu à celui de déchet.



FIGURE 1.3 – Collecte des déchets [14]

Plusieurs types de résidus peuvent être collectés pour la production des briquettes à savoir les déchets solides municipaux, les déchets industriels et les déchets agricoles.

— Déchets solides municipaux

Il s'agit de l'ensemble des déchets solides dont l'élimination relève de la compétence des communes. Ils peuvent être constitués d'aliments, plastiques non recyclables, emballages souillés, des journaux ou magazines et emballages recyclables ménagers (bouteilles en verre, cartons, bouteilles et flacons plastiques, canettes et boîtes de conserve), des déchets spéciaux (ampoules, batteries, pots de peintures); il est donc indispensable de faire un tri. La production de briquettes à partir des déchets solides municipaux s'est avérée fructueuse dans certains pays en voie de développement [16]. L'abondance et la disponibilité de ces déchets en font une matière première appropriée, potentiellement rentable et fiable pour la production de briquettes [17, 18].

— Résidus forestiers

Ces résidus sont produits à la suite des activités d'exploitation et de transformation des arbres et plantes de la forêt. Ils sont généralement constitués de branches, cimes et le feuillage des arbres, arbustes, sciures et copeaux. Des travaux documentés dans la littérature ont investigué sur la possibilité de produire les briquettes de charbon écologique à partir de la sciure de bois [19-23].

— Déchets industriels

Des études analysé la possibilité de produire des briquettes à partir de sciure de bois comme combustible pour les ménages et les petites industries du Kenya.

Ce sont des résidus qui dérivent des activités industrielles. La possibilité d'utiliser les déchets industriels pour la production de briquettes a été démontrée. Notamment, les déchets de papier [24], les boues d'épuration [25], les boues des industries sidérurgiques [26], les terres de blanchiment usées des industries d'huile de palme raffinée [27] et les plastiques recyclables [28], tels que le polyéthylène haute densité, le polyéthylène, le polypropylène, le polyéthylène téréphtalate et le polystyrène, conviennent mieux pour la production des briquettes de qualité.

— Déchets agricoles

Les déchets agricoles proviennent des activités de récolte et transformation et de consommation des produits agricoles. Ils sont principalement issus de la transformation de banane/plantain, noix de palme, noix de coco, cajou, amande, riz, mil, maïs, canne à sucre, cacao, blé, sorgho. Les déchets produits sont généralement les tiges, les coques, les cabosses, les raffles, peaux, coquilles, feuilles. La production des briquettes à partir de ces déchets agricoles est la plus répandue dans le monde et s'est amplifiée au cours de ces vingt dernières années surtout dans les pays en voie de développement à fort potentiel agricole [8, 9, 11, 29-35].

Pour sélectionner les résidus pour la production de briquettes, outre leur disponibilité, il est important de prendre en compte leurs caractéristiques. Étant donné la grande variabilité des types de déchets, il est difficile d'analyser leur impact sur la qualité des briquettes de manière systématique [36]. Une briquette qui brûle efficacement et de bonne qualité dépend d'une teneur en humidité, en matières volatiles et en cendres faibles avec une teneur en carbone fixe élevée des résidus (ces caractéristiques sont explicitées à la section 1.1.5) .

2. Séchage des déchets

Le but du séchage est d'évacuer l'eau contenue dans les déchets.

Pour les matières peu humides telles que les coques de noix de coco, les feuilles de maïs, on peut effectuer un séchage au soleil ou utiliser un séchoir [8, 9].

- Séchage au soleil

Sur un espace propre, sec et bien ensoleillé, étaler la matière première ; une fois la matière sèche, la conduire vers le carbonisateur pour la prochaine étape. Il est à noter que l'intermittence du soleil est une contrainte pour le séchage des déchets ; on peut donc également avoir recours à un séchoir.

- Séchage à l'aide d'un séchoir

Un séchoir est un dispositif servant à déshydrater des objets. Il est possible d'imposer une température de séchage à l'équipement, ceci en fonction de la matière à sécher. C'est un équipement qui permet d'accélérer et de contrôler le temps et la température de séchage.

Pour les matières contenant une grande quantité d'eau comme les pelures d'ananas, on utilise un hacheur-presseur afin de priver le déchet d'une bonne partie de sa quantité d'eau avant de lui faire subir une opération de séchage plus rapide. Une fois débarrassé d'une bonne quantité d'eau, la matière peut être mise soit au soleil soit dans un séchoir [8, 9, 33, 35]. La figure 1.4 montre quelques déchets agricoles séchés.



FIGURE 1.4 – Quelques exemples de déchets séchés (de la gauche vers la droite, déchets de rotin, bagasse de canne à sucre, coques de noix de coco et pelures d'ananas) [31, 34]

À la fin du séchage, les déchets doivent avoir un taux d'humidité inférieur à 12% afin de rentabiliser l'étape suivante du processus de production de briquettes qui est la carbonisation.

3. Carbonisation

C'est une étape très importante du processus de production du charbon vert qui consiste à provoquer la décomposition chimique de la matière première par l'action de la chaleur afin d'obtenir un produit composé majoritairement de carbone.

Les résidus secs sont généralement disposés dans des fours (fûts surmontés de cheminées comme le montre la figure 1.5) et brûlés jusqu'à ce qu'ils se transforment en solides complètement noirs.



FIGURE 1.5 – Four de carbonisation [14]

Cette opération peut durer 20 minutes pour les déchets légers et une heure trente minutes environ pour les déchets lourds [11].

4. Broyage

Le but de cette étape est de réduire en poudre le produit carbonisé ; Il est conseillé de broyer la biomasse carbonisée jusqu'à une taille de particule inférieure à $5\mu\text{m}$ [11]. Cette étape doit être bien articulée pour faciliter le malaxage de la poudre noire obtenue. La figure 1.6 présente l'image d'un type de broyeur électrique généralement utilisé.



FIGURE 1.6 – Broyeur

5. Malaxage avec ajout de liant

Le malaxage consiste à lier les particules de la poudre obtenue après broyage. Cette opération se fait à l'aide d'un liant et d'un malaxeur [35]. La figure 1.7 présente l'image d'un malaxeur fonctionnant avec un moteur thermique



FIGURE 1.7 – Malaxeur

Un liant est un élément non cassant, souple, élastique, propre à lier. C'est un

produit dont le rôle est d'assurer la cohésion entre deux autres produits difficilement miscibles. Les liants les plus utilisés dans la production du charbon écologique sont : l'amidon, la gomme arabique, la mélasse et l'argile [8, 9].

L'amidon : C'est une fécule qu'on retire de la pomme de terre, de l'orge, du blé ou du manioc. Dans ce cas de production du charbon écologique, il est retiré des tubercules de manioc. C'est le plus utilisé car facilement accessible.

La gomme arabique : C'est une gomme alimentaire extraite de la sève d'acacia ; acacia étant un genre d'arbres et arbustes appartenant à la famille monoparentale des fabacées (sous famille des Mimosoidées), qui possèdent des aiguillons.

La mélasse : C'est un résidu visqueux du sucre après son extraction et sa cristallisation.

L'argile : C'est une terre blanchâtre, douce au toucher, composée principalement de silicate d'alumine hydraté.

6. Compactage

Le compactage permet de donner la forme finale au charbon vert. On distingue généralement la forme parallélépipédique, cylindrique ou sphérique (boule). Pour cela on peut utiliser un compacteur comme celui présenté à la figure 1.8.



FIGURE 1.8 – Moule d'un compacteur [14]

On procède de la façon suivante [11, 30, 35] :

- Introduire la pâte, produit du malaxage, dans le moule du compacteur ;
- Selon le fonctionnement du compacteur utilisé, soumettre le charbon à une forte pression jusqu'à ce qu'elle soit bien compressée ;
- Enlever du moule les briquettes ou boulets obtenus et les préparer pour le séchage.

Il est important de noter que lorsque le charbon produit est peu dense car peu comprimé, il brûle avec une grande vitesse et se consume donc très rapidement. De ce fait, le compactage influe directement sur la vitesse de combustion [37]. Une fois que le charbon a été compacté, une partie de l'eau introduite lors de l'étape de malaxage est encore présente et élevée ; donc il y a lieu de le sécher.

7. Séchage des briquettes ou boulets de charbon

Cette étape consiste à sécher au soleil ou à l'aide d'un séchoir le produit final, ceci afin de faciliter sa combustion. En effet, c'est l'eau introduite à l'étape d'alliage que l'on veut éliminer. Pour libérer une bonne quantité d'énergie lors de sa combustion le charbon vert devrait avoir un taux d'humidité inférieur à 10 [34, 35]. La figure 1.9 illustre la façon dont les briquettes de charbon vert peuvent être disposées sur des claies en vue du séchage final .



FIGURE 1.9 – Séchage des briquettes [14]

1.1.3 Applications des briquettes

Les briquettes sont utilisées à des fins industrielles et domestiques. Elles sont généralement utilisées en complément et en remplacement au bois de chauffage, charbon de bois et autres combustibles solides. On les retrouve notamment en cogénération, cuisson, production d'eau chaude sanitaire, production d'électricité, production de la vapeur et pyrolyse [36].

1.1.4 Avantages et inconvénients du charbon écologique

L'utilisation du charbon écologique dans les ménages présente de nombreux avantages et quelques inconvénients. Le charbon écologique est un moyen de lutte contre les changements climatiques et apporte une solution énergétique alternative aux énergies fossiles et contre le déboisement anarchique pour l'usage du bois et du charbon de bois. Il a comme autre avantage qu'il ne produit pas de fumées lors de la combustion, portent l'espoir d'une facture nettement moins élevée pour les foyers démunis, permettent une cuisson efficace, favorisent le recyclage des déchets et offre une opportunité pour l'emploi des

jeunes [14, 31]. Les inconvénients du charbon vert sont qu'il ne peut être récupéré une fois allumé, il a un temps d'allumage relativement long, il résiste difficilement au contact de l'eau [11, 30].

1.1.5 Caractérisation des briquettes de charbon écologique

La caractérisation d'un combustible est la mise en œuvre d'un ensemble de techniques et méthodes qui aboutissent à la détermination des caractéristiques permettant d'apprécier ses performances énergétiques. Elle permet d'analyser la possibilité de leur utilisation en combustion et consiste à faire l'analyse proximale, élémentaire, énergétique, physique et thermogravimétrique.

Analyse Proximale

L'analyse proximale se fait à travers une procédure standardisée qui s'attèle à quantifier les caractéristiques physiques clés du combustible, qui influent sur ses combustion. Pour ce faire, on considère que la biomasse est composée de quatre éléments principaux : la teneur en humidité, les matières volatiles, les cendres et le carbone fixe. Dans cette section, une brève description de chacun de ces composants est donnée, comment chacun d'eux est trouvé, et leur signification.

— Taux d'Humidité (TH)

La teneur en humidité est une mesure de la quantité d'eau contenue dans le combustible. Dans les combustibles solides, l'humidité peut exister sous deux formes : l'eau libre dans les pores, les interstices du combustible, et sous forme d'eau liée qui fait partie de la structure chimique du matériau. La teneur en humidité est une propriété très importante qui peut affecter considérablement les caractéristiques de combustion de la biomasse de briquettes [38]. Elle affecte à la fois l'évolution de la température interne du solide, en raison de l'évaporation endothermique, et l'énergie totale nécessaire pour porter le solide à la température de pyrolyse. Pendant la combustion, l'humidité de la briquette absorbera de la chaleur par vaporisation et chauffage de la vapeur résultante, ce qui réduira de manière significative les émissions de gaz à effet de serre. de la vapeur résultante, ce qui réduit considérablement le pouvoir calorifique d'un combustible donné. Une teneur élevée en humidité peut également entraîner des difficultés d'allumage [11, 30, 36]. De plus, la limite d'humidité pour une combustion autoportante, au-delà de laquelle il n'y a pas assez d'énergie libérée pour évaporer le combustible et chauffer la matière à la température de pyrolyse est de 65 % sur une base humide pour la plupart des combustibles issus de la biomasse ; il est recommandée un taux d'humidité compris entre 5% et 10% pour les briquettes de charbon écologique [158]. Des normes de caractérisation sont généralement utilisées pour la détermination du taux d'humidité.

dité telles que les normes ASTM D2444-16, ISO 18 134-1 ou CEN 14 474. [39-41]. Le matériel nécessaire est généralement constitué d'un analyseur thermogravimétrique, d'un four et d'une balance numérique.

Le mode opératoire est le suivant : Tout d'abord peser le plat vide m_1 , ensuite remplir avec au moins 300 g (2 à 5 cm d'épaisseur selon le plat), peser avant le séchage m_2 , positionner le plat + la matière dans l'étuve et attendre environ 12h, peser le plat avec l'échantillon après le séchage m_3 , remettre dans l'étuve et attendre 1 heure de plus, Peser le plat avec l'échantillon après le séchage m_0 si m_3 et m_0 ont moins de 0.1g près de différence, noter la masse m_3 .

— Taux de Matières Volatiles (TMV)

La matière volatile représente l'ensemble des composés de carbone, d'hydrogène et d'oxygène présents dans la biomasse qui, une fois chauffés, se transforment en vapeur, généralement un mélange d'hydrocarbures à chaîne courte et longue. Elle peut être déterminée en chauffant un échantillon de biomasse séché et broyé de la biomasse dans un four à 900°C pendant 7 minutes [38]. La quantité de matières volatiles dans la biomasse peut alors être calculée en pourcentage de la perte de poids de l'échantillon. Les briquettes a généralement une teneur en matières volatiles d'environ 70-86 % du poids de la biomasse sèche, par rapport au charbon, qui ne contient qu'environ 35 % de matières volatiles. Il a été démontré que la teneur en matières volatiles influence le comportement thermique du combustible solide et les briquettes ont une faible teneur en substances volatiles, ce qui entraîne une combustion lente.

Les normes de caractérisation généralement utilisées pour la détermination du taux d'humidité sont les normes ASTM 3175-18, ISO 18 123-1 ou CEN 15 148. [40, 42]. Le matériel nécessaire est généralement constitué d'un four et d'une balance numérique. Le taux de matières volatiles peut être déterminé en pesant 2 g de l'échantillon de briquette dans un creuset et en le plaçant dans un four jusqu'à l'obtention d'un poids constant. Les briquettes ont ensuite été conservées dans un four à une température de 550 C pendant 10 min et pesées après refroidissement dans un dessiccateur.

— Taux de Cendre (TC)

Les cendres constituent le composant non combustible des briquettes : plus la teneur en cendres d'un combustible est élevée, plus son pouvoir calorifique est faible. Elles sont à la fois formées de matières minérales liées à la structure du carbone de la biomasse pendant sa combustion. Les cendres sont connues comme

étant à l'origine des problèmes dans les systèmes de combustion, notamment en raison de la scorification et de l'encrassement, et de sa tendance à augmenter le taux de corrosion du métal dans le système [11, 35]. Divers indices empiriques ont été développés pour essayer de quantifier ce phénomène indésirable en le reliant à la composition des combustibles. Ces indices qui concernent principalement des combustibles tels que le charbon, se sont avérés d'une valeur limitée pour la biomasse. Toutefois, lorsque des combustibles à forte teneur en cendres sont brûlés dans des fourneaux, les cendres résiduelles, si elles ne sont pas en grande partie éliminées, auront un effet négatif sur le flux d'air propre dans le fourneau. Il convient d'en tenir compte lors de la conception du fourneau, de manière à ce que ses performances ne soient pas sensiblement réduites en raison du manque d'air [43]. D'autre part, une fine couche de cendres facilite la distribution et le préchauffage de l'air entrant, ce qui améliore l'efficacité de la combustion ; le taux de matières volatiles des briquettes est généralement entre 9,4 % et 22,1 % [23]. Une méthode de détermination du taux de cendre selon la norme CEN 14 775 consiste à incinérer complètement un échantillon jusqu'à obtention des cendres blanches dans un four à moufle réglé à 550°C. Pour cela, les creusets en porcelaine contenant les échantillons issus de l'étuvage à 105°C M_2 sont placés dans le four. Après incinération pendant 24 heures, les creusets sont retirés du four à l'aide des pinces, puis refroidis dans l'atmosphère d'un dessiccateur et pesés M_3 . On peut également déterminer le taux de cendre avec les normes ASTM D 3174-12 et ISO 18 122 [44, 45].

— Taux de Carbone Fixe (TCF)

Une fois que les volatiles et l'humidité ont été libérés, il reste les cendres et le carbone fixe [33, 34]. La proportion relative de substances volatiles, d'humidité, de carbone fixe et de cendres est souvent citée pour les combustibles issus de la biomasse [11, 36].

En clair, le carbone fixe d'un combustible est le pourcentage de carbone disponible pour la combustion du charbon. Il n'est pas égal à la quantité totale de carbone dans le combustible (le carbone ultime) car une quantité importante est également libérée sous forme d'hydrocarbures dans les volatiles. Le carbone fixe donne une indication de la proportion de charbon qui reste après la phase de dévolatilisation.

Analyse élémentaire

L'analyse élémentaire consiste à évaluer les éléments chimiques importants qui composent la briquette de charbon écologique, à savoir le carbone (C), l'hydrogène (H), l'oxygène (O), l'azote (N) et le soufre (S). La méthode de base pour réaliser une analyse ultime

consiste à brûler un échantillon de biomasse dans un creuset en platine, dans un courant d'air, pour produire du dioxyde de carbone et de l'eau. La détermination des éléments chimiques peut se faire par expérimentation à travers les normes ASTM 3176-15, ISO 16 948 en utilisant l'analyseur d'élément atomique ou le spectromètre d'émission atomique ou alors de façon empirique. L'analyse de la biomasse selon cette méthode révèle que le principal constituant est le carbone, qui représente entre 30 et 60 % de la matière sèche [34, 36]. Ensuite, 30 à 40 % sont constitués d'oxygène. L'hydrogène est le troisième constituant principal, représentant entre environ 5-6% [36]. En général, l'azote et le soufre (et le chlore) représentent normalement moins de 1 % de la biomasse sèche [36, 38]. La composition résultante de la biomasse affecte ses caractéristiques de combustion. La diminution de la masse totale globale du combustible pendant la phase de combustion volatile de la combustion est accrue lorsque le rapport hydrogène/carbone du combustible augmente, et, bien que dans une moindre mesure, lorsque le rapport oxygène/carbone augmente.

Pouvoir Calorifique

Le pouvoir calorifique est une mesure standard du contenu énergétique d'un combustible. Il est défini comme la quantité de chaleur dégagée lors de la combustion complète d'une unité de masse de combustible et du refroidissement des produits de combustion à 298 K [36]. Lorsque la latente de condensation de l'eau est incluse dans le pouvoir calorifique, on parle de Pouvoir Calorifique Supérieur (PCS). Cependant, toute l'humidité contenue dans le combustible et qui se forme lors du processus de combustion est emportée sous forme de vapeur d'eau, et sa chaleur n'est donc pas disponible. Il est donc utile de soustraire la chaleur de condensation de cette eau du pouvoir calorifique brut. Le résultat est connu sous le nom de Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI). En revanche, lorsque les combustibles contiennent des composés tels que hydrocarbures, qui ont un degré d'oxydation plus faible, cela tend à augmenter le pouvoir calorifique de la biomasse. C'est pour cette raison que les combustibles issus de la biomasse, dans lesquels le carbone est présent sous une forme partiellement oxydée, ont un pouvoir calorifique supérieur. le carbone est présent sous une forme partiellement oxydée, avec un pouvoir calorifique inférieur à celui du charbon de bois.

Le principe de la méthode décrite par la norme NF M 03-005 [36, 46] qui aboutit à la détermination du pouvoir calorifique supérieur à température ambiante et à la pression atmosphérique.

Les mesures sont généralement réalisées dans une bombe calorimétrique. Un échantillon est placé dans une coupelle de 25 mm de diamètre et d'une hauteur de 14 à 19 mm. La combustion est déclenchée électriquement généralement par un fil de tungstène.

La mesure s'opère de la façon suivante : Dans un premier temps, l'appareillage est étalonné avec une pastille d'acide benzoïque. La masse en eau est déterminée (bombe calorimétrique et calorimètre). Les échantillons sont broyés pour avoir une granulométrie

inférieure à 0.2 mm, ils sont ensuite pesés à 0.1 mg près. L'échantillon est placé dans la coupelle, la bombe calorimétrique est chargée en oxygène à une pression de 25 bars. La combustion est déclenchée électriquement. Un suivi de la température d'eau est effectué toutes les trente secondes avant et après la combustion jusqu'à l'obtention d'un régime linéaire de refroidissement. À la suite de ces mesures, la bombe calorimétrique est démontée pour vérifier que la combustion est complète (ni dépôt de suie, ni carbone résiduel). La bombe est ensuite rincée avec de l'eau distillée pour récolter les divers acides produits par la combustion [38].

Masse volumique apparente

La masse volumique apparente est une propriété importante du combustible solide. Les combustibles à haute densité sont souhaitables en termes de transport, de stockage et de manutention. La masse volumique apparente des briquettes peut être déterminée à partir du calcul du rapport entre la masse et le volume de la briquette, conformément à la méthode proposée par Ademe [47]. Le matériel nécessaire est constitué de balance et de pied à coulisse numérique. Le volume est calculé en prenant les dimensions linéaires (longueur, largeur et épaisseur) de la briquette.

Analyse ThermoGravimétrique

L'analyse thermogravimétrique (ATG) est l'une des meilleures méthodes de caractérisation de la biomasse parmi les nombreuses approches d'analyse thermique disponibles, comme le décrit [48]. Elle est généralement effectuée dans un atmosphère contrôlé, il s'agit d'une méthode de détermination de la masse d'un échantillon en fonction de la température, qui est considérée comme très rapide pour examiner les combustibles solides, les matières premières solides telles que le charbon et le bois pendant le processus de combustion et de pyrolyse [49, 50].

Les briquettes de charbon vert peuvent être produites à travers le processus conventionnel décrit ci-dessus à base d'une multitude de résidus. Il est nécessaire d'analyser les caractéristiques dudit charbon une fois qu'il est produit afin d'apprécier sa qualité.

1.2 Situation énergétique des ménages au Cameroun et apport de la biomasse agricole

1.2.1 Contexte général

Présentation générale du Cameroun

Le Cameroun est un pays d'Afrique subsaharienne, situé dans la sous-région Afrique Centrale, dans le Golfe de Guinée entre 3°40'- 4° 11' Nord d'une part et 9° 16' - 9° 52' Est d'autre part. D'une superficie totale de 475 650 km², dont 466 050 km² terrestres

et 9 600 km^2 maritimes, le Cameroun est limité au Nord par le Lac Tchad, au Nord-Est par la République du Tchad, à l'Est par la République Centrafricaine, au Sud par la République du Congo, la République Gabonaise et la République de Guinée équatoriale, à l'Ouest par la République Fédérale du Nigeria comme l'illustre la figure 1.10. Avec une population estimée à 24,628 millions de personnes à la fin de l'année 2018, le Cameroun est le pays le plus peuplé d'Afrique centrale [2]. Plus de 60% de la population active est employée dans l'agriculture, le secteur agricole est essentiel à l'économie du pays ; les principaux produits agricoles sont le café, le coton, le maïs, le palmier à huile, la canne à sucre et la banane/plantain [3].

Le Cameroun dispose d'énormes ressources énergétiques en l'occurrence en hydroélectricité, en énergies renouvelables et modestes en hydrocarbures. En 2014, La production d'électricité se répartissait en 73 % d'hydroélectricité, 1 % de biomasse et 25,7 % de combustibles fossiles (pétrole 12,8 % et gaz naturel 12,9 %) [2].

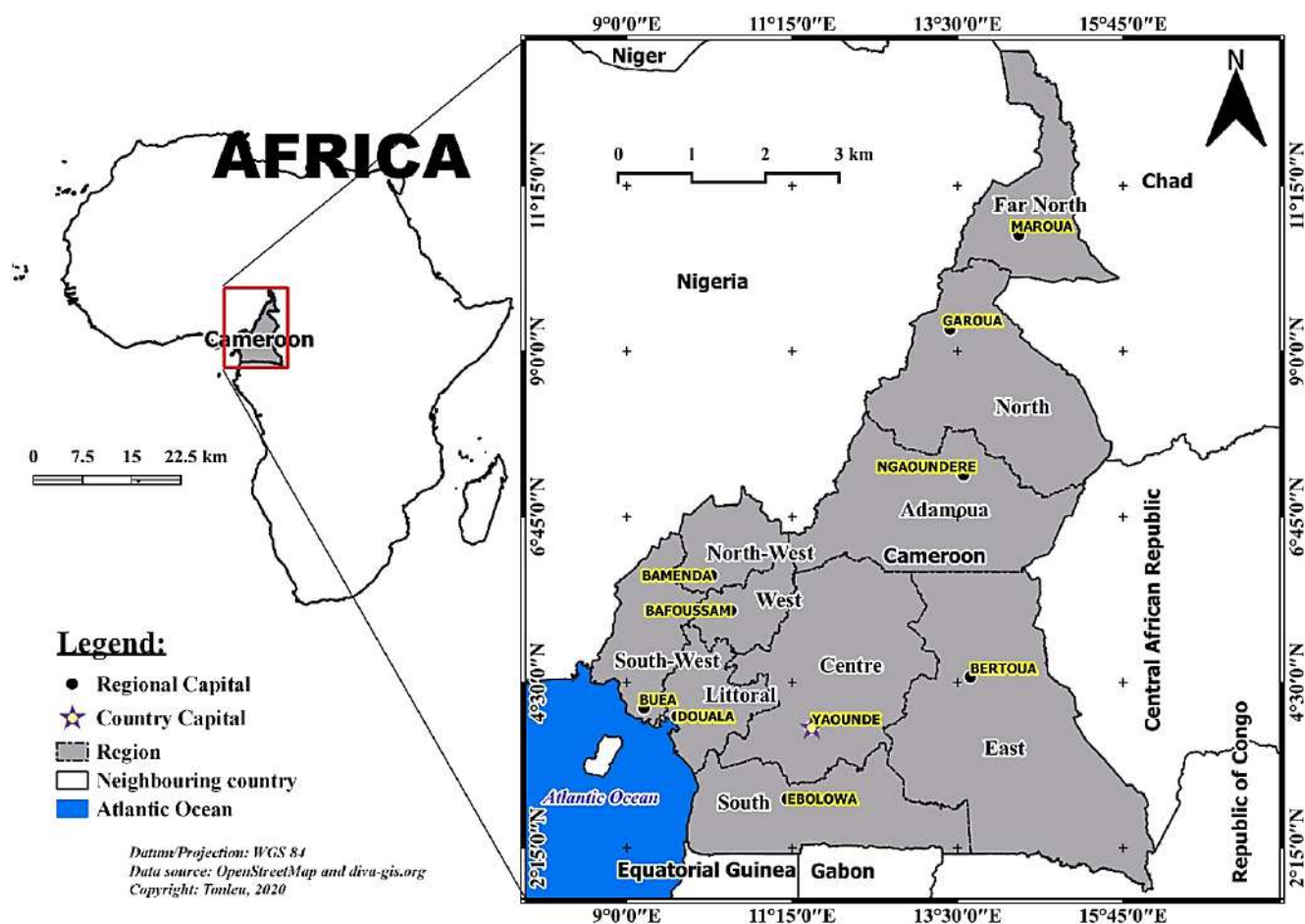


FIGURE 1.10 – Carte du Cameroun [2]

Situation de la biomasse au Cameroun

Le Cameroun doté d'un important potentiel énergétique de biomasse est classé au 3^e rang des potentiels de biomasse en Afrique subsaharienne évalué avec environ 21 millions

de tonnes par an [51, 52]. Ces biomasses désignent les matières biologiques dérivées d'organismes vivants ou morts tels que les plantes, les déchets ménagers, le bois et résidus agricoles [53]. Des études récentes montrent que le taux de production moyen national de déchets solides est de 0,6 kg par habitant et par jour avec un pourcentage de 51 à 77,40 % de matières organiques [54]. Par ailleurs, le Cameroun est un pays agricole et une partie importante de son potentiel de biomasse provient de l'agro-industrie [55]. Le secteur agricole camerounais est essentiel pour l'économie du pays, les résidus agricoles tels que les enveloppes, les cabosses, les tiges, les coquilles et les tiges ont un potentiel énergétique élevé et sont définis comme des sous-produits de la biomasse provenant des systèmes agricoles. Une partie mineure de ces résidus est utilisée comme engrais dans les champs, pour limiter l'érosion des sols ou comme litière dans les poulaillers, mais la partie la plus importante de ces résidus n'est ni traitée ni recyclée de manière efficace. Certains ménages ruraux comptent sur les résidus agricoles pour la cuisson, le chauffage. Mais la combustion directe de ces résidus de biomasse est peu efficace, elle appauvrit considérablement l'environnement et a un impact négatif sur la santé de ses utilisateurs [56].

En 2010, le Ministère de l'Énergie et de l'Eau (MINEE) a estimé que la consommation d'énergie issue de la biomasse se répartit comme suit : bois de feu (91,18 %), charbon de bois (0,97 %), bagasse et coques de palmier (5,39 %) et autres déchets (2,45 %). autres déchets (2,45 %) [58]. Le bois de chauffage qui était facilement accessible, disponible et présent derrière les cuisines surtout dans la zone tropicale du pays est désormais devenu rare. Aujourd'hui, il faut parcourir plusieurs kilomètres (2-3 km en zone tropicale et 25-45 km en zone sahélienne) pour aller chercher du bois de chauffage [58].

Situation des ménages au Cameroun

En 2011, le Cameroun comptait 4 705 000 ménages soit 2 451 000 en zone urbaine, et 2 254 000 en zone rurale [3]. Sur le plan national, la taille moyenne d'un ménage est de 4,4 personnes, cette taille est restée quasiment stable depuis 2005. Selon Eyinga Dimi et al. et Mabada Joel, [59, 60] le standing des ménages peut être classifié en trois catégories : les ménages pauvres, les ménages modérés et les ménages riches. Les ménages pauvres représentent 36% tandis que 39,5% sont modérés et 24,5% sont riches. L'année 2011 a été marquée par une accélération des tensions inflationnistes au niveau général des prix. En effet, les prix à la consommation finale des ménages ont crû de 2,9% au cours de l'année 2011. La hausse des prix est principalement due au renchérissement des produits alimentaires (+4,8%) et à une remontée des prix relatifs à l'alimentation (+4,1%) [3, 60]. Parmi les produits relatifs à l'alimentation des ménages, il y'a entre autres les combustibles utilisés pour la cuisson des denrées alimentaires. Sur l'ensemble du territoire national, les combustibles de cuisson les plus utilisés sont le bois de chauffe, le charbon de bois et le GPL. Selon les données de l'Institut National de la Statistique du Cameroun et le dernier recensement, les besoins énergétiques d'un ménage moyen sont estimés à 950 kWh par an [3]. Les principales sources d'énergie utilisées par les ménages

camerounais sont le bois d'énergie, le kérosène, le gaz de pétrole liquéfié et l'électricité.

Le bois de chauffage est généralement brûlé dans un feu traditionnel à 3 pierres (comme illustré à la fig. 1.11(a)). Il est constitué de trois pierres de taille similaire sur lesquelles une marmite est placée au-dessus d'un feu. Les pierres généralement une hauteur de 15 à 30 cm [61], sont positionnées de manière à ce que la marmite puisse être soutenue. La combustion du feu à trois pierres étant incomplète et incontrôlée, un nombre important de particules et de gaz sont libérés directement dans la zone de cuisson. La fig. 1.11(b) montre les fours de cuisine courants utilisés pour la combustion du charbon de bois ; ils coûtent en moyenne 6500 XAF sur le marché camerounais.



FIGURE 1.11 – Fours utilisés dans les ménages

Le GPL est brûlé dans une cuisinière à gaz (voir fig. 1.11(c)). Le gaz sous pression provenant d'une bouteille de gaz passe par le régulateur et le tuyau flexible avant d'arriver au bouton de commande. La bouteille de gaz rechargeable est vendue sur le marché local au prix approximatif de 30 000 XAF, la plaque de gaz à 12 000 XAF minimum et une recharge de gaz de 12,5 kg coûte environ 6 500 XAF.

Bien que le GPL, du bois de chauffe et du charbon de bois sont plus utilisés, les ménages camerounais intègrent progressivement les briquettes de charbon écologique. Ces briquettes sont fournies par certaines unités de production éparpillées dans le pays.

1.2.2 Politique et cadre institutionnel de la promotion du charbon écologique au Cameroun

Les acteurs de la production de briquettes ne semblent pas être suffisamment soutenus par les pouvoirs publics. Peu d'entrepreneurs dans ce domaine reçoivent des subventions partielles. On peut d'ailleurs faire le constat selon lequel, les unités qui bénéficient des

subventions ont une taille plus grande et une production annuelle plus importante ; globalement elles éprouvent moins de difficultés que les autres. Il se confirme donc que la conversion agricole en briquettes devrait être intégrée dans la politique énergétique du Cameroun. Jusqu'à la signature du rapport de la Stratégie Nationale de Développement (SND) [62] en 2020, il n'y avait pas de directives précises pour les énergies renouvelables au Cameroun, encore moins pour la gestion et l'utilisation de la biomasse comme source d'énergie.

Toutes les institutions gouvernementales sont pourtant en place et leurs responsabilités sont clairement définies. Le Ministère de l'Énergie et de l'eau (MINEE) est sensé s'occuper de la mise en œuvre et de la coordination des activités liées au secteur de l'énergie. Le ministère de l'Environnement, de la Protection de la nature et du Développement Durable (MINEPDED) doit promouvoir le développement durable. Le Ministère de la Recherche Scientifique de la Recherche Scientifique et de l'Innovation (MINRESI) doit coordonner la recherche dans le domaine des énergies propres et renouvelables. Le Ministère des Finances (MINFI) devrait offrir un soutien financier aux développeurs de projets et réduire les taxes. Et le Ministère de l'Économie, de la Planification et de l'Aménagement du Territoire (MINEPAT) devrait accompagner et encourager les communautés locales dans l'entrepreneuriat. Il serait intéressant que toutes ces institutions examinent la disponibilité et la variété de cet important potentiel lors de la prise de décision et de la définition de politiques et lois sur les énergies renouvelables, en l'occurrence la biomasse. La Banque Africaine de Développement (BAD) devrait également soutenir le secteur de l'énergie de la biomasse afin d'attirer les investissements comme cela se fait dans le secteur de l'électricité. La Banque mondiale, par le biais du Rural Energy Fund, a prévu d'augmenter de manière significative l'utilisation de la bioénergie dans les zones rurales au Cameroun et de mettre en œuvre des microprojets pilotes de lutte contre la pauvreté énergétique. Une partie des fonds peut être allouée au financement de projets liés à la production de briquettes.

1.2.3 État des lieux de la production du charbon écologique au Cameroun

Depuis une dizaine d'années des unités de production de briquettes de charbon écologique se sont installées au Cameroun. Cette section fournit une vue globale du protocole et de la technologie utilisée par les unités au Cameroun pour la production des briquettes de charbon écologique. Une quinzaine d'unités de production de briquettes sont localisées au Cameroun comme l'illustre la figure [1.12](#).

Les acteurs de la production des briquettes sont des personnes de sexe masculin pour la plupart dont l'âge varie entre 25 et 45 ans. Ces jeunes entrepreneurs sont motivés par la volonté de combattre le phénomène de changement climatique, de protéger la mangrove contre la disparition de certaines espèces animal et plus particulièrement limiter les coupes abusives du bois pour le chauffage et la cuisson et contribuer à l'aménagement des espaces urbains propres.



FIGURE 1.12 – Localisation des producteurs

Matériels et Méthodes de production

— Collecte de la matière première

Les unités de production utilisent généralement comme matières premières les rafles

et peaux de maïs, coque et bourre de noix de palme / coco, les peaux de banane /plantain, les poussières de charbon de bois, le rotin, les bagasses de canne à sucre entre autres. Le processus classique de fabrication suit rigoureusement et successivement les sept grandes étapes de production. la moyenne des matières premières collectées par an est de 10 tonnes. Après la collecte, les déchets sont généralement séchés à température ambiante lorsqu'ils sont légers et à l'aide d'un séchoir lorsqu'ils sont lourds.

— La carbonisation

Les producteurs utilisent en général des fûts de carbonisation ou un carbonisateur semi-industriel. Cependant, certaines d'entre elles se procurent des résidus déjà carbonisés, et partant, elles ne disposent pas de carbonisateurs. La figure [1.13](#) montre les types de carbonisateurs rencontrés dans les unités de production



FIGURE 1.13 – Carbonisateurs

— Le broyage

Contrairement à la plupart des pays en voie de développement, les producteurs de briquettes de charbon vert au Cameroun utilisent tous des broyeurs à marteaux industriel de type électrique avec une puissance variant de **0,5kW à 15kW**, la taille des particules après broyage est de l'ordre de 2 à 3 micromètres pour la plupart. La figure [1.14](#) illustre les technologies de broyeurs qu'on retrouve au Cameroun.



FIGURE 1.14 – Technologies de broyage

- **Malaxage avec ajout de liant** Le malaxage de la poudre de charbon avec le liant se fait soit avec les mains, la pelle, le malaxeur cylindrique ou à marte ou la bétonnière. Au Cameroun, la plupart des unités de production utilisent l'amidon de manioc à cause de sa disponibilité, ils peuvent soit acheter à des coût très faible soit les ramasser dans les marchés. D'autres utilisent la mélasse de canne à sucre ou l'écorce gluar (disponible uniquement au nord Cameroun). La figure 1.15 illustre le type de malaxeurs rencontrés dans les unités de production.



FIGURE 1.15 – Technologies de malaxage

- **Le Compactage**

Le Compactage de mélange se fait dans des compacteurs manuels à cricque, des compacteurs électrique avec un puissance variant entre 25CV et 60 CV comme illustre la figure 1.16. Certaines entreprises utilisent les mains ou les boites de lait pour faire le compactage.



FIGURE 1.16 – Technologies de compactage

- **Séchage des briquettes**

le Cameroun rencontre un très grand problèmes dans le séchage des briquettes de charbon écologique, la plupart des entreprises font le séchage au soleil; les briquettes étant étalées sur des claies pouvant contenir en moyenne 30 briquettes de $6cm^3$ pour la plupart. Cependant d'autres utilisent des séchoirs à charbon ou électrique pour le séchage mais ces séchoirs n'ont pas des rendements optimaux. On peut observer sur la figure 1.17 la manière dont le séchage des briquettes se fait dans les unités de production au Cameroun.



FIGURE 1.17 – Technologies et modes de séchage

— Conditionnement des briquettes

Au Cameroun la forme des briquettes de charbon varie du cylindrique au parallélépipédique pour la plupart et aux boules pour certain. Ce charbon est conditionné dans des emballages papiers ou plastique de 1 kg, 5 kg ou dans des sacs de 40 kg comme le montre le figure 1.18. Le prix du kilogramme varie entre 150 FCFA et 300 FCFA selon les zones. Certains producteurs vendent uniquement au ménage à proximité de l'unité de production pendant que d'autres vendent à des grossistes et restaurants.



FIGURE 1.18 – Méthodes de conditionnement

1.3 État de l'art sur l'évaluation du potentiel de la biomasse agricole, la production, la caractérisation et l'analyse économique des briquettes

Au cours de ces deux dernières décennies les briquettes de charbon écologique ont fait l'objet de nombreuses études scientifiques. Ces recherches ont porté sur l'évaluation du potentiel de la biomasse, les défis et opportunités de la conversion de la biomasse en briquettes, les choix des résidus pour la production des briquettes et l'analyse économique de la production des briquettes. Des études ont également été menées sur le choix du liant utilisé lors de la production ainsi que sur l'analyse énergétique et économique de la

production et l'utilisation des briquettes.

1.3.1 Potentiel de la biomasse agricole

En prélude à l'exploitation de la biomasse agricole, une évaluation de la disponibilité et du potentiel de la dite biomasse a été faite dans de nombreux pays à potentiel agricole. En Italie, une méthode d'évaluation du potentiel énergétique de la biomasse agro-industrielle résiduelle pour la production d'électricité, de méthanol, de biodiesel et de méthane a été proposée [63]. En Croatie, N. Bilandzija et al. ont proposé d'introduire la biomasse agricole dans la "production croate d'énergie verte" afin de garantir la consommation d'énergie et de réduire les importations d'énergie [64]. En Turquie, le potentiel énergétique des résidus de biomasse agricole a été estimé considérable et il apparaît que les résidus agricoles sont suffisamment diversifiés et variés pour assurer la durabilité économique et environnementale de la Turquie [65]. Une vue globale des pays de l'Afrique subsaharienne a révélé que cette région du monde a un grand potentiel en raison de l'expansion de l'agriculture [66]. Lorsqu'on jette un regard particulier sur certains pays en développement comme l'Ouganda, on constate que le potentiel total de la biomasse est de 260 PJ par an [67] ; au Zimbabwe, ce potentiel énergétique est de 413,2 PJ par an [68] ; quant au Ghana, les résidus de biomasse sont diversifiés avec un potentiel annuel de 1718,7 MJ an ; cette biomasse peut être utilisée pour produire du biogaz et du liquide de première génération [69, 70]. Au Cameroun, il y'a un énorme potentiel de ressources renouvelables, même si la demande énergétique est importante [2, 71]. Inna Samnoussa et al. ont estimé le potentiel énergétique des déchets dérivés de certains produits alimentaires dans la partie septentrionale du pays à 11,5 TJ par an [72]. En 2018 , après des investigations sur la biomasse camerounaise, Mboumboue et al. ont montré que les quatre principales biomasses (résidus forestiers, résidus agricoles, résidus d'animaux et déchets solides municipaux) déchets) constituent un grand potentiel énergétique qui peut être valorisé par une conversion thermochimique et biochimique [73].

1.3.2 Choix des déchets et caractérisation des briquettes

La production scientifique sur le choix des déchets et la caractérisation des briquettes est assez fournie jusqu'à date. La présente section présente une synthèse des recherches antérieures.

Debdoubi et al dans leur article *Production of fuel briquettes from esparto partially pyrolyzed* [74] ont produit un combustible solide à partir de la biomasse la plus abondante du Maroc utilisée par la population locale, et en particulier en milieu rural, au lieu du bois de forêt. Cette étude a montré que des briquettes fortes peuvent être obtenues avec un pouvoir calorifique supérieur lorsque partiellement pyrolysé et une pression de densification relativement élevée est appliquée.

En 2007, Jindaporn et Songchai ont étudié les propriétés des briquettes de combustible

produites à partir de déchets solides municipaux et de résidus agricoles, c'est-à-dire du papier déchiqueté et des particules de noix de coco broyées au marteau [32]. Il a été conclu que des briquettes stables pourraient être formées à partir de ce mélange. L'étude des fumées montrent qu'elles contiennent des oxydes de carbone et des oxydes d'azote même si leurs teneurs ne sont pas significativement affectées par le mélange.

En 2009, Chou and al. ont examiné la préparation et la caractérisation de la briquette de combustible solide, qui a été faite à partir de paille de riz et son de riz [29]. Il ressort de ce travail que la température de compactage à chaud affecte fortement la résistance à la compression de la briquette. Par ailleurs lorsque le pourcentage du son de riz augmente, la résistance à la compression et le pouvoir calorifique de la briquette de biomasse augmentent. Plus intéressant encore, la thermo-énergie, qui sert à comprimer la briquette de la paille de riz, sera minimisé si un certain pourcentage du liant (tel que le son de riz, la sciure de bois ou les autres déchets de biomasse) est mélangé avec la paille de riz écrasée.

L'année suivante, en 2010 J.T Oladeji et al. [31] ont mené des recherche sur les propriétés des briquettes à base de tourteau de maïs et de balle de riz afin de déterminer lequel des résidus pourraient être utilisé de manière plus efficace et rationnelle comme combustible. Les résultats montrent que la briquette de maïs possède d'avantage d'attributs positifs de biocombustible que celle faite à la balle de riz. Il a une teneur en humidité modéré de 13,47 % , une densité supérieure de $650\text{kg}/\text{m}^3$ et une valeur calorifique de 20 890kJ/kg par rapport aux balles de riz qui est de 13 389kJ/kg. Alors que l'analyse des briquettes de déchets de noix de cajou donne un PCI de 25 700 kJ/kg selon [9].

Panwar and al. [75] ont utilisé quatre types de biomasses (feuilles de mangue, feuilles d'eucalyptus, paille de blé et sciure de bois) pour fabriquer des briquettes. La caractérisation physicochimique et thermochimique des résidus de biomasse a été réalisée en utilisant des méthodes standard. Une presse hydraulique et une machine d'essai de compression automatique a été utilisée pour le briquetage et les essais. L'effet de divers paramètres, tels que la pression de compression, le taux d'application de la pression, le temps de maintien, la taille des particules et la teneur en humidité, sur la densité des briquettes a été étudié. Un test de résistance aux chocs a été réalisé en utilisant la méthode standard ASTM. Toutes les briquettes préparées à partir de la biomasse étudiée dans cet article ont un pouvoir calorifique supérieur ; ainsi, ils peuvent être utilisés comme alternative au charbon et au bois de chauffage. Une autre étude analyse les paramètres des briquettes densifiées à base de feuilles de bananiers semi-séchées montrent une teneur en humidité de 7,2%, Une teneur en carbone de 44,3 %, une teneur en composés organiques volatils de 75,5 % et un PCI 17 700 kJ/kg [76].

Nwabue et al. [77] ont déterminé les caractéristiques d'un combustible produit en respectant l'environnement. Il en ressort que le taux de cendres augmente avec le pourcentage de coke et de liants inorganiques. En 2020, Kouakou et Emeruwa [78] ont montré qu'on peut faire des briquettes avec de la sciure de bois pour résoudre le problème environnemental. Il a même été démontré qu'il est possible de faire du briquetage du coton

hydrothermal prétraité et sciure de bois mais à conditions d'être dans certaines conditions de température et de pression [79].

La biomasse forestière a également été expérimentée pour produire des briquettes ; il en ressort que les espèces *A. alpina* *Juliflora* sont éligibles pour la production du charbon écologique et offrent le meilleur PCI, ce qui est le cas pour la plupart des biomasses d'origines alpine. [80]. Dans un souci de régulation environnemental et de la vulgarisation des biocombustibles, le briquetage des déchets municipaux au BURUNDI montrent qu'on peut obtenir un PCI de 12,3-18,6 MJ/kg [81]. Anggoro Tri Mursito [82] fait l'expérimentation du briquetage du charbon de mauvaise qualité mélangée à la biomasse non carbonisée. Zhenkun Guo [83] ont fait une étude visant à analyser les caractéristiques des briquettes et l'état de la pollution lors de la combustion. Les résultats des expériences montrent que comparativement à la combustion de la biomasse les briquettes dégagent moins de Gaz à Effet de Serre.

De Oliveira Maiaa and al. [76] ont fait un travail dans le but de déterminer les propriétés physico-chimiques des briquettes faites à base de feuilles de bananiers. Les briquettes présentaient une teneur en humidité de 7,2%, hautes teneurs en carbone (44,3%) et matières volatiles (75,3%), faibles teneurs en soufre et azote et PCS de 17,7 MJ / kg. Les propriétés thermiques et physico-chimiques Les caractéristiques des briquettes de feuilles de bananier démontrent son potentiel d'utilisation comme combustible de biomasse.

Certaines caractérisations ont été faites par l'Analyse Thermogravimétrique (ATG). Dans la littérature, la plupart des travaux sur l'ATG des combustibles se concentrent sur les granulés [84, 85] où les matières premières de la biomasse telles que les déchets de coton, la paille de maïs, la balle de riz, la paille de soja, les peaux de banane, la tige de banane [86-88]. Cependant, quelques études sur l'ATG appliquée aux briquettes Lubwama et Yiga [89, 8] ont étudié le comportement de combustion de briquettes fabriquées à partir de balles de riz, de balles de café, de bagasse de canne à sucre et de coques d'arachide, et ont conclu que les briquettes formées peuvent être utilisées comme source d'énergie résidentielle et industrielle. Jianbiao Liu et al. ont étudié les propriétés des briquettes fabriquées à partir de paille de maïs en utilisant l'analyse thermogravimétrique et ont révélé que les briquettes de paille de maïs pourraient être une source d'énergie pour l'avenir [90]. Nyakuma et al. 2014 ont utilisé la recherche thermographique pour étudier les caractéristiques thermo-chimiques des briquettes à base de tronc de palmier à huile [91]. Le travail d'Ambedkar Balraj tente de produire des briquettes de biomasse-charbon sans avoir besoin d'éléments de liaison en combinant la biomasse avec des déchets fins de charbon. La briquette a été fabriquée à l'aide de la biomasse suivante (bagasse, coque d'arachide et copeaux de bois), l'ATG reconferme les caractéristiques de combustion spontanée de l'ensemble des volatiles et du carbone fixe [92].

1.3.3 Choix du liant

Les liants peuvent être ajoutés pendant le mélange de la matière première ou après la carbonisation de la matière première avant le compactage. Certains matériaux de biomasses ne s'agglomèrent pas, sauf avec l'ajout d'un liant surtout si une technique de compactage à basse pression est utilisée. L'ajout de liant à la matière première de la biomasse est une pratique de co-traitement, qui aide à la densification ou augmente les propriétés mécaniques ou thermiques du produit. L'ajout de liant permet de réduire l'usure des équipements de production. Il forme un pont pour renforcer la liaison interparticulaire avec les composants de la biomasse. La quantité de liant à ajouter dépend des propriétés de liaison de la matière première et de l'agent liant. Il existe trois types de liants utilisés pour la production de briquettes, à savoir les liants inorganiques, les liants organiques et les liants composés [93].

Les exemples courants de liants inorganiques comprennent l'argile, la chaux, le ciment, le plâtre et le silicate de sodium [93]. Les liants organiques quant à eux sont subdivisés en 3 catégories. Les liants de biomasse (la pâte de manioc, pâte de vieux papiers, mélasse, daube de vache, l'amidon), les liants à base de goudron, de poix et de bitume de pétrole, les liants à base de lignosulfonates et les liants polymères [94]. La combinaison de deux ou plusieurs liants, organiques et inorganiques, forme un liant composé. La résistance, la stabilité thermique, les performances de combustion et le coût de la briquette sont influencés par la qualité du liant [95]. Il existe certains avantages qu'un type de liant peut avoir par rapport à un autre en raison de ses composants matériels. Les briquettes résultant des liants inorganiques ont une plus grande résistance à la compression, le rapport de compactage et la nature hydrophobe sont plus élevés que ceux fabriqués avec un liant organique. Cependant, celles-ci présentent une augmentation de la teneur en cendres, de la température de combustion, et un pouvoir calorifique réduit [96, 97]. Pour une production efficace de combustible, le liant doit être plastique et élastique car son utilisation est connue pour améliorer la densité, la durabilité et la résistance au cisaillement [98]. Il a été largement rapporté que l'amidon de manioc est un matériau liant efficace : Lubwama et Sawadogo ont produit des briquettes aux propriétés satisfaisantes en utilisant ce liant [8].

1.3.4 État des lieux de la conversion de la biomasse en briquettes

À cause des propriétés intéressantes des briquettes de charbon écologique, certains investisseurs se sont progressivement installés et lancés dans leur production à travers le monde notamment dans les pays du sud du Sahara.

En 2009, un projet de mise en place de comité de valorisation des déchets en briquettes a été mis en place à Kahawa Soweto [14]. Le but de était de présenter la gestion des déchets solides comme un défi majeur pour de nombreuses autorités municipales dans les villes d'Afrique subsaharienne, où la croissance rapide, les changements sociaux et

culturels, la pauvreté généralisée, la faiblesse des capacités d'application locales et les ressources financières limitées contribuent tous à la dégradation de l'environnement et aux problèmes d'élimination des déchets. La formation des comités et sous-comités était axée sur la production, le marketing et la vente. Les règles et règlements pour la gestion de leur entreprise et un plan d'affaires utilisant des méthodes participatives ont également été abordées. Les briquettes de charbon ont été fabriquées à partir de déchets municipaux ; leur qualité a été évaluée de manière participative, en termes de pouvoir calorifique, de teneur en cendres, de teneur en humidité, de matières volatiles.

En 2013, une évaluation des opportunités, défis et perspectives pour la production des briquettes de charbon écologique en Afrique subsaharienne a montré qu'il est peu probable que l'adoption générale des briquettes de charbon écologique ait un effet significatif sur la demande de charbon en Afrique à l'état technologique actuelle comme cela a été le cas dans de nombreux pays asiatique [99].

Une enquête sur les techniques et les technologies de production de briquettes au Kenya a montré la fabrication de briquettes peut être faite par une industrie auto suffisante et partant, une attention devrait être accordée à l'introduction de la technologie de production de charbon écologique [100]. Cette étude permet par ailleurs de justifier que les domaines d'intervention comprennent la mise à disposition de la technologie appropriée, la création d'un réseau de travail entre les ingénieurs, les chercheurs et les producteurs, la facilitation de l'accès au capital et la transmission de compétences entrepreneuriales aux différents acteurs du secteur des briquettes. En plus de relever le défi de la gestion des déchets, le combustible en briquettes est efficace et la combustion des briquettes produit des émissions minimales de gaz à effet de serre, en particulier lorsqu'elles sont utilisées dans des espaces bien ventilés, par rapport aux autres combustibles locaux.

L'étude menée par Okey Francis et al. au Nigéria en 2014 [101] a montré que l'utilisation de la biomasse offre de nombreux avantages, dont celui d'être une matière première énergétique renouvelable et durable pour la production de combustible solide. On note des projets de développement des machines pour le briquetage de la biomasse au Nigeria, mais de nombreux échecs de fonctionnement des machines de production, y compris dans d'autres pays en voie de développement, ont empêché une production à grande échelle. Enfin, Okey montre que certains facteurs limitant la commercialisation du briquetage de la biomasse au Nigeria, notamment en ce qui concerne les machines à briqueter existantes. Les moyens de commercialiser la production de briquettes et son rôle dans le développement des moyens de subsistance ruraux peuvent être revus afin de rentabiliser l'activité.

1.3.5 Transition énergétique et intégration des briquettes dans les ménages

Des efforts continus dans le sens de l'adoption des combustibles de cuisson propres pour les ménages, sont relevés, aussi bien du point de vue des ménages vis-à-vis de ces combustibles que dans la mise en œuvre de leur politique d'intégration dans les ménages

[36].

Dans certains pays développés, des succès ont été enregistrés dans la production et l'utilisation des briquettes, mais il n'en est pas de même dans la plupart des pays en voie de développement. La technologie du briquetage est nouvelle dans les pays africains. L'expansion de la densification de la biomasse dépend essentiellement de trois facteurs, à savoir la disponibilité des résidus, les technologies adéquates et le marché des briquettes [102]. Pour les pays en voie de développement, la disponibilité des résidus ne pose pas de problème, cependant l'optimisation des traitements chimiques et mécaniques nécessaires pour la plupart des innombrables matières premières reste un défi. En ce qui concerne les communautés rurales où l'énergie est à peine suffisante, la plupart des technologies permettant de produire des briquettes de haute qualité sont coûteuses et nécessitent un apport énergétique élevé. La production de briquettes à grande échelle nécessitera d'importants investissements, ce qui constitue un obstacle à l'expansion de la densification de la biomasse. Pour attirer davantage d'investisseurs dans les régions qui manquent de capacités financières adéquates et d'intrants énergétiques élevés, les efforts doivent être orientés vers le développement de produits plus conviviaux et plus économiques, le développement de technologies plus conviviales, rentables et efficaces sur le plan énergétique à différentes échelles. Enfin, le marché des briquettes et leur utilisation extensive comme substituts de la biomasse conventionnelle (bois de chauffage) et des combustibles fossiles.

En Indonésie, on a fait le constat selon lequel l'industrie des huiles de cuisson produits d'énormes quantité de déchets solides qui sont briquetables [27]. Une étude menée par Teixeira, et al au Brésil en 2010 sur la transformation de la bagasse de canne à sucre comme combustible alternatif pour les ménages et les industries [103]. Les résultats montrent que les briquettes à base de bagasse de canne à sucre est une nouvelle option de combustible renouvelable, et son utilisation peut réduire le déboisement pour la production de charbon de bois ou du bois de chauffe. Le Haïtien Alexandre Racicot a réalisé une étude sur la durabilité de combustibles de substitution au bois énergie en Haïti. Cette étude visait à rechercher les différentes alternatives énergétiques au bois de feu et au charbon de bois, il en ressort que la bagasse couvre environ 4% des besoins énergétiques des ménages. Il est possible d'attribuer 0,2% des besoins énergétiques de cuisson directement à la bagasse. La majorité de la bagasse est utilisée sur place par les entreprises de transformation de canne à sucre [104]. Les études comme celle de Akowah et al. [23] réalisées en 2012 au Ghana ont permis d'avoir une idée sur l'avis des ménages sur l'utilisation des briquettes faites à base d'ordures ménagères et d'agro-résidus. Il en ressort que 93% de l'échantillon étudié est favorable à condition que le prix soit comparable à celui du charbon de bois. Par ailleurs, une analyse physico-chimiques de ce charbon montre qu'il a une humidité de 5,7%, une masse volumique de $1,1g/cm^3$, un carbone fixe de 20,7% et un PCI de 4 820 kCal/kg. Selon Mary Njenga les briquettes pourraient servir de combustibles alternatifs pour les ménages et réduiraient l'impact environnemental, dans les pays comme le Kenya ces briquettes ont fourni 16% de combustibles supplémentaires [105].

Pitchou Tshimpanga Ongona en Décembre 2013 effectue une analyse socioéconomique de la consommation de charbon de bois (makala) à Kisangani [106]. De cette étude, il ressort qu'il est temps de sauver quelques écosystèmes forestiers vulnérables car il a été constaté que tous les ménages consomment du charbon de bois indépendamment de la commune habitée. Mathilde Laval a réalisé une étude sur le charbon vert dans les pays du sud en Février 2014 [107] et a montré que le charbon vert peut être considéré comme une nouvelle source d'énergie de cuisson aux ménages des pays sous développés. De cette étude, il ressort que le charbon vert doit se vendre à un prix relativement bas pour être compétitif face au charbon de bois.

Au Niger, après évaluation des caractéristiques du produit des briquettes de charbon écologiques et une enquête auprès des ménages, les enquêtés manifestent leur volonté d'acheter les briquettes de charbon écologiques s'ils sont vendus au même prix que le charbon de bois car il est plus économique en ce sens que sa durée de combustion et sa qualité de feu sont meilleures que celles du charbon de bois [108].

Selon Clara Liseth Mendoza Martinez et al., au Brésil, les résidus du café utilisé pour produire des briquettes pour les processus de combustion mélangés avec bois de pin, créent une nouvelle source pour l'utilisation de biomasses résiduelles de très bonne qualité, très appréciée par les ménages et les industries. [109].

Une étude menée par Hugues Nlom et al. visait à explorer les facteurs économiques et sociodémographiques qui influencent la probabilité qu'un ménage passe du bois de chauffage à des combustibles plus propres dans le nord du Cameroun [110]. Dans le sud-ouest Cameroun, les obstacles liés à l'adoption et utilisation soutenue de combustible plus propres sont liés à leur capacité à répondre aux besoins de cuisson [110]. Avec un échantillon de 553 ménages, environ 23% des ménages ont manifesté le désir d'acheter des bouteilles de gaz si leur situation financière le permettait. Les jeunes ménages sont conscients sur les avantages d'utiliser des sources de combustibles plus propres et plus efficaces.

1.3.6 Analyse économique de la production des briquettes de charbon écologique

1. Coûts de production des briquettes

Comme toute activité, la production des briquettes a un coût dont l'estimation est primordiale avant son adoption. Le coût de production des briquettes de charbon écologique, que l'on peut désigner comme le coût total, dépend de plusieurs autres facteurs. Tripathi et al. [111] ont décrit ces autres coûts comme étant le coût du capital, le coût d'installation, les coûts d'exploitation et les coûts de réparation et d'entretien. Les coûts de l'équipement de traitement, de la machine à briquettes et de ses accessoires, du terrain et du bâtiment, le cas échéant, sont les principaux éléments qui constituent le coût total. La main-d'œuvre, les matières premières, l'électricité, l'huile et les lubrifiants pour les

machines, du transport et autres intrants connexes qui améliorent le bon fonctionnement de l'usine de briquetage constituent essentiellement le coût d'exploitation. Enfin, les coûts de réparation et d'entretien sont essentiellement constitués des dépenses effectuées pour l'entretien approprié de l'usine de briquetage et des machines sur une base quotidienne, hebdomadaire, mensuelle ou selon jugée nécessaire. Cela implique la réparation ou le remplacement pur et simple des pièces endommagées, le nettoyage de l'huile, et la fixation des vis desserrées.

Plusieurs études ont rapporté que l'estimation de ces coûts peut permettre de déterminer le coût total de production des briquettes. Zarski [112] a estimé le coût total de la production d'une tonne de briquettes à partir de paille de céréales et de colza à 62,43 Euros ; le coût des matières premières, l'amortissement et le coût de l'électricité représentant la plus grande part. De même, le coût total de production d'une tonne de briquettes combustibles à partir de sciure de bois était de 84,45 Euros, soit plus de 35% plus élevé que dans le cas de la production de briquettes à partir de paille. Tippayawong et al. [113] ont indiqué que le coût total d'un kilogramme de briquette était de 0,42 dollar. Le coût du charbon brut représentait environ 70% du coût total, mais un bénéfice estimé à 22,4 % a également été noté, ces études sont en accord avec [111, 114] qui ont conclu que le prix d'achat de la biomasse représente la plus grande part des coûts de production des briquettes. De plus, Gill et al. [115] ont rapporté que le coût total de la fabrication de briquettes à partir de paille de riz hachée était de 0,041 par kilogramme. seulement était de 0,041 dollar par kilogramme et de 0,00281 dollar par méga joule d'énergie, tandis que celui des briquettes de paille de riz hachée avec 10% et 20% de tiges de coton était de 0,050 dollar et 0,051 dollars par kilogramme, respectivement, et 0,0033 dollar par méga joule d'énergie. L'étude a conclu qu'il est économiquement viable de produire des briquettes à partir de paille de riz hachée avec et sans tige de coton comme liant.

Srivastava et al ont produit et évalué des briquettes en utilisant quatre types de déchets du marché des légumes sans l'utilisation d'un liant externe [116]. Les résultats ont montré que le coût total des briquettes, y compris celui de la matière première se situait entre 24,68 dollars et 28,90 dollars par tonne. L'étude a montré que le coût est comparable à celui du bois disponible au marché local a donc conclu que le briquetage de ces déchets peut être une option viable pour obtenir de l'énergie utile au lieu d'être une source de gaspillage. Eriksson et Prior [117] ont noté que la faisabilité économique de la technologie du briquetage où que ce soit dépendra fortement de la relation entre ces coûts unitaires et le prix des combustibles de substitution. Il est donc important d'analyser ces coûts car les biocombustibles ne seraient une alternative viable que si leurs coûts sont inférieurs à ceux des combustibles fossiles [118]. Les briquettes de charbon écologique peuvent être utilisées en complément au bois de chauffage et au charbon pour la cuisson des aliments lorsqu'elles sont produites à bas prix et mises à la disposition des consommateurs, ce

qui entraîne une baisse de la demande [119].

2. Faisabilité économique de la production des briquettes

La faisabilité économique de toute activité technologique, y compris celle de la production des briquettes est importante et peut être déterminée par une analyse économique. Elle dépend généralement de quatre facteurs, à savoir le type d'équipement utilisé, le type de biomasse, les compétences des ressources humaines et le capital d'investissement [120]. L'analyse économique peut être effectuée en évaluant certains indicateurs économiques de base tels que la Valeur Actuelle Nette (VAN), le Taux de Rendement Interne, le temps de retour sur investissement (TRI) et le rapport coût-bénéfices. La Valeur actuelle nette est utilisée pour déterminer la rentabilité d'un projet. Une VAN positive signifie que le projet est acceptable [121], mais doit être rejeté lorsqu'elle est négative, et peut rendre l'investisseur indifférent lorsqu'elle est nulle [122]. Dans leurs travaux, Sengar et al. [123] ont trouvé que 25 831,88 dollars, 30 117,20 dollars, et 8434,78 dollars représentaient la VAN de la production des briquettes à partir des coque de noix de cajou, d'herbe et de balle de riz, respectivement. De même, une VAN de 17,2 millions de dollars a été réalisée dans une étude menée par Hakizimana et Kim [124] ; les valeurs obtenues ont confirmé la commercialisation des briquettes de tourbe. D'autres projets de briquetage notables avec une VAN élevée comprennent 9,81 millions de dollars [125] et 1,40 million de dollars [126]. Les VAN des cas mentionnés sont toutes positives. On peut donc en déduire que les projets de briquetage sont rentables et donc réalisables.

La période de récupération d'un projet est généralement comparée à sa durée de vie économique. Moins le nombre d'années nécessaires pour récupérer l'investissement est élevé, mieux c'est pour le projet. Le temps de retour sur investissement est calculé en tenant compte de la valeur temporelle de l'argent et est également utilisé pour mesurer le niveau de risque. Sengar et al. [123] ont rapporté que les briquettes de coques de noix de cajou et d'herbe peuvent prendre 0,68 et 0,63 an, respectivement, comme période de récupération du projet. Cependant, le même projet a pris 2,5 ans pour les briquettes de balle de riz, ce qui est légèrement supérieur à la période de deux ans rapportée par Hamid et al. [127] pour la production d'amandes de caoutchouc. La période de récupération pour les briquettes d'écorce de durian et de paille de riz était de 1,3 an tandis que la production de briquettes de tourbe était de cinq à six ans [128].

Le Taux de Rendement Interne est l'intérêt maximum qui pourrait être payé pour les ressources utilisées si un projet devait récupérer tous les coûts dépensés et atteindre le seuil de rentabilité [123]. En effectuant une évaluation économique d'un projet de briquetage avec une durée de vie économique prévue de 15 ans, Hu et al. ont rapporté un TRI de 36% et un temps de retour sur investissement de 4,5 ans [126]. Onchieku a également rapporté 68%, 76% et 100% sur différents scénarios lors de l'exécution d'une analyse coûts-avantages [120]. Lors d'une analyse coûts-bénéfices de la production de briquettes

sur deux ans, le taux d'actualisation était dans ce cas de 15%. D'après Walekhwa et al. [122], un investissement est dit rentable lorsque la valeur du TRI est supérieure au taux d'actualisation.

Le Rapport coûts-Bénéfices (RCB) est le rapport entre la valeur équivalente des avantages et la valeur équivalente des coûts. Un projet peut être accepté si le BCR est égal ou supérieur à 1 [121]. L'analyse économique dans [129] a trouvé que les briquettes produites à partir de charbon de rhizome de manioc avec un liant à base de mélasse ou de gel d'amidon dans une proportion de 7 :3. dans une proportion de 7 :3 sont les meilleures avec un RCB de 2,01 et 2,15, respectivement. Le BCR pour pour les briquettes de coquille de noix de cajou, d'herbe et de balle de riz étaient de 2,8, 2,93 et 1,51, respectivement [123]. Les valeurs pour le RCB obtenues dans ces études indiquent l'acceptabilité. Pour conclure qu'un projet tel qu'une usine ou une technologie de briquetage l'usine ou la technologie de briquetage est faisable et rentable, tous les indicateurs économiques utilisés pour l'analyse économique devraient être positifs.

3. Analyse de sensibilité économique

Il est fréquent que les coûts de production des briquettes et la rentabilité économique soient sensibles à un certain nombre de facteurs. L'analyse de sensibilité vise à déterminer comment diverses valeurs d'une variable indépendante auront un impact sur une variable dépendante en tenant compte d'un ensemble d'hypothèses et, en fin de compte, à déterminer la rentabilité du projet proposé. Elle est utilisée pour inclure l'incertitude dans l'évaluation économique d'un projet afin de généraliser les résultats pour diverses situations où les facteurs d'entrée et les coûts sont différents [130]. Dans une étude récente de Sahoo et al [131], une analyse de sensibilité a été menée pour déterminer l'impact des principaux paramètres d'entrée sur le prix de vente minimum (MSP) des produits agricoles sur le prix de vente minimum des briquettes de copeaux de bois, des briquettes de copeaux de bois torréfiés et du biochar. L'étude a fait varier les paramètres d'entrée de $\pm 20\%$ pour le modèle financier et les résultats ont montré une variation dans la relation entre les changements dans les modèles et leur impact sur le prix de vente minimum sans profit. La teneur en humidité s'est avérée être l'intrant le plus sensible pour le son prix de vente minimum sans profit a été réduit de 10% ou augmenté de 12,5% en utilisant des copeaux de bois à 29% ou 43% d'humidité. En outre, une variation de 4 à 8% de ce prix de vente minimum sans profit a été obtenue par une variation de 20% du coût du capital.

Dans une autre étude réalisée par Feng et al. [125], les résultats ont révélé que la VAN était sensible à la variation du prix de la briquette et du coûts de la matière première. Par exemple, un changement de pourcentage de 10% à +10% dans le prix des briquettes a entraîné une fluctuation de la VAN de 4,93 millions de dollars à 14,70 millions de dollars. L'étude a également montré qu'une augmentation de 10% du coût des matières premières réduit la VAN et vice versa. L'étude a conclu que le risque d'une baisse de la VAN due à la réduction du prix des briquettes est moindre par rapport à l'augmentation du coût

des matières premières. De même, un changement de pourcentage varié de 20% à +20% dans le prix de la briquette et le coût du maïs réduit la VAN de la briquette et du coût de la tige de maïs a influencé la performance économique d'un système de combustible à base de briquettes de biomasse [126]. La variation en pourcentage du prix des briquettes a entraîné une variation de la VAN, du TRI de 0,40 million à 3,5 millions d'euros.

L'état de l'art ci-dessus fait la lumière l'évolution scientifique des briquettes de charbon écologique jusqu'à date. La plupart des études de potentiel énergétique de biomasse agricole réalisées au Cameroun et dans d'autres pays sont des évaluations générales de potentiel et ne prennent pas en compte un mode de valorisation particulier comme la conversion en briquettes de charbon écologique. Plusieurs types de déchets ont fait l'objet de l'utilisation comme matières premières pour la production des briquettes mais le dévolu est de plus en plus jeté sur les résidus agricoles à cause de leur disponibilité et la qualité des briquettes produites. À la lumière de la documentation disponible, aucune étude ne semble avoir porté sur la production des briquettes à partir des résidus de rotin ; par ailleurs, très peu de travaux ont été publiés sur la caractérisation des briquettes produites au Cameroun. Des recherches ont été menées sur l'analyse économique du processus de briquetage, mais aucune n'a encore permis d'analyser la viabilité économique de la conversion de coques de noix de coco, déchets de rotin, bagasse de canne à sucre et peaux de banane en briquettes de charbon écologique. Par ailleurs, la littérature ne fait mention d'aucune recherche visant à étudier la viabilité économique de l'utilisation du charbon écologique dans les ménages.

Conclusion

En définitive, la briquette de charbon écologique est un biocombustible solide ayant fait l'objet d'une production scientifique prolifique grâce à son triple intérêt environnemental, énergétique et social. Les matières premières utilisées pour sa production sont aussi diverses que variées, mais le choix dépend fortement de leur disponibilité. Les recherches ont été menées dans de nombreux pays principalement ceux en voie de développement afin d'étudier la caractérisation énergétique desdites briquettes. Il en ressort que les propriétés sont intéressantes et peuvent être comparables aux combustibles classiques. Il est alors convenable d'envisager leur utilisation pour la cuisson des ménages dans un pays à déficit énergétique comme le Cameroun, pays du Sud où la biomasse est disponible mais les briquettes peu connues. Ce chapitre a permis de se familiariser avec les notions et concepts relatifs aux briquettes de charbon écologique, le prochain chapitre est consacré à décrire la méthodologie employée pour atteindre les objectifs de ce travail.

Chapitre 2

Matériels et méthodes

Introduction

Ce chapitre décrit le matériel et les méthodes employés au cours de l'élaboration de ce travail. Dans un premier temps, une mise au point sur la production agricole annuelle nationale est faite, puis l'identification des déchets appropriés et disponibles afin d'évaluer le potentiel énergétique de tous les déchets agricoles utilisables pour la production des briquettes. Ce chapitre vise également à présenter le processus adopté pour la préparation de briquettes à partir de quatre types de résidus agricoles, la coque de noix de coco, la bagasse de canne à sucre, de banane et les résidus de rotin : tous utilisés séparément ; évaluer le rendement massique et certaines propriétés physico-chimiques desdites briquettes. Par la suite, il sera question de présenter une analyse économique afin d'estimer le coût de production des briquettes fabriquées à partir des quatre résidus agricoles sélectionnés et d'évaluer la rentabilité de l'entreprise. Enfin, ce même chapitre présente une méthode d'évaluation des avantages économiques liés à la substitution des combustibles conventionnels (GPL, bois de chauffage, charbon de bois) par des briquettes fabriquées à partir de coques de noix de coco, de déchets de rotin, de pelures de banane et de bagasse de canne à sucre dans un ménage camerounais moyen.

2.1 Évaluation du potentiel énergétique des déchets agricoles au Cameroun

Les résidus de biomasse généralement pris en compte pour la fabrication de briquettes sont des déchets de cultures qui sont des matières à priori inutiles restant après la récolte. Les matières premières sélectionnées pour le briquetage doivent présenter certaines caractéristiques spécifiques en raison de leurs effets sur la qualité des briquettes à produire. Bernice Asamoah et al. a rapporté les principales caractéristiques de la biomasse adaptée à la fabrication de briquettes [132]. Le tableau 2.1 présente la production annuelle des cultures vivrières concernées au Cameroun ainsi que les types et les caractéristiques des résidus produits lors de l'exploitation de chacune d'elle. Dix cultures sources susceptibles

de produire les résidus briquetables ont été recensées sur le triangle national. Il s'agit du riz, de la banane/plantain, du maïs, de l'arachide, du coton, de la noix de coco, de la canne à sucre, du palmier à huile, du café, et du cacao. Les activités de récolte et de transformation de ces cultures génèrent des résidus tels que les coques, les enveloppes, les tiges, les feuilles, la bagasse, les pelures, les fibres et la paille. Tous ces résidus de culture ont chacune à sa manière des caractéristiques telles que recommandées par Bernice Asamoah et al. Par ailleurs, les briquettes produites à partir de ces déchets ont déjà fait l'objet de caractérisation dans d'autres pays. Le tableau 2.1 fournit également le Rapport Résidu/Produit (RRP) de chaque résidu, qui représente la masse de résidu produite par unité de masse de culture récoltée. Le potentiel énergétique des résidus est évalué une fois que ceux-ci sont identifiés.

Le potentiel annuel brut des résidus générés est estimé en utilisant la méthode du Rapport Résidu/Produit (RRP). Le potentiel de chaque résidu biomasse est calculé sur la base des équations proposées par Okello et al. et Mboumboue et Djomo [73] :

$$(CR)_i = (RRP)_i \times (P_rC)_i \quad (2.1)$$

Où $(CR)_i$ est la quantité de biomasse agricole des cultures en tonnes, $(RRP)_i$ est le Rapport Résidus/Produits de la culture sélectionnée et $(P_rC)_i$ la production annuelle des cultures en tonnes.

Le potentiel énergétique des résidus de culture a été calculé à l'aide d'équations :

$$(EnR)_i = (CR)_i \times (PCI)_i \times (MR)_i \quad (2.2)$$

$$EnR_t = \sum (EnR)_i \quad (2.3)$$

Où $(MR)_i$ est le rapport massique de la conversion de chaque résidu sélectionné en briquettes, les valeurs de $(MR)_i$ sont estimées à partir de discussions et d'entretiens avec des producteurs des briquettes de charbon écologique implantés dans les régions du Littoral, de l'Est et du Nord du Cameroun. $(EnR)_i$ est le potentiel énergétique des briquettes susceptibles d'être produites par chaque type de résidu (TJ), $(EnR)_t$ est le potentiel énergétique brut national, (PCI) est le Pouvoir Calorifique Inférieur de chaque briquette potentiellement produite (MJ/kg). Les valeurs de RRP et PCI ont été collectées dans la littérature.

TABLE 2.1 – Caractéristiques des déchets issus des cultures vivrières [8] [9] [11] [30] [29] [31] [35] [133]

| Cultures | Production | Déchets | RRP | TH | Tc | PCI résidu(MJ/kg) | PCI briquette (MJ/kg) |
|-----------------|------------|------------|-------|-------|------|-------------------|-----------------------|
| Riz | 359 320 | coques | 0,2 | 2,37 | 19,5 | 19,33 | 17,04 |
| | | paille | 1,757 | 12,71 | 18,1 | 18,1 | 17,98 |
| Banane/Plantain | 6 020 264 | pelures | 0,25 | 15 | 6,26 | 17 | 21,41 |
| | | feuilles | 0,35 | 40 | | 11,37 | 17,7 |
| | | tronc | 5,6 | 40 | | 11,66 | 12,13 |
| Maïs | 2 164 003 | enveloppes | 0,2 | 11,11 | 1,2 | 15,56 | 16,8 |
| | | tiges | 2 | 20 | 10 | 13,79 | 17,8 |
| | | épis | 0,273 | 7,53 | 8,10 | 16,30 | 20,89 |
| Arachides | 747 677 | coques | 0,477 | 8,20 | 8,56 | 15,66 | 22 |
| Coton | 289 994 | enveloppes | 0,5 | 9 | 6 | 16,57 | 16,83 |
| | | Tiges | 3,74 | 12 | 9,4 | 13,07 | 17,51 |
| Noix de coco | 5 000 | bourre | 1,3 | 10,3 | 0,5 | 18,6 | 17,71 |
| | | coques | 0,6 | 10 | 1 | 10,61 | 18,6 |
| | | poussières | 0,62 | 15 | | 13,40 | 31,97 |
| Canne à sucre | 1 450 000 | bagasse | 0,29 | 50 | 6 | 17,54 | 22 |
| | | feuilles | 0,302 | 10 | 1,2 | 15,81 | 19,11 |
| Noix de palme | 419 970 | coques | 0,049 | 13 | 4 | 17 | 14,25 |
| Café | 33 598 | enveloppes | 2,1 | 15 | | 12,56 | 23 |
| Cacao | 308 753 | cabosses | 1 | 15 | | 17,85 | 17,31 |

Source : Rapport de l'Institut National de la Statistique (2017)

Production : Production annuelle en tonnes, **RRP** : Rapport Résidu/Produit de chaque résidu, **TH** : Taux d'humidité (%), **TC** : Taux de cendres (%),

PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur (MJ/kg)

2.2 Production des briquettes de charbon écologique

2.2.1 Justification du choix des déchets

Les coques de noix de coco (CNC), les déchets de rotin (DRT), les pelures de banane (PBN) et la bagasse de canne à sucre (BCS) ont été choisis à cause de leurs caractéristiques proximales et élémentaires telles que rapporté par Bernice Asamoah et al. [132]. Leurs potentiels énergétiques sont également importants et ils sont disponibles dans la zone d'étude.

La banane/plantain est l'une des cultures vivrières les plus importantes au Cameroun. Son rôle est essentiel dans l'alimentation quotidienne, de nombreux petits producteurs en dépendent économiquement, c'est le troisième aliment de base après le riz et le manioc. La production camerounaise est estimée à 6 020 ktonnes, le potentiel énergétique annuel des peaux de banane est de 4 217 TJ [34, 36].

La noix de coco, fruit du palmier *Cocos Nucifera*, qui pousse sur le cocotier est originaire du Sri Lanka. Elle s'est ensuite répandue géographiquement grâce à ses fruits en Asie du Sud-Est, en Afrique et en Amérique [134]. Il est disponible tout au long de l'année, sa consommation est due à son jus de fruit et sa pulpe et les fibres qui sont utilisés en cuisine et en cosmétique. Le Cameroun n'est que 17^{ème} producteur en Afrique mais la production annuelle de noix de coco de 5 ktonnes est assez élevée, et le ratio de production de coques est de 60 % avec un potentiel annuel de 16 TJ [133, 73].

La canne à sucre, cultivée depuis la préhistoire, serait originaire d'Asie ou de Nouvelle-Guinée [64]. C'est une plante qui se présente sous la forme d'une touffe de 5 à 20 tiges de 2 à 5 mètres de haut et de 2 à 4 centimètres de diamètre. Elle est consommée pour ses vertus thérapeutiques et nutritionnelles, elle est également industrialisée pour la fabrication du sucre raffiné. La production annuelle de canne à sucre au Cameroun est de 1450 ktonnes et la quantité totale annuelle de bagasse dérivée est de 343,5 ktonnes [133, 73].

Le rotin quant à lui est un palmier à lianes épineuses possédant à l'extrémité de ses feuilles un flagelle dont les crochets lui permettent de ramper sur les arbres. Le diamètre de leurs tiges varie de 3 mm à plus de 20 cm, leur longueur allant de quelques mètres à plus de 200 m. Au Cameroun, le rotin est le matériau très utilisé dans l'art et l'artisanat de la vannerie, c'est-à-dire pour la production d'une variété d'objets regroupés en plusieurs catégories : objets de conservation et de transport ; de parure et de musique ; les objets d'ameublement et de décoration. Il existe très peu de données au Cameroun, on sait tout de même qu'il y a plusieurs dizaines d'exploitants de rotin dans la partie sud du Cameroun. La région du Littoral a l'une des intensités mensuelles de coupe de rotin les plus élevées du pays, avec une valeur allant jusqu'à 12 mètres de rotin par km^2 . Au

cours du processus de vannerie, des déchets sont produits. La figure 2.1 montre le schéma de production des déchets à partir de ces quatre cultures sélectionnées.

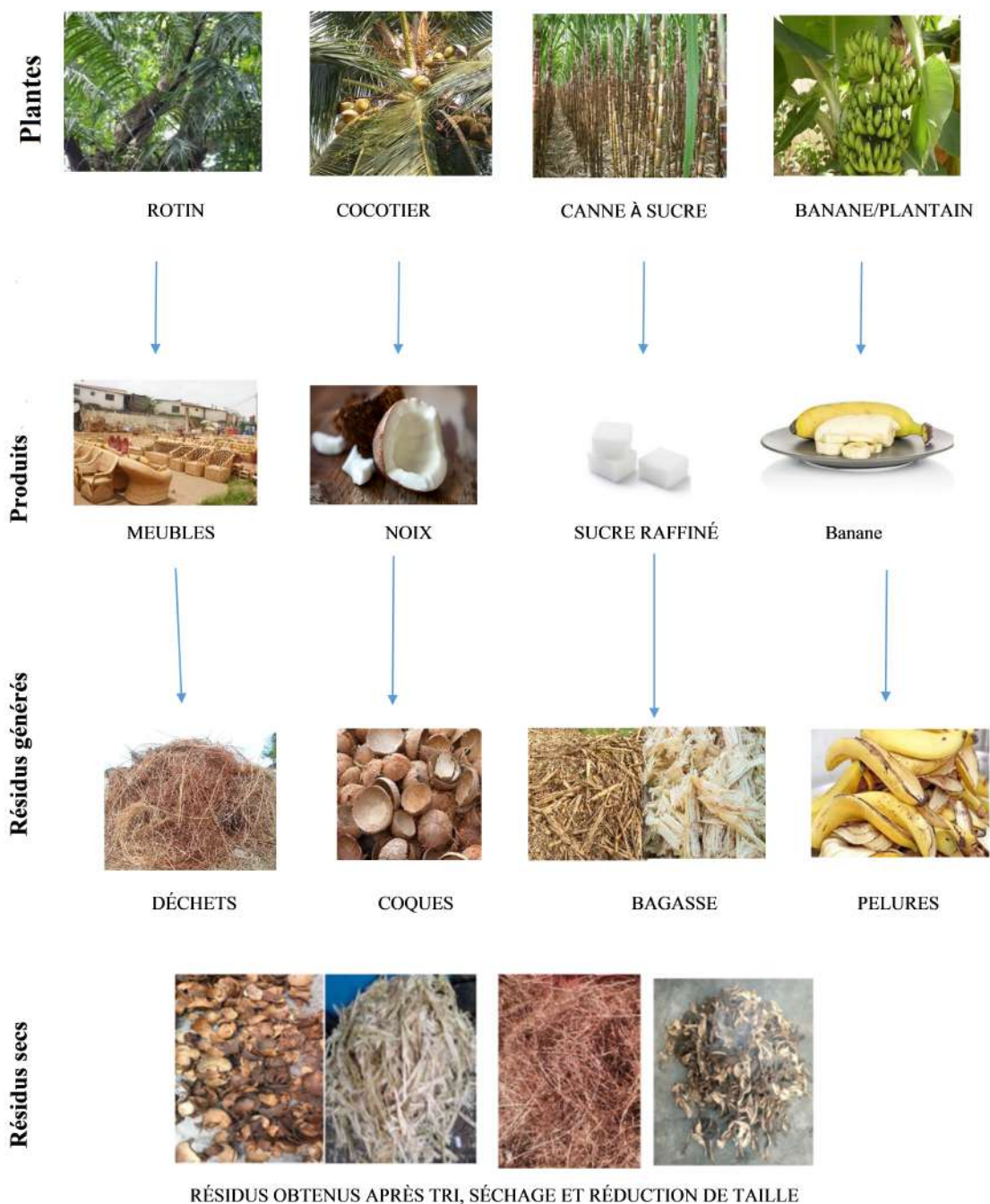


FIGURE 2.1 – Schéma de production de déchets

2.2.2 Matériel utilisé

Pour la production des briquettes le matériel suivant a été utilisé :

- **Les matières premières** : (coques de noix de coco, bagasses de canne à sucre, déchets de rotin, peaux de banane et coques de noix de palme). Cent (100) kg de

chaque type de résidu ont été collectés dans dans la ville de Douala, région du Littoral du Cameroun, de janvier à février 2020.

- Des balances
- **Un fût** muni d'une cheminée : 90 cm de hauteur et 55cm de diamètre muni d'un couvercle et d'une cheminée pour laisser s'échapper les fumées
- **Un thermomètre infrarouge**
- **Un broyeur** : équipé d'un tamis de maille de 2mm, d'une trémie et d'un marteau couplé à un moteur de 10 chevaux vapeur
- **Un four** accompagné d'une marmite et de l'amidon pure de manioc : pour la préparation du liant
- **Un mélangeur** : de forme cylindrique de hauteur 80 cm et de diamètre 45 cm.
- **Un compacteur** : composé d'un moule mâle, d'un moule femelle, d'un moteur et d'un vibreur
- **Les EPI** : (Équipements de Protection Individuelle) : gangs, cache-nez, bottes, lunettes.

2.2.3 Processus de production

Cette section décrit le processus suivi pour la fabrication des briquettes de charbon écologique. Avant la carbonisation, les matières premières (Coques de noix de coco, peaux de banane, les déchets de rotin et la bagasse de canne à sucre) ont été séchées au soleil pendant 3 jours à température ambiante (32-34°C). La biomasse des matières premières est carbonisée en utilisant la méthode conventionnelle proposée par Zubairu [10]. La carbonisation ou pyrolyse lente est effectuée à une température de 400 °C.

Le carbonisateur amélioré utilisé est de forme cylindrique simple fabriquée pour fournir un moyen de créer un environnement à faible teneur en oxygène. Au début du processus de carbonisation, le couvercle a été laissé ouvert pendant environ 15 minutes pour que les gaz volatiles s'échappent. Le couvercle a ensuite été refermé, correctement scellé pour empêcher la pénétration d'air. La carbonisation de la biomasse dure 45 minutes pour la coque de noix de coco, 35 minutes pour la bagasse de canne à sucre, 15 minutes pour la peau de banane et 40 minutes pour les déchets de rotin. La matière entièrement carbonisée est ensuite broyée en fines particules, le charbon en poudre obtenu est mélangé à de l'eau et à un liant dans des proportions clairement définies (10% de liant-eau et 90% pour les matières premières) selon [8]. Le liant utilisé ici est l'amidon de manioc en raison de ses caractéristiques physico-chimiques, de sa disponibilité sur le marché local et de son faible prix [9]. Le mélange est par la suite pressé dans un moule à briquettes manuel parallélépipédique, les briquettes moulées ont été placées sur des plateaux en aluminium propres et ont été séchées au soleil pendant 2 jours à température ambiante (32-34°C) afin de les produire sous forme humide. Une fois la production terminée, les briquettes ont subi une caractérisation afin d'évaluer leur performance énergétique.

2.3 Caractérisation des briquettes

La caractérisation des briquettes et la compréhension de leurs qualités sont essentielles pour une utilisation optimale. La détermination des propriétés caractéristiques telles que la masse volumique apparente, le pouvoir calorifique, le taux d'humidité, la teneur en cendres, la teneur en matières volatiles, la composition élémentaire et les paramètres de combustion des briquettes produites a été faite.

2.3.1 Masse volumique apparente

La masse volumique apparente des briquettes est déterminée en calculant le rapport entre la masse et le volume de la briquette. La masse est obtenue à l'aide d'une balance numérique modèle EK5150, avec une capacité maximale de 5 kg, de dimensions $20 \times 16 \times 7\text{cm}$. Le volume a été calculé en prenant les dimensions linéaires (longueur, largeur et épaisseur) de la briquette à l'aide d'un pied à coulisse numérique dont la plage de mesure va de 0 à 150 mm et la résolution est de $1\mu\text{m}$. La figure 2.2 montre les photos de mesure de la masse et des dimensions des briquettes.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (2.4)$$



FIGURE 2.2 – Mesure de la masse et des dimensions

2.3.2 Taux d'Humidité

Pour déterminer le taux d'humidité (TH), nous aurons recours aux matériels suivant :

- Un creuset en porcelaine
- Une étuve
- Un dessiccateur

Le pourcentage d'humidité (PMC) est déterminé en utilisant la norme CEN / TS 14774 (CEN, 2005). En pesant 3 g de l'échantillon de briquette (E) et en le séchant au four à 105°C jusqu'à ce que la masse de l'échantillon soit constante. Le changement de poids (D) après 16 à 24 h a ensuite été utilisé pour déterminer le TH de l'échantillon

à l'aide de l'équation 2.5 :

$$T_H = \frac{D}{E} \times 100 \quad (2.5)$$

2.3.3 Taux de Cendres

La teneur en cendres en pourcentage (TC) a été déterminée conformément à la norme CEN / TS 14775 en chauffant une masse $A = 2$ g de l'échantillon de briquette dans le four à une température de 450°C pendant 1h et pesée après refroidissement dans un dessiccateur. pour obtenir le poids des cendres (C).

$$T_C = \frac{C}{A} \times 100 \quad (2.6)$$

2.3.4 Taux de Matières Volatiles

Le pourcentage de matières volatiles (TMC) est déterminé selon la méthode standard CEN / TS 15148 en pulvérisant 2 g de l'échantillon de briquette dans un creuset et en le plaçant dans un four jusqu'à l'obtention d'un poids constant. Les briquettes ont ensuite été conservées dans un four à une température de 550°C pendant 10 min et pesées après refroidissement dans un dessiccateur. Le pourcentage de matière volatile a ensuite été calculé comme suit :

$$T_{mv} = \frac{A - B}{A} \times 100 \quad (2.7)$$

Où A est le poids de l'échantillon séché au four et B est le poids de l'échantillon après 10 min dans le four à 550°C .

2.3.5 Pourcentage de Carbone Fixe

Le carbone fixe de la briquette est un paramètre essentiel qui représente le pourcentage de carbone disponible pour la combustion du charbon après distillation des matières volatiles et indique une combustion rapide de la briquette de combustible. Le pourcentage de carbone fixe (PCF) a été calculé en soustrayant la somme de T_{MV} , T_C et T_H de 100, comme indiqué dans l'équation 2.8 :

$$PCF = 100 - (T_{MV} + T_C + T_H) \quad (2.8)$$

Les expériences ont été répétées en trois reprises, et les données ont été analysées à l'aide du logiciel Statistical Package for Social Sciences (SPSS) version 20.0.

2.3.6 Pouvoir Calorifique Inférieur et Supérieur

Le pouvoir calorifique supérieur a été déterminé en utilisant un calorimètre à bombe modèle GDY-1A + (présenté à la figure 2.3) de résolution de température de 0,001 K, pression endurée de 20 MPa et erreur de répétabilité inférieure à 0,2 %, conformément à la norme de l'American Society for Testing and Materials (ASTM) . Environ 0,4 g de chaque échantillon est brûlé dans le calorimètre à bombe jusqu'à obtention d'une combustion complète. Le calorimètre à bombe imprime les valeurs du PCS. Le PCI est par la suite calculé par la relation qui le lie avec le PCS et la teneur en eau [135].

$$PCI = PCS - 10,55(9h + TH) \quad (2.9)$$

Où $h = 0$ pour les combustibles solides et TH est le taux d'humidité.



FIGURE 2.3 – Bombe calorimétrique

2.3.7 Analyse Thermogravimétrique

L'analyse thermogravimétrique des échantillons de briquettes de charbon écologique a été réalisée pour évaluer la courbe de décomposition thermique et la cinétique de pyrolyse au moyen d'un analyseur thermogravimétrique (LINSEIS STA-PT 1000, Allemagne). Chaque mesure a été effectuée sur 20 mg de chaque échantillon sur une plage de température allant de 24°C à 1000°C. La différenciation des données ATG a été effectuée pour connaître les valeurs de thermo-gravimétrie différentielle (DTG) et Calorimétrie différentielle à balayage (DSC) correspondantes en utilisant le logiciel Origin Pro (Version 19b). L'expérience d'analyse TG pour l'échantillon sélectionné a été réalisée trois fois pour obtenir des données précises.

2.3.8 Analyse élémentaire

La composition élémentaire a été calculée sur la base des résultats de l'analyse proximale déterminés expérimentalement plus précisément en fonction du carbone fixe et du taux de matière volatile comme l'ont démontré Jigisha et al. et HA Ajimotokan et al. [136, 137]. La démarche permet de déterminer les éléments organiques courants tels que le carbone (C), l'hydrogène(H) et l'oxygène (O) respectivement à partir des équations 2.10, 2.11 et 2.12.

$$C = 0,637PCF + 0,455TMV \quad (2.10)$$

$$H = 0,052PCF + 0,062TMV \quad (2.11)$$

$$O = 0,304PCF + 0,476TMV \quad (2.12)$$

Les rapports atomiques H/C et O/C ont ensuite été calculés selon les formules de Van Krevelen [138].

$$H/C = \frac{\frac{\%H}{12/N}}{\frac{\%C}{12/N}} \quad (2.13)$$

$$O/C = \frac{\frac{\%O}{16/N}}{\frac{\%C}{12/N}} \quad (2.14)$$

Avec N qui est le nombre d'Avogadro = $6,02 \cdot 10^{23}$

2.3.9 Caractérisation thermique

La caractérisation thermique vise à mieux apprécier les performances thermiques des briquettes de charbon écologique. La méthode consiste à faire le test d'ébullition de l'eau qui est une simulation simplifiée du processus de cuisson dans les conditions d'utilisation dans les ménages. Ce test permet d'analyser l'allumage/inflammation des briquettes, de déterminer le rendement thermique, la puissance de la flamme produite, la vitesse de combustion. Une mesure de la température de la flamme et du temps nécessaire pour porter l'eau à l'ébullition est également faite. Les briquettes sont brûlées dans un four amélioré tel que proposent Bailis et al. [139].

Le four amélioré est recommandé pour la combustion du bois-énergie dans les ménages à cause de son efficacité comparativement aux fours classiques et au système trois pierres, son isolation permet de limiter les pertes thermiques [140, 141]. Le four amélioré utilisé

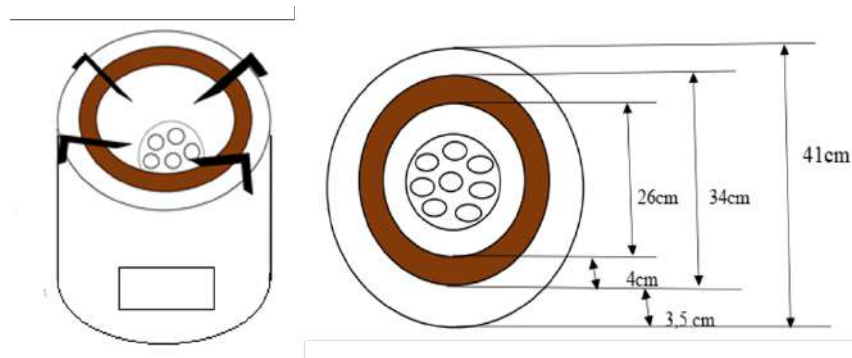


FIGURE 2.4 – Schéma du Four amélioré



FIGURE 2.5 – Four amélioré

pour les tests de combustion a été conçu selon les recommandations techniques de Sawadogo et al. Les figures 2.4 et 2.5 montrent le schéma de conception du four amélioré et l'image du four réalisé. Il a la forme d'un cylindre creux d'un rayon extérieur de 20,5 cm et une hauteur de 30 cm. Ce four a été fabriqué localement avec une couche d'argile de 4 cm, une couche de mortier de 3,5 cm et une tôle d'aluminium de 0,08 mm respectivement de l'extérieur vers l'intérieur. Des orifices sont faites sur la surface de base pour faciliter l'aération au cours de la combustion et le recueil des cendres. Un matériel spécifique est nécessaire pour conduire le test.

— Matériels utilisés

Afin de mener l'expérience, outre le four amélioré, une casserole de taille moyenne est requise ainsi qu'un module d'acquisition des données. Ce module est constitué des éléments principaux suivants :

1. Une balance numérique : elle sert à mesurer la masse de l'eau et des briquettes.
2. Une carte Arduino nano : c'est une carte électronique de prototypage rapide, dont le principal composant est le micro-contrôleurs permettant de stocker et d'exécuter les programmes.
3. Une sonde de température ds18b20 : son rôle est de mesurer la température de l'eau toutes les dix secondes.
4. Un thermocouple de type k+ max 6675 : ce composant permet de mesure la

température du four toutes les dix secondes.

5. Un afficheur LCCD 16X2+ module 12C : ce dernier affiche les valeurs des températures mesurées.
6. Une carte mémoire SD : elle est chargée de stocker les données mesurées afin de les exploiter.

Tous ces éléments sont connectés et montés dans un coffret électrique tel que présenté sur la figure 2.6.



FIGURE 2.6 – Module d'acquisition de données

— Protocole expérimental

Le test d'ébullition de l'eau est mené suivant la méthodologie proposée par Sawadogo et Bailis [9, 139]. Les figures 2.7 et 2.8 montrent le schéma et le montage du dispositif expérimental.

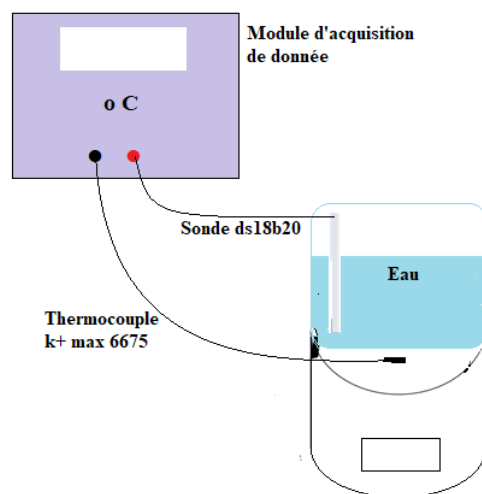


FIGURE 2.7 – Schéma du protocole expérimental

Ce test est fait sur chacun des quatre types de briquettes et se déroule suivant les trois phases décrites ainsi qu'il suit :

1. Phase de démarrage à froid : Il faut préalablement peser 200 g de briquettes et mettre un litre d'eau prise à température ambiante dans la casserole. Poser la casserole sur le four au moment de l'allumage des briquettes, l'eau est chauffée jusqu'au point d'ébullition.
2. Phase de démarrage à chaud : Remplacer l'eau bouillante de la casserole par un litre d'eau prise à température ambiante. La casserole est posée sur le four alors que les briquettes sont en pleine combustion. L'eau est chauffée jusqu'à son point d'ébullition. La répétition de l'ébullition de l'eau permet d'identifier la différence de performance de la combustion entre un four initialement froid et celui initialement chaud.
3. Phase de mijotage : cette phase est similaire à celle du démarrage à froid. Mais dans ce cas, la casserole est maintenue à ébullition pendant 45 minutes, période pendant laquelle la température ne devrait pas être en deçà de moins de 6°C sous la température d'ébullition. Cette phase simule la longue cuisson légumeuse qui est courante dans le monde entier.



FIGURE 2.8 – Montage du protocole expérimental

Pendant le déroulement de l'expérience, les données sont relevées par le module d'acquisition afin de déterminer les paramètres de combustion à savoir : le rendement thermique, la puissance de la flamme, la vitesse et la consommation spécifique.

— **Détermination des paramètres de combustion :**

Les caractéristiques de combustion telles que le rendement thermique, la puissance de la flamme, la vitesse de combustion et la consommation spécifique de briquettes ont été évalués à l'aide des données collectées pendant l'expérience.

1. **Rendement thermique** : C'est le rapport entre la quantité d'énergie absorbée par la casserole et la quantité d'énergie produite par la combustion des briquettes. Il se calcule à l'aide de l'équation [2.15](#) [\[139, 142\]](#).

$$\eta = \frac{m_e \times C_e \times (T_f - T_i) + m_{ev} \times L_v}{m_b \times PCI} \quad (2.15)$$

Où η est le rendement thermique, m_e est la masse d'eau initiale dans la casserole en g, C_e est la chaleur massique de l'eau en kJ/kg, $T_f - T_i$ est la différence entre la température finale et initiale de l'eau en °C, m_b est la masse de briquettes consommée en g, PCI est le Pouvoir Calorifique Inférieur des briquettes en kJ/kg, m_{ev} est la masse d'eau évaporée en g et L_v la chaleur latente de vaporisation de l'eau. La chaleur latente d'évaporation est fonction de la pression d'évaporation ; Okey et al. l'ont évalué lors du test d'ébullition dans les mêmes conditions expérimentales à 2 260 kJ/kg [\[61\]](#).

2. **Puissance de la flamme** : C'est l'énergie nécessaire consommée par l'eau par unité de temps pour atteindre le point d'ébullition. Il est donné par la formule de l'équation suivante [\[9\]](#) :

$$P = \frac{m_b \times PCI}{60 \times \Delta te} \quad (2.16)$$

P est la puissance de la flamme est W et Δte est la durée de la phase d'expérience en minutes.

3. **Vitesse de combustion** : c'est une mesure du taux de consommation de briquettes pour porter de l'eau à ébullition. L'équation [2.17](#) permet de calculer la vitesse de combustion [\[143\]](#).

$$V_c = \frac{m_b}{\Delta te} \quad (2.17)$$

V_c est la vitesse de combustion des briquettes en g/min

4. **Consommation spécifique de briquettes** : Il s'agit de la quantité de briquettes nécessaire pour porter un litre d'eau à ébullition [\[61\]](#).

$$C_s = \frac{m_b}{m_{ev}} \quad (2.18)$$

Où C_s est la consommation spécifique en g/l et m_{ev} est la quantité d'eau restant dans la casserole après l'ébullition (l)

La caractérisation fournit les informations sur les performances énergétiques de la combustion des briquettes ; une analyse énergétique du processus qui aboutit à la production de ces briquettes est indiquée pour compléter la caractérisation énergétique.

2.4 Analyse énergétique de la production des briquettes

Le modèle de consommation d'énergie d'un processus industriel ou semi-industriel est un indicateur de sa pérennité et son efficacité. Il est important de mettre en place des usines qui assurent une production de briquettes stable et rentable notamment dans les pays en voie de développement en raison de leur situation économique précaire. Le processus de production nécessite un approvisionnement constant en énergie, ce qui impose l'utilisation d'un système énergétique efficace. Une consommation énergétique inefficace au cours du processus de production peut entraîner des pertes financières importantes et augmenter le coût et le prix des briquettes. L'analyse énergétique du processus de production de briquettes est présentée dans cette section en vue d'identifier le type d'énergie et la quantité d'énergie requise pour la production du charbon vert.

2.4.1 Hypothèses de travail

Pour l'étude énergétique du processus de production des briquettes, les considérations suivantes sont faites :

- L'expérience de fabrication de briquettes est réalisée indépendamment pour chaque matière première. Quatre types de briquettes sont produits à partir des résidus collectés séparément.
- Un cycle de production est basé sur le briquetage de 1000 kg initial de déchets.
- L'étude est faite sur la base d'une usine témoin basée à Douala-Cameroun qui fonctionne 10 heures par jour de 8h à 18h du lundi au vendredi et 5 heures le samedi de 8h à 13h.
- Les valeurs des Pouvoirs Calorifiques Inférieurs sont 30,03 , 32,1 , 25,87 et 16,81 MJ/kg pour les briquettes de DRT, CNC, BCS et PBN respectivement.

2.4.2 Description de la production dans l'usine témoin

Les déchets sont collectés à Douala, au Cameroun. Un véhicule motorisé fonctionnant au gasoil les transporte jusqu'à la zone de briquetage. Les phases du processus de briquetage dans cette entreprise sont les suivantes :

1. Séchage des résidus de culture collectés

L'objectif est d'éliminer l'humidité des résidus afin d'améliorer l'efficacité de l'étape suivante, la pyrolyse lente. Cette opération est réalisée à l'aide d'un séchoir électrique de 1000 W à 60°C.

2. Carbonisation ou pyrolyse lente

C'est une étape cruciale dans la fabrication des briquettes de biomasse. L'objectif est

de provoquer la décomposition chimique de la matière première par l'action de la chaleur afin d'obtenir un produit composé principalement de carbone. Un carbonisateur rotatif en acier inoxydable est utilisé, alimenté par un moteur électrique de 5000 W. La carbonisation est accompagnée d'une quantité de gasoil afin de stimuler l'allumage.

3. Broyage

Le matériau carbonisé est broyé en fines particules de moins de 5 microns dans un broyeur à moteur électrique de 3500 W.

4. Malaxage

Le mélange des matériaux broyés se fait par l'ajout de liant, ce qui a pour effet de faciliter le briquetage. Le rapport massique entre les déchets carbonisés et le liant est d'environ 90 :10. L'équipement utilisé est un mélangeur entraîné par un moteur à combustion interne consommant du gasoil, qui tourne pendant un certain temps jusqu'à ce que le mélange soit homogène.

5. Compactage

Le matériau carbonisé et mélangé au liant est introduit dans une presse à briquettes électrique de 5000 W. La pression de compactage utilisée pour produire des briquettes est comprise entre 5 et 7 MPa pendant environ 20 secondes.

6. Séchage des briquettes produites

Les briquettes moulées sont ensuite déshydratées par un séchoir électrique de 1000 W à 60°C. Enfin, les briquettes sont emballées dans des sacs de 40 kg.

2.4.3 Calcul de la consommation énergétique

L'usine compte des appareils électriques et des moteurs thermiques consommant du gasoil. Les énergies utiles consommées sont les énergies mécanique et thermique. Les paramètres nécessaires pour estimer l'énergie consommée au cours de chaque opération unitaire ont été directement mesurés ou collectés dans l'usine de production. Le tableau [2.2](#) précise les paramètres opérationnels relatifs à chaque déchet relevé sur le site de production. Les calculs visant à l'évaluation énergétique sont effectués en tenant compte du mode d'utilisation des appareils et de leurs consommations lors du fonctionnement.

TABLE 2.2 – Détails des paramètres des opérations de briquetage

| Opérations unitaires | Description | Déchets de rotin | coques de noix | Bagasse | Peaux de banane |
|---|----------------------|------------------|----------------|---------|-----------------|
| Collecte | Durée (h) | 2,5 | 2,5 | 1 | 1 |
| Énergie utile (mécanique) | Qté de gasoil (l) | 5 | 5 | 2 | 2 |
| Séchage des déchets | Durée (h) | 0,5 | 0,5 | 5 | 5 |
| Énergie utile (thermique) | P. de résistance (W) | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Carbonisation | Durée (h) | 0,75 | 0,75 | 0,5 | 0,25 |
| Énergie utile (mécanique et thermique) | Qté de gasoil (l) | 2 | 2,5 | 0,5 | 0,5 |
| | P. du moteur (W) | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Broyage | Durée (h) | 2 | 2 | 0,25 | 0,25 |
| Énergie utile (mécanique) | P. du moteur (W) | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 3,5 |
| Malaxage | Durée (h) | 2,5 | 2 | 0,5 | 0,5 |
| Énergie utile (mécanique) | Qté de gasoil (l) | 1,5 | 1,2 | 0,2 | 0,2 |
| Compactage | Durée (h) | 2,5 | 3 | 1 | 0,5 |
| Énergie utile (mécanique) | P. du moteur (W) | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Séchage | Durée (h) | 6 | 6 | 4 | 4 |
| Énergie utile (thermique) | P. de résistance (W) | 1 | 1 | 1 | 1 |

Un inventaire des appareils/moteurs et de leur puissance a été relevée. L'énergie primaire est évaluée à chaque opération du processus sur la base de chaque énergie utile consommée en adoptant la méthode du Facteur de l'Énergie Primaire (FEP). Le Facteur d'Énergie Primaire (FEP) est le rapport entre la consommation énergétique finale de l'appareil et la consommation d'énergie primaire initiale. Cette énergie primaire qui dérive de la source initiale est transformée par des technologies de conversion de l'énergie, comme les centrales électriques pour devenir des devises énergétiques. Par exemple : l'eau (source d'énergie primaire) doit passer par une centrale hydro-électrique avant d'être transformée en électricité (devises énergétiques) utilisable pour produire le travail ou la chaleur (énergie utile). Les sources d'énergie primaire au Cameroun sont l'eau (l'hydroélectricité) (73%), le gasoil (12,8%), le gaz naturel (12,9%) et la biomasse (1,3%) [2]. Le tableau 2.3 présente les paramètres énergétiques.

TABLE 2.3 – Paramètres énergétiques [144, 145]

| Paramètres | Valeurs |
|--|------------|
| FEP Gasoil | 1,1 |
| FEP Biomasse | 1 |
| FEP Gaz naturel | 1,1 |
| Rendement de la centrale hydroélectrique | 0,82 |
| Rendement des centrales au gasoil | 0,387 |
| Rendement des centrales au gaz naturel | 0,387 |
| Rendement des centrales à biomasse | 0,387 |
| PCI Gasoil | 9,98 kWh/l |

Le calcul de l'énergie primaire se fait à l'aide des équations 2.19 et 2.20. Pour les équipements électriques (pendant le séchage, la carbonisation, le broyage et le briquetage), l'énergie primaire consommée est calculée à partir de l'équation 2.19 [144] :

$$E_{Pr} = \frac{P.t.P_o.FEP}{\eta} \quad (2.19)$$

Où E_{Pr} est l'énergie primaire (kWh), P la puissance électrique de l'équipement (kW), t le temps de fonctionnement de l'équipement (h), P_o est (0,73 ; 0,129 ; 0,128 ou 0,013 selon l'origine de l'énergie consommée), FEP est le facteur d'énergie primaire et η est le rendement de la centrale de production (%).

Pour les moteurs ou activités consommant le gasoil (pendant la collecte dans le moteur à combustion interne, le mélange et la carbonisation), l'énergie primaire nécessaire est estimée par l'équation 2.20 [144] :

$$E_{Pr} = Q_{te}.PCI.FEP \quad (2.20)$$

Où Q_{te} est la quantité de gasoil consommée (litre) et PCI le Pouvoir Calorifique Inférieur (kWh/l)

2.5 Analyse économique de la production des briquettes

La production des briquettes de charbon écologique est une activité qui nécessite un investissement financier, elle devrait par conséquent être rentable. L'évaluation des coûts et une analyse de sensibilité économique sont primordiales pour l'étude de la possibilité de l'implantation des usines de production de briquettes afin qu'elles soient disponibles pour les ménages. Cette section présente une analyse économique de la production des briquettes basée sur une usine témoin localisée à Douala-Cameroun. Les calculs économiques sont effectués en admettant les hypothèses faites à la section 2.4.1. L'évaluation des coûts est faite en considérant le coût de l'investissement initial et les coûts d'exploitation. L'investissement initial est supposé être totalement financé par un prêt bancaire remboursable sur 5 ans; il est utilisé pour l'achat et l'installation des équipements, la construction du site, les impôts et taxes liés à la mise en place de l'unité de production. Les coûts d'exploitation comprennent toutes les dépenses fixes et les coûts variables c'est à dire les coûts d'entretien et de réparation, les coûts de l'énergie électrique, les coûts du liant, les taxes, le loyer du site, les coûts du gasoil, les coûts des emballages, les salaires des opérateurs, ainsi que la collecte des matières premières. Sur la base de discussions avec les opérateurs de briquetage et en raison de sa disponibilité en grandes quantités, les déchets sont supposés être gratuits. Les seuls coûts associés à leur approvisionnement sont les frais de transport. Selon les informations recueillies sur le site de production, en tenant compte des temps d'arrêt dus à la maintenance et aux congés, l'unité est capable de produire dans ces conditions 30 tonnes de briquettes à partir de CNC et DRT et 10 tonnes de briquettes à partir de PNB et BCS chaque année. L'analyse économique est faite en Francs CFA zone CEMAC (XAF), sachant que 1 XAF = 0,0016 Dollar = 0,0015 Euro à la date du 1er Janvier 2022. Les paramètres économiques supposés sont résumés dans le tableau 2.4 :

Le Flux Net de Trésorerie (FNT) pour chaque année de simulation (t) est évalué en faisant la différence entre le flux de bénéfice annuel $C_b(t)$ et le flux de dépenses annuel $C_c(t)$ comme l'indique l'équation 2.21 [146].

$$FNT(t) = C_b(t) - C_c(t) \quad (2.21)$$

On obtient l'équation 2.22 à partir de l'équation 2.21 en détaillant le calcul des flux annuels de bénéfice et de dépenses.

$$\begin{aligned} C_b(t) - C_c(t) = & B_c.AP.(1+i)^{(t-1)} - MC.(1+j)^{(t-1)} - \\ & E_l.E_P.(1+k)^{(t-1)} - OS.(1+n)^{(t-1)} - G_{asoi}.G_P.(1+i)^{(t-1)} - \\ & PT.(1+i)^{(t-1)} - B_{liant}.B_P.(1+i)^{(t-1)} - P_{ack}.(1+i)^{(t-1)} - LP \end{aligned} \quad (2.22)$$

Où B_c est le coût des briquettes (XAF/kg), AP est la production annuelle de briquettes (kg), MC est le coût de maintenance (XAF), E_l est l'énergie électrique utilisée (kWh), E_p est le prix de l'énergie électrique (XAF/kWh), G_{asoi} est la quantité de gasoil utilisée (litre), G_p est le prix du gasoil (XAF/litre), OS est le salaire de l'opérateur (XAF), PT est la taxe sur les propriétés (XAF), B_{liant} est la quantité de liant utilisée (kg), BP est le prix du liant (XAF/kg), P_{ackp} est le prix annuel de l'emballage (XAF), et LP est le remboursement annuel du prêt bancaire (XAF) qui peut être exprimé comme suit [146, 147] :

$$LP = \frac{INV}{\frac{1}{m} \cdot [1 - (\frac{1}{1+m})^N]} \quad (2.23)$$

Où INV est l'investissement initial et N le nombre fixe d'années de remboursement (5ans).

TABLE 2.4 – Paramètres économiques [3]

| Paramètres | Valeurs |
|---|-------------------------|
| Investissement initial | 17 000 000 XAF |
| Coûts de maintenance annuels | 328 000 XAF |
| Inflation des coûts de maintenance (j) | 5% |
| Prix de l'électricité | 79 (XAF/kWh) |
| Prix du liant | 130 (XAF/kg) |
| prix de l'emballage | 30 XAF/kg de briquettes |
| Prix du gasoil | 570 (XAF/kg) |
| Prix des briquettes sur le marché | 300 (XAF/kg) |
| Salaire des opérateurs | 468 (XAF/h) |
| Inflation de l'électricité (k) | 0,1% |
| Inflation globale du marché (i) | 2,4% |
| Taux d'intérêt bancaire (m) | 7 % |
| Taux d'actualisation (d) | 7% |
| Taux d'augmentation des salaires des opérateurs (n) | 3% |

2.5.1 Évaluation des paramètres économiques

Les paramètres économiques d'une industrie de production tels que la valeur actuelle nette et l'indice de rentabilité ont été estimés afin d'analyser de la rentabilité de l'activité menée de l'industrie.

1. Valeur Actuelle Nette (VAN) :

Elle est utilisée pour déterminer la rentabilité d'un projet. Si la VAN est positive, alors le projet peut être accepté. La VAN est la somme des flux de trésorerie nets actualisés

à un taux d et est donnée par l'équation suivante [146, 147] :

$$VAN = \sum \frac{(C_b - C_c)_t}{(1 + d)^t} \quad (2.24)$$

C_b est le bénéfice en espèces de l'investissement, C_c est le coût en espèces de l'investissement.

2. Indice de Profitabilité (IP) :

L'indice de Profitabilité (IP) décrit un indice qui représente la relation entre les coûts et les bénéfices d'un projet proposé. C'est un excellent outil qui permet d'évaluer les initiatives. L'indice de profitabilité est un outil d'évaluation des investissements qui s'obtient en divisant la valeur actuelle nette d'un projet par l'investissement initial du projet. Si l'IP > 0 , le projet est considéré comme acceptable.

2.5.2 Analyse de sensibilité économique

L'analyse de sensibilité souligne l'influence potentielle de l'usine par les facteurs les plus cruciaux et indique les aspects des opérations commerciales qu'il faut revoir. Les facteurs d'influence de la faisabilité économique de l'usine de production de briquettes sont généralement le taux d'actualisation, le coût du capital initial, le prix du marché des briquettes de biomasse [148]. Une analyse de sensibilité est utilisée pour évaluer l'impact de ces éléments cruciaux sur la Valeur Actuelle Nette de la production à partir des quatre résidus étudiés. Une simulation de la VAN est faite en faisant varier le taux d'actualisation, le coût du capital initial, le prix du marché des briquettes de biomasse de 0 % à 200% de leurs valeurs actuelles.

2.6 Analyse économique de l'utilisation des briquettes dans un ménage moyen

L'analyse économique de l'utilisation des briquettes dans les ménages est une étape cruciale dans l'étude de la possibilité de l'adoption desdites briquettes comme combustible de cuisson. Il s'agit ici de faire une étude théorique sur la base des données de la littérature et des données statistiques documentées dans [3, 133]. Cette section contribue à l'étude des briquettes de charbon écologique en examinant les avantages et/ou inconvénients financiers du remplacement des combustibles conventionnels (GPL, bois de chauffage, charbon de bois) par des briquettes fabriquées à partir de coques de noix de coco, de déchets de rotin, de pelures de banane et de bagasse de canne à sucre dans un ménage camerounais moyen de 5 personnes. L'analyse économique est faite en Francs CFA zone CEMAC (XAF), sachant que 1 XAF = 0,0016 Dollar = 0,0015 Euro à la date du 1er Janvier 2022.

2.6.1 Évaluation des coûts du cycle de vie de l'utilisation des briquettes

L'analyse économique a été choisie pour dix ans ce qui semble suffisant pour offrir des conclusions pour les systèmes, étant donné que la politique énergétique dans le monde entier est en constante évolution. De surcroît, le long terme pourrait entraîner une incertitude profonde inévitable. Le coût de l'utilisation de briquettes à base de coques de noix de coco, de pelures de bananes, de bagasse de canne à sucre et de déchets de rotin dans un four amélioré a été comparé au coût de l'utilisation des combustibles de cuisson conventionnels à savoir le GPL, le bois de chauffe et le charbon de bois. La méthode des coûts de Cycle de Vie (CCV) a été utilisée dans l'analyse économique. Le tableau 2.5 indique les pouvoirs calorifiques et les prix du marché local des combustibles étudiés et le tableau 2.6 illustre tous les paramètres utilisés pour l'analyse économique des systèmes de cuisson. L'approche CCV est utilisée pour comparer les systèmes de cuisson en termes de coûts et calcule la valeur actuelle du coût total du système en tenant compte des coûts d'énergie, de maintenance du four de cuisson et de capital initial qui représente le prix du four utilisé pour la cuisson. On suppose qu'aucun four n'est financé par un prêt bancaire en raison du coût relativement faible de l'équipement requis, et les banques locales n'accordent généralement des prêts que pour des sommes plus élevées. Par conséquent, l'utilisation du combustible de cuisson présentant le CCV le plus bas est le plus efficace. Ainsi, aucune technique probabiliste n'est employée dans cette analyse, donc aucun aléa n'est pris en compte, comme c'est la pratique courante pour de telles évaluations [146, 147].

Afin d'évaluer les CCV de chaque utilisation de combustible, la valeur du flux net de trésorerie annuel (FNT) est d'abord estimé, pour chaque année de simulation (T), à l'aide de l'équation suivante [146, 147] :

$$FNT_T = E_d.FC.(1 + i)^{(T-1)} + MC.(1 + j)^{(T-1)} + INV \quad (2.25)$$

Où E_d est la demande énergétique annuelle des ménages pour la cuisson (kWh), les besoins énergétiques d'un ménage moyen peuvent être estimés à 950 kWh par an [3], FC est le coût du combustible par unité (XAF/kWh), MC est le coût d'entretien (XAF), INV est le coût d'investissement initial du système de combustion (XAF), i est le taux d'inflation du coût du combustible, j est le taux d'inflation du coût d'entretien.

TABLE 2.5 – Valeur calorifique et prix du marché local des combustibles étudiés [3, 144]

| | CNC | DRT | BCS | PBN | GPL | Bois | Charbon |
|-----------------------------|------|------|------|------|-------|------|---------|
| PCI (kWh/kg) | 8,34 | 8,92 | 4,67 | 7,19 | 12,64 | 5,08 | 8,33 |
| Prix sur le marché (XAF/kg) | 300 | 300 | 300 | 300 | 520 | 200 | 350 |

La valeur actuelle PV_T , avec un taux d'actualisation du marché de d , à la fin de l'année T se calcule au moyen de l'équation suivante [146, 147] :

$$PV_T = \frac{FNT_T}{(1 + d)^T} \quad (2.26)$$

Dans les deux cas, les CCV sont estimés en additionnant les dix valeurs actuelles :

$$CCV = \sum PV_T \quad (2.27)$$

Finalement, la Valeur Actuelle du bénéfice Nette est donnée par l'équation 2.28 [146, 147].

$$PV_{NB} = CCV_{combustible_{conv.}} - CCV_{briquettes}. \quad (2.28)$$

TABLE 2.6 – Paramètres de l'analyse économique [144, 3]

| Paramètres | Valeurs |
|--|---------|
| Prix des briquettes faites de DRT (XAF/kWh) | 36,08 |
| Prix des briquettes faites de PBN (XAF/kWh) | 64,28 |
| Prix des briquettes faites de BCS (XAF/kWh) | 41,98 |
| Prix des briquettes faites de CNC (XAF/kWh) | 33,46 |
| Prix du GPL (XAF/kWh) | 41,32 |
| Prix bois de chauffage (XAF/kWh) | 78,72 |
| Prix du charbon de bois (XAF/kWh) | 42,64 |
| Demande annuelle d'énergie pour la cuisson (kWh) | 950 |
| Prix du fourneau pour le charbon de bois (XAF) | 6500 |
| prix du four pour les briquettes (XAF) | 6500 |
| prix de la bouteille de GPL et du four à gaz (XAF) | 40 000 |
| Coût d'entretien de la cuisinière GPL (XAF) | 3500 |
| Taux d'inflation du coût d'entretien (%) | 5 |
| Taux d'inflation du coût du combustible (%) | 2,4 |

2.6.2 Analyse de sensibilité économique

Pour chaque technologie examinée, une analyse de sensibilité est présentée pour montrer l'effet du taux d'actualisation, du coût du combustible conventionnel et du coût du capital sur la valeur actuelle du bénéfice net pour les briquettes de biomasse. Pour chaque système de cuisson, une simulation de la VABN est faite en faisant varier le taux d'actualisation de 0% à 20%. Cet intervalle est suffisamment large pour inclure le taux d'actualisation le plus couramment utilisé.

Conclusion

Ce chapitre détaille toute la démarche méthodologique suivie pour atteindre les objectifs de l'étude. La méthode du Rapport résidus/Produit a été utilisée pour évaluer le potentiel énergétique de la biomasse agricole. Les protocoles expérimentaux selon les normes ASTM et CEN ont été respectés pour la caractérisation physicochimiques, les formules empiriques ont été appliquées pour déterminer la composition élémentaire, le test d'ébullition de l'eau a permis d'analyser les paramètres de combustion des briquettes de charbon écologique à base de DRT, CNC, BCS et PBN. La méthode du facteur d'énergie primaire a été employée pour l'analyse énergétique de la production des briquettes. Enfin, l'évaluation des coûts de cycle de vie et l'analyse de sensibilité économique ont permis de faire l'analyse économique de la production et l'utilisation des briquettes dans un ménage camerounais de taille moyenne. Le chapitre suivant est consacré à la présentation et aux discussions des résultats de la méthodologie employée.

Chapitre 3

Résultats et Discussion

Introduction

Ce chapitre s'attèle à présenter les résultats obtenus après l'application de la méthodologie présentée au chapitre précédent. L'estimation du potentiel énergétique des déchets agricoles au Cameroun, l'analyse physico-chimique, élémentaire, le test de combustion et thermogravimétrique sont discutés. Il est également question ici d'interpréter les résultats de l'analyse énergétique ainsi que la rentabilité économique liée à la production et à l'utilisation des briquettes dans les ménages.

3.1 Potentiel énergétique de la biomasse agricole

Le tableau 3.1 présente les chiffres de l'estimation de la quantité annuelle de briquettes de charbon écologique dérivées de résidus agricoles étudiés ainsi que le potentiel énergétique national. Ces résultats montrent que la production annuelle de déchets agricoles est de 46 236 156 tonnes et que la conversion en briquettes de ces résidus pourrait produire 7 706 260 tonnes de briquettes. Le potentiel énergétique total de briquettes à partir des déchets choisis est de 106 139,65 TJ/an. Parmi les déchets étudiés, ceux de banane/plantain sont susceptibles de produire des briquettes avec le potentiel énergétique le plus élevé de 79 743,91 TJ/an, soit 75,1% du potentiel énergétique national, suivi par les résidus de maïs et de coton avec 16 204 TJ/an et 3571,87 TJ/an respectivement. Ceci est dû à la production annuelle élevée de production annuelle de banane/plantain (plus de 6 millions de tonnes) et à la valeur élevée du RRP des troncs de bananier. La figure 3.1 montre les valeurs du potentiel énergétique par région, et la cartographie du potentiel énergétique de la biomasse agricole au Cameroun.

À l'observation de cette figure, on remarque qu'il existe une variation régionale dans le potentiel énergétique des résidus de culture ; les régions du Centre, de l'Est, et du Sud ont les valeurs potentielles les plus élevées de 29,976 TJ.an, 21,166 TJ/an, et 18,000 TJ/an respectivement.

TABLE 3.1 – Potentiel énergétique des déchets

| Cultures | Production | déchets | Qté de déchets | Qté de briquettes | PCI résidu | PCI briquette | P Enr |
|-----------------|------------|--------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------------------|
| Riz | 359 320 | coques paille | 71 864 631 325 | 119 770 105 220 | 19,5 18,1 | 19,33 17,98 | 17,04 2204 094 1 891 871 |
| Banane/Plantain | 6 020 264 | pelures feuilles tronc | 1 505 066 2 107 092 33,713,478 | 250 840 351 180 5 618 910 | 17 11,37 11,66 | 21,41 17,7 12,13 | 5 370 577 6 215 923 68 157 415 |
| Maïs | 2 164 003 | enveloppes tiges épis | 432 800 4 328 006 590 772 | 72 130 721 330 98 460 | 15,56 13,79 16,30 | 16,8 17,8 20,89 | 1 211 842 12 839 751 2 056 874 |
| Arachides | 747 677 | coques | 356 641 | 59 440 | 15,66 | 22 | 1 307 687 |
| Coton | 289 994 | enveloppes Tiges | 144 997 1 084 577 | 24 160 180 760 | 16,57 13,07 | 16,83 17,51 | 406 717 3 165 159 |
| Noix de coco | 5 000 | bourre coques poussières | 5150 3000 3100 | 850 500 516 | 18,6 10,61 13,40 | 17,71 18,6 31,97 | 15 201 9 300 16 518 |
| Canne à sucre | 1 450 000 | bagasse feuilles | 420 500 437 900 | 70 083 72 983 | 17,54 15,81 | 22 19,11 | 1 541 833 1 394 712 |
| Noix de palme | 419 970 | coques | 20 578 | 3 429 | 17 | 14,25 | 48 874 |
| Café | 33 598 | enveloppes | 70 555 | 11 759 | 12,56 | 23 | 270 464 |
| Cacao | 308 753 | cabosses | 308 753 | 51 458 | 17,85 | 17,31 | 890 752 |
| Total | | | 46 236 160 | 7 706 030 | | | 106 139,65 |

Production : Production annuelle en t, **Qté de déchets** : Quantité de déchets produits (t), **PCI** : Pouvoir Calorifique Inférieur en MJ/kg,
Penr : Potentiel énergétique calculé en GJ par an

Ces valeurs du potentiel énergétique élevé peuvent s'expliquer par la végétation propice de ces régions. En effet, ces trois régions occupent la zone forestière du pays où les activités agricoles sont très développées. À l'Est, huit produits agricoles sont cultivés ; dans les régions du Centre et du Sud, toutes les cultures sont disponibles à l'exception du coton. En outre, certaines cultures génèrent des résidus pour la production de briquettes à pouvoir calorifique élevé. Les régions du Nord, du Nord-Ouest, du Sud-Ouest, du Littoral et de l'Ouest ont des valeurs intermédiaires de potentiel énergétique de 5 909,59 TJ/an ; 6 711,70 TJ/an ; 6 593,50 TJ/an ; 5 727,16 TJ/an ; 6 472,97 TJ/an respectivement. Parmi ces cinq régions, la région du Littoral présente la plus grande diversité de produits agricoles. Alors que le Nord ne possède que le maïs, le riz, de la banane/plantain, le coton et l'arachide comme culture, son potentiel est principalement dû à la culture massive du coton par la société nationale de coton (SODECOTON). Les régions du Nord-Ouest, du Sud-Ouest, du Littoral, et de l'Ouest ont une moyenne de six à sept cultures disponibles. La région de l'Extrême-Nord a une valeur énergétique potentielle relativement faible (3295,39 TJ/an). Ce potentiel est dominé par le maïs suivi du riz, de l'arachide et du coton.

La région de l'Adamaoua a le plus faible potentiel avec une valeur de 2 279,98 TJ/an ; il n'y a que quatre cultures potentiellement utilisables pour la production de déchets pour la production de briquettes de charbon écologique. Les déchets de maïs représentent plus de la moitié du potentiel de la région de l'Adamawa, ce qui s'explique par l'exploitation de la société MAISCAM, la société nationale de culture et de transformation du maïs.

Le potentiel énergétique est important bien qu'inégalement réparti sur le territoire. Ce potentiel est étroitement lié à la production agricole annuelle et aux types de déchets exploitables disponibles dans chaque région. Malgré cela, ce potentiel reste exploitable. Pour la mise en place d'infrastructures de briquetage, il convient de prendre en compte le type de déchets afin d'obtenir un rendement optimal. Les mélanges de biomasse peuvent être envisagés lors des saisons où certaines sources de biomasse ne sont pas disponibles en grande quantité. Comme dans de nombreux pays en développement, l'utilisation de la biomasse agricole pour la production de briquettes présenterait de nombreux avantages pour le développement durable du Cameroun. Le potentiel énergétique total des déchets agricoles a été estimé par Mboumboue et Djomo à 289,4 TJ/an [73] ; ce chiffre est de loin plus élevé que celui estimé dans cette étude. Mais, l'ensemble des résidus agricoles étudiés dans le travail de Mboumboue n'ont pas été pris en compte dans notre étude car elles ne sont pas adaptées au briquetage tels que la paille de blé, les épluchures de patates douces et la paille de haricots. Elles peuvent donc encore subir une gazéification, une fermentation, une digestion anaérobie ou autre forme de valorisation énergétique. La valeur du potentiel énergétique trouvée dans les trois régions septentrionales du pays (Nord, Extrême-Nord, Adamaoua) est équivalente à celle trouvée par Inna Samnoussa (11,5 TJ/an) qui a concentré son évaluation uniquement dans cette partie du pays. Cepen-

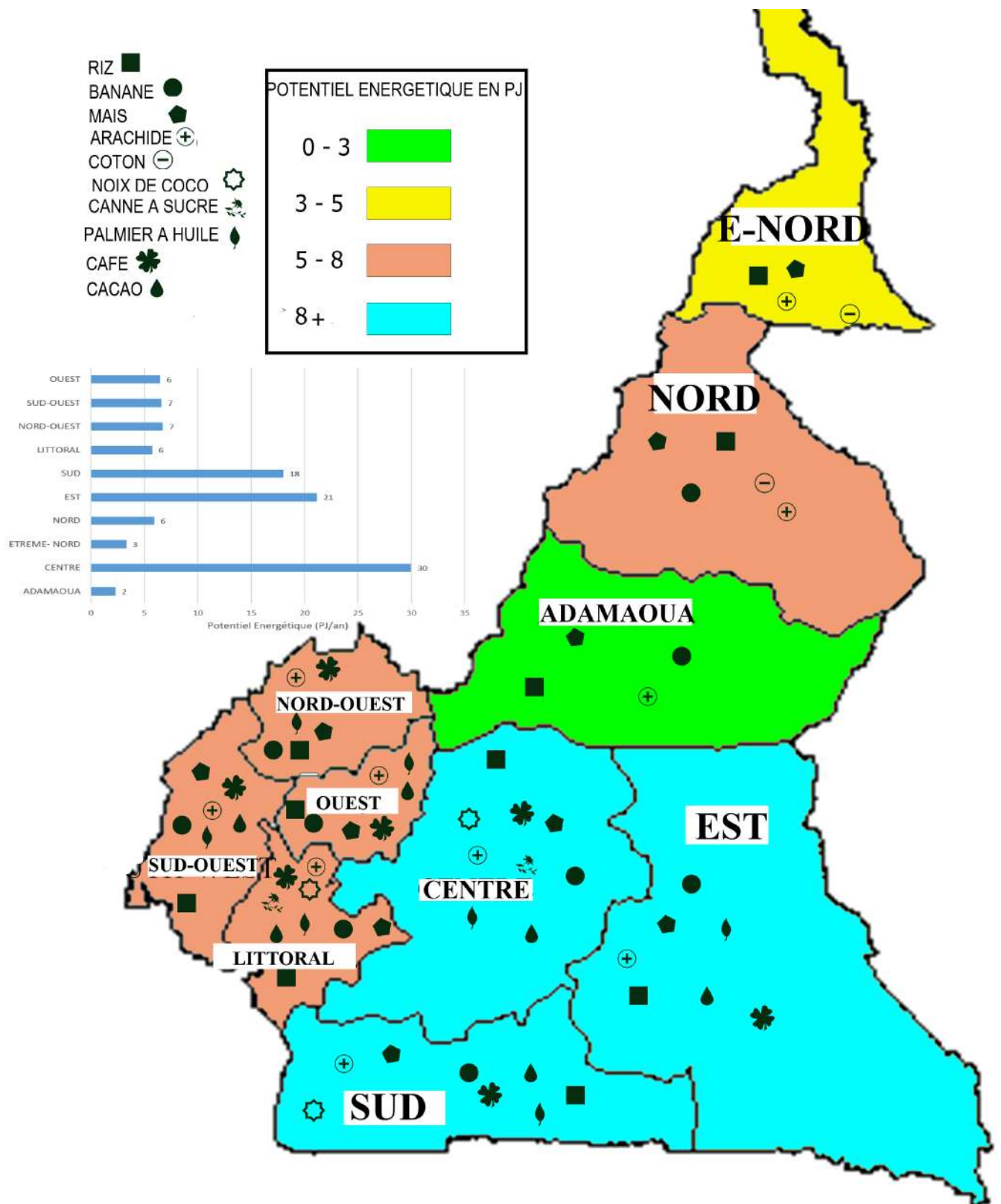


FIGURE 3.1 – Potentiel énergétique et répartition nationale des cultures

dant, il est démontré dans cette étude, comme dans celle de Mboumboue que l'évaluation du potentiel est uniquement liée aux caractéristiques de la biomasse et ne considère pas un mode de conversion particulier. Les résultats de l'évaluation montrent que le potentiel

de production de briquettes est considérable au Cameroun. Malheureusement, il est sous-exploité malgré les nombreux avantages, certainement à cause de certaines contraintes. La section suivante discute des avantages et bénéfices liés à la production de briquettes à partir des déchets agricoles au Cameroun.

3.2 Bénéfices de la conversion de la biomasse agricole en briquettes

La possibilité de valoriser la biomasse agricole camerounaise pour fabrication industrielle de briquettes aura de nombreux avantages environnementaux, énergétiques, économiques et sanitaires.

1. Préservation de l'environnement

Pour la cuisson des aliments dans les ménages, 18,3 % des Camerounais utilisent le GPL/ biogaz, 3,8 % le kérosène/pétrole, 70,5 % le bois, 2,4 % le charbon de bois, 0,6 % des déchets agricoles et 4,4 % d'autres sources. Parmi ces sources d'énergie, le GPL est la moins toxique. Malheureusement, il n'est pas en mesure de répondre aux besoins énergétiques des zones reculées du pays en raison de son prix élevé et de son approvisionnement difficile. La grande partie de l'énergie est dérivée du bois de chauffage (bois, charbon de bois et résidus de bois), ce qui contribue aux problèmes environnementaux comme le déboisement. L'utilisation de briquettes comme substitut au bois de chauffage permettrait la limitation des GES, notamment le dioxyde de carbone (CO_2) et le méthane (CH_4). Certaines études sur les briquettes ont montré qu'elles libèrent une petite quantité de soufre et d'azote lors de la combustion [83]. La valorisation de cet important potentiel camerounais permettrait de préserver la qualité de l'air. Par ailleurs, les activités de valorisation de ces déchets contribueraient à l'assainissement de l'environnement. Enfin, l'utilisation des briquettes permettrait d'éviter la détérioration des forêts.

2. Approvisionnement en énergie

Comme le montre la Figure 3.2, le potentiel énergétique est en forte croissance, certainement en raison des taux de croissance agricole élevé. Une population croissante pourrait déclencher la culture de variétés végétales à haut rendement et l'utilisation de pratiques culturales modernes [149]. La politique gouvernementale vise à augmenter considérablement cette production agricole avec la mécanisation des cultures, en particulier des cultures vivrières telles que le riz, l'arachide, le maïs, la banane et le coton.

Cela augmentera la disponibilité des résidus agricoles. L'énergie supplémentaire pourrait être utilisée dans l'industrie ou pour produire de l'électricité. L'utilisation de briquettes à partir de la biomasse agricole contribuerait à la transition énergétique du

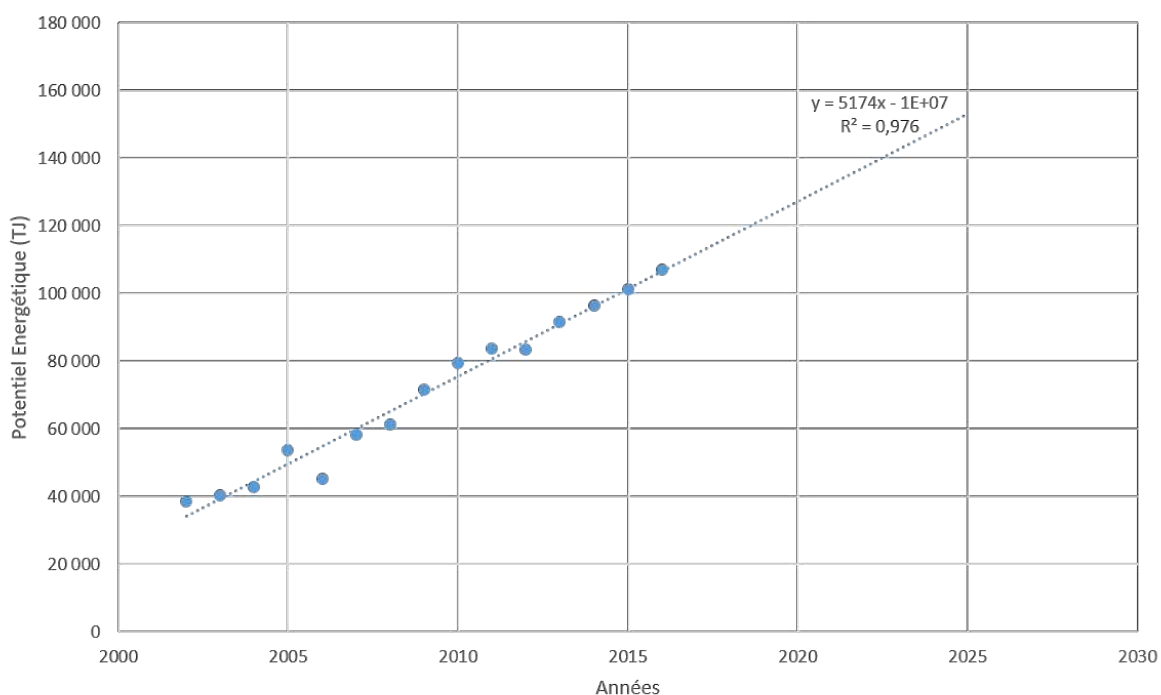


FIGURE 3.2 – Évolution annuelle du potentiel énergétique de la biomasse agricole

Cameroun car elle est écologiquement durable, socialement équitable et économiquement viable comme le recommande [150, 151].

3. Aspect socio-économique

Les briquettes de charbon écologique peuvent être produites au niveau local. Ce qui est un avantage pour les communautés et les agriculteurs car ceux-ci auraient l'occasion de développer des activités commerciales supplémentaires et économiquement rentables. La pauvreté et l'exode rural pourraient également être réduits. En effet, la mise en place d'entreprises de production de briquettes dans les zones rurales permettrait également de créer des emplois, et les villageois n'iraient pas en ville à la recherche de meilleures conditions de vie. De plus, ce secteur technologique attirerait de nombreux investisseurs, ce qui améliorerait la qualité des infrastructures.

4. Santé et sécurité

Selon l'Organisation mondiale de la santé (OMS), l'inhalation de polluants de combustion par les femmes et les enfants provoque des problèmes de santé. L'inhalation de polluants issus de la combustion par les femmes et les enfants provoque des maladies olfactives et des troubles respiratoires tels que la pneumonie, la bronchite chronique ou même le cancer [150]. Certaines femmes ont été victimes d'agressions et de viols lors de la collecte de bois de chauffage dans la forêt. L'utilisation de briquettes de charbon de bois pourrait être une solution à ce problème.

3.3 Contraintes de la conversion de la biomasse agricole en briquettes et propositions de solutions

Malgré la richesse et la diversité de la biomasse agricole énergétique, les activités liées à sa valorisation ne semblent pas être développées ou répandues sur le territoire national. Ceci est liée à plusieurs difficultés d'ordres technologique, climatique et logistique.

3.3.1 Technologique

Les unités de productions localisées au Cameroun suivent le processus de briquetage conventionnel tel que décrit dans la littérature. Pour la plupart, l'investissement initial est inférieur à 5 millions XAF, ce qui ne leur permet pas d'acquérir des équipements de pointe. Par conséquent, les chances de produire des briquettes de bonne qualité sont réduites, toutefois, il est possible de produire des combustibles avec des moyens très limités. Il est à espérer que le soutien de ce type d'initiative permettra d'améliorer l'exploitation du potentiel énergétique et inonderait le marché de briquettes de bonne qualité à bas prix. Ce qui devrait également permettre de sensibiliser et d'informer sur la possibilité d'utiliser les déchets agricoles. Les agriculteurs et les communautés locales ne semblent pas être conscients de l'importance de ces déchets, qui sont souvent rejetés dans la nature pour certains et brûlés pour d'autres. La technologie avancée qui devrait être utilisée pour la production de briquettes est presque onéreuse, mais il est possible d'utiliser des équipements locaux qui sont relativement facile à installer, comme cela a été fait dans certains pays en voie développement tels que le Burkina Faso, le Sénégal, le Kenya et l'Ouganda [9, 8, 105].

3.3.2 Disponibilité saisonnière

Le calendrier des saisons doit être pris en compte lors de la valorisation des résidus agricoles. Selon le rapport de l'Observatoire National de Changements Climatiques (ONACC) sur les activités agricoles au Cameroun, le riz, la banane/plantain, le maïs, l'arachide, le coton, l'huile de palme, le café et le cacao sont des cultures saisonnières [152]. Le maïs et l'arachide sont récoltés au cours des mois de juin, juillet et décembre, le palmier à huile est récolté entre octobre et décembre et le café entre novembre et décembre.

La banane/plantain est récoltée de septembre à mars, le coton de novembre à janvier, et le riz de mai à juillet. Les sources de déchets ne sont pas uniformément réparties tout au long de l'année, ce qui influence le potentiel énergétique. La figure 3.3 montre le potentiel énergétique mensuel sur le territoire national.

Le mois de décembre présente le potentiel le plus élevé, ce qui peut s'expliquer par le fait que toutes les cultures sont récoltées au cours de ce mois. Novembre et janvier suivent avec des potentiels de 13 430 TJ et 12 706 TJ respectivement, par contre en août et avril, le potentiel énergétique est le plus faible (124,27 TJ). Comme aucune culture saisonnière

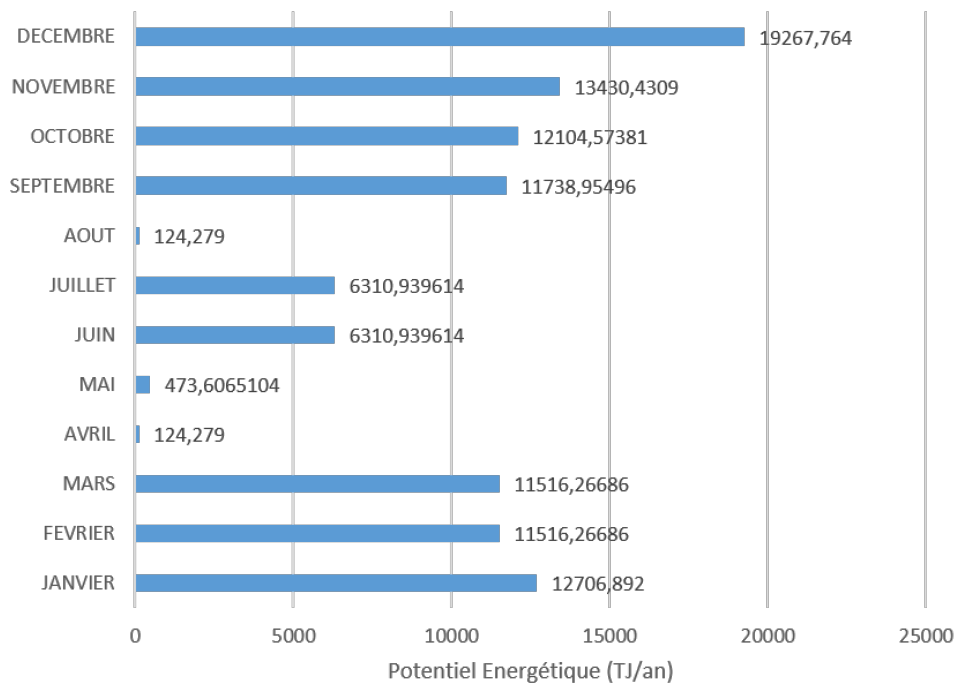


FIGURE 3.3 – Potentiel énergétique mensuel

n'est récoltée, ces deux mois sont généralement réservés à la protection des plantes ou à la préparation des terres pour les semis. Si un programme adéquat d'exploitation des déchets agricoles pour le briquetage n'est pas adopté, cela peut conduire à une pénurie de ressources pendant les périodes de déficit en matières premières, notamment en avril, mai et août. Pour résoudre ce problème, certaines techniques de conservation telles que le séchage devraient être appliquées afin que les résidus excédentaires générés pendant la période de septembre à mars soient encore disponibles en avril-mai

3.3.3 Logistique

La région du Littoral à elle seule compte six unités de production, alors qu'elle n'a que le sixième potentiel énergétique du pays. Ceci est certainement dû au fait que cette région est la plus peuplée et ses activités économiques sont les plus prolifiques. Il y'a donc un risque d'épuisement de ressources dans la région ; les producteurs devront s'en procurer dans d'autres régions. Et partant, une augmentation des coûts de production se fera ressentir.

La dispersion des résidus de culture sur le territoire national pose un problème de chaîne d'approvisionnement pour leur collecte en vue de leur conversion énergétique. Le coût des opérations logistiques pour la mise en briquettes des résidus de biomasse agricole constitue un goulot d'étranglement majeur pour leur utilisation. Ceci est dû à la complexité des chaînes d'approvisionnement qui doivent être mises en œuvre [153]. Les coûts de collecte, de transport, de stockage et de briquetage des résidus sont à la base

des aspects économiques à prendre en compte. Ces coûts sont influencés par les conditions spécifiques au site, la disponibilité de la biomasse, et la conception de la chaîne de traitement. La logistique de l'utilisation des résidus de biomasse peut être influencée par la densité de distribution de la biomasse, l'échelle, la distance relative au lieu d'approvisionnement. D'autres facteurs qui peuvent affecter l'économie du système sont les suivants l'existence d'une infrastructure, la situation géographique de la zone, l'environnement réglementaire et la concurrence avec d'autres combustibles. Cependant, malgré ces difficultés, la valorisation énergétique des résidus de la biomasse agricole peut être réalisée sans perte financière si la logistique est bien planifiée et si la technologie énergétique est bien établie [154].

3.4 Résultats de la production et caractérisation des briquettes

Les briquettes de charbon écologique qui ont été produites à base de coques de coco, de déchets de rotin, la bagasse de canne à sucre et les pelures de banane, ont subi une caractérisation afin d'apprécier leurs performances énergétiques. Les résultats de l'analyse de la diminution de la masse des résidus au cours de la production et de la caractérisation sont présentés dans cette section.

3.4.1 Analyse de la diminution de la masse de la matière au cours du processus

La figure 3.4 montre l'évolution de la masse humide des déchets de rotin et des coques de noix de coco pendant le processus de production. La masse de la biomasse a été pesée à chaque étape du processus.

Il ressort des courbes d'évolution que la masse finale des briquettes fabriquées à partir de déchets de rotin est de 18,32 kg, alors que celle initiale des résidus était de 100 kg, soit une perte totale de 81,67 % alors que le taux de perte de masse des coques de noix de coco est de 80,15 %. Ces deux matières premières ont connu des évolutions de masse presque similaires ; à la fin du séchage, la masse des résidus est restée quasiment la même. Ceci est dû au fait que lesdits déchets sont naturellement secs et contiennent très peu d'humidité. À la fin de la carbonisation, les résidus subissent la plus grande perte de masse de tout le processus de préparation, les taux de perte de masse sont de 76,18 % et 67,25 % pour les coques de noix de coco et les déchets de rotin respectivement. À la fin de cette deuxième étape, la masse des résidus de coques de noix de coco carbonisés est légèrement inférieure à celle des déchets de rotin carbonisés. Cela est sans doute dû à la forte teneur en hydrogène, en oxygène et en azote des coques de noix de coco qui sont éliminés pendant la carbonisation. La teneur en carbone des déchets de rotin est plus élevée car il s'agit

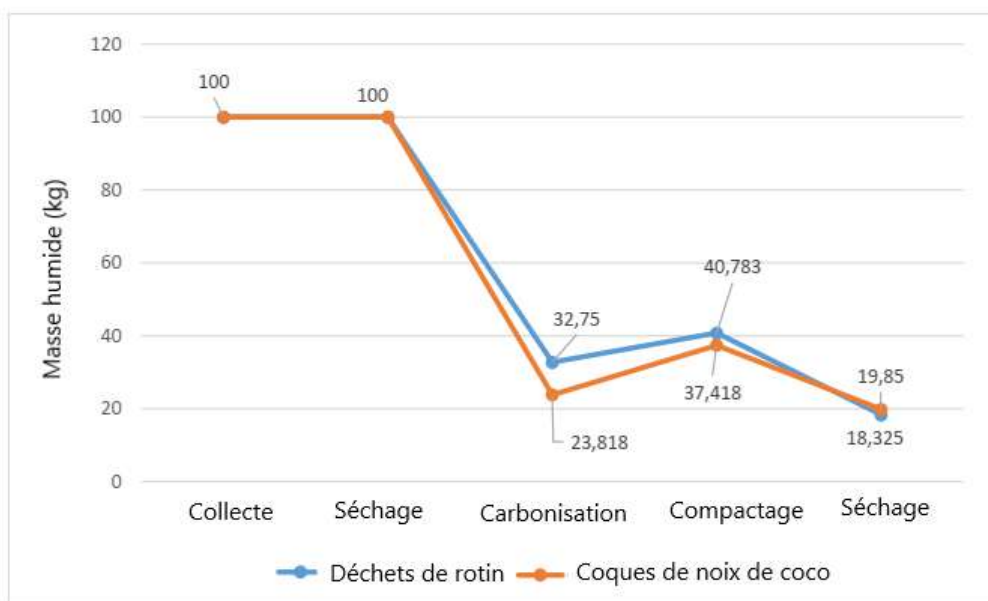


FIGURE 3.4 – Diminution de la masse des peaux de banane et bagasse de canne à sucre

de résidus de branches qui ont absorbé du carbone pendant la photosynthèse. À la fin du briquetage, on peut constater que la masse des briquettes humides a presque augmenté de 50 % ; cela est dû à l'ajout du liant pendant le mélange. Lors de la dernière tape de séchage des briquettes produites, environ la moitié de leur poids est perdue.

La masse humide des peaux de banane et de la bagasse de canne à sucre a été pesée

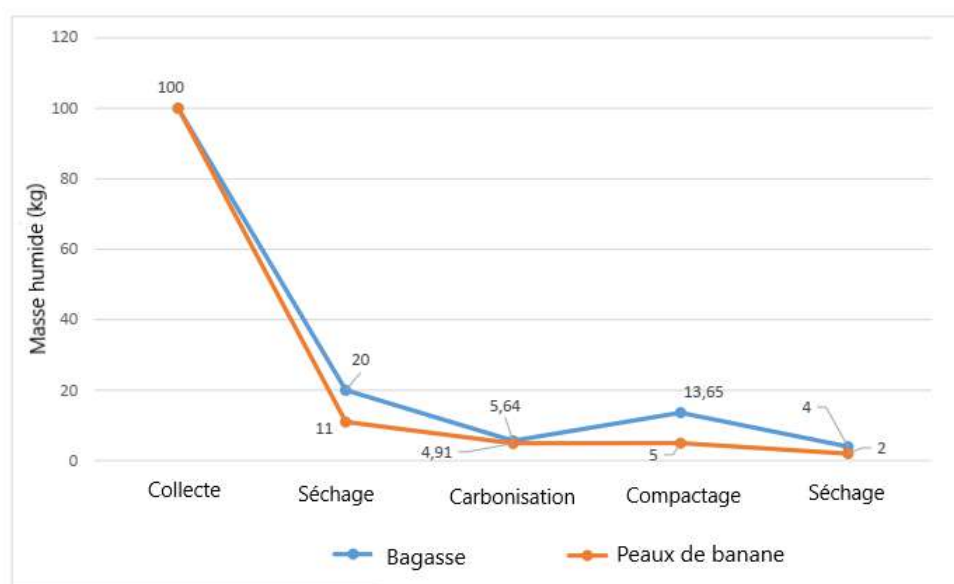


FIGURE 3.5 – Diminution de la masse des peaux de banane et bagasse de canne à sucre

à chaque étape du processus et son évolution est présentée sur la figure 3.5. Les courbes d'évolution de masse montrent que la masse finale des briquettes fabriquées à partir des déchets de peaux de bananes est de 2,07 kg alors que la masse initiale des résidus était de

100 kg, soit une perte totale de 97,93% alors qu'une masse initiale de 100 kg de bagasse de canne à sucre a permis de produire 4 kg de briquettes, soit un taux de perte de masse de 96 %. Les courbes d'évolution de masse de ces deux matières premières sont assez similaires; lors du séchage, les peaux de banane ont perdu 89 % de leur masse initiale et la bagasse de canne à sucre 80 %, c'est l'étape pendant laquelle les résidus subissent la plus grande perte de masse de tout le processus de fabrication. Ceci est dû au niveau naturel d'humidité de ces résidus. À la fin de la carbonisation, on observe que la masse des résidus carbonisés représente environ un quart de la masse des résidus introduits dans le carbonisateur, soit 5,64 kg pour les peaux de bananes et 4,91 kg pour la bagasse de canne à sucre. Les deux déchets présentent quasiment les mêmes niveaux d'hydrogène, d'oxygène et d'azote éliminés au cours de cette étape. À la fin du compactage, on constate que la masse des briquettes humides fabriquées à partir de peaux de banane a légèrement augmenté tandis que celle de la bagasse de canne à sucre a doublé en raison de l'ajout du liant lors du malaxage. Lors de la dernière étape, qui consiste à sécher les briquettes produites, celles de peaux de bananes ont perdu 59,11 % de leur masse initiale alors que celle de la bagasse de canne à sucre est de 70,6 %. Les briquettes produites et séchées sont présentées à la figure 3.6



FIGURE 3.6 – Échantillon de briquettes produites

3.4.2 Résultats de l'analyse physico-chimique

Le tableau 3.2 résume les résultats de l'analyse physico-chimique des briquettes produites dans notre étude.

TABLE 3.2 – Résultats de la caractérisation physico-chimique

| Déchets | MV | TH | PCS | PCI | TC | TMV | PCF |
|--------------------------|-------|------|--------|--------|--------|-------|-------|
| Peaux de bananes | 0,678 | 7,64 | 16,983 | 16,813 | 11,95 | 60,92 | 19,49 |
| Déchets de rotin | 0,793 | 5,57 | 30,077 | 30,031 | 7,44 | 68,12 | 18,87 |
| Coques de noix de coco | 0,851 | 4,33 | 32,169 | 32,10 | 10,02 | 70,50 | 15,15 |
| Bagasse de canne à sucre | 0,470 | 5,97 | 25,938 | 25,872 | 11,511 | 63,54 | 18,98 |

MV est la masse volumique apparente en g/cm^3 , **TH** est le Taux d'Humidité en %, **PCS** est le Pouvoir Calorifique Supérieur en MJ/kg, **PCI** est le Pouvoir Calorifique Inférieur en MJ/kg, **TC** est le Taux de Cendres en % , **TMV** est le Taux de Matières

Volatiles en % , **PCF** est le Pourcentage de Carbone Fixe en %

- Masse volumique apparente

Au vu des résultats donnés dans la première colonne du tableau 1, la comparaison entre les masses volumiques de ces briquettes a indiqué que les coques de noix de coco avaient la densité la plus élevée ($0.851g/cm^3$) suivie par les déchets de rotins avec $0.793g/cm^3$. Ensuite, les briquettes fabriquées à partir de peaux de bananes ont une masse volumique de $0.678g/cm^3$ et la masse volumique de celles fabriquées à partir de bagasse de canne à sucre qui est de $0.470g/cm^3$. Selon la littérature, le charbon produit à partir de la biomasse des déchets agricoles a une faible Masse volumique ($0,76 - 1,80g/cm^3$) [155], et les résultats de notre densité apparente du rotin et des coques de noix de coco se situent dans la fourchette recommandée. Les peaux de banane et la bagasse de canne à sucre ont une faible masse volumique apparente en raison de la nature des résidus, en effet, la masse volumique des briquettes de biomasse dépend de la densité des matériaux de biomasse d'origine, ces résultats sont en accord avec la littérature qui stipule que la densité des briquettes de biomasse dépend de la densité de la biomasse d'origine [156]. Les valeurs de densité des briquettes fabriquées à partir de coquilles de noix de coco et de bagasse de canne à sucre obtenues dans cette étude sont inférieures à celles trouvées par Teixeira ($1.12g/cm^3$) et Smith ($0.845g/cm^3$) [103, 157], cela peut s'expliquer par la haute pression pendant l'étape de compactage appliquée par ces auteurs. Smith a fabriqué des briquettes avec une presse à 122,5 MPa tandis que Teixeira a appliqué une forte pression de compactage de 5 tonnes.

- Taux d'humidité

Au vu des valeurs de taux d'humidité présentées au tableau 3.2, il apparaît que les briquettes de charbon fabriquées à partir de peaux de bananes contiennent plus d'humidité (7,64%) que les autres. Cela peut être dû à la présence d'un excès de graisse et de substances collagènes dans la peau. Viennent ensuite celles fabriquées à partir de coques de noix de coco (4,33%) puis celles de canne à sucre (5,97%) et enfin celles de rotin (5,57%). Ces valeurs sont bonnes pour la combustibilité de la brique et sont en accord avec la littérature [158] qui recommande un taux d'humidité de 5-10% pour des briquettes de bonne qualité fabriquées à partir de déchets agricoles. Les résultats obtenus sont également corroborés par [23] qui a rapporté qu'un taux d'humidité plus faible implique un pouvoir calorifique plus élevé. Conformément à Aina et al., la teneur en humidité est une caractéristique importante de la qualité des briquettes [159]. Généralement, une teneur en humidité élevée conduit à un gonflement des briquettes et à leur dégradation rapide, La teneur en humidité de la brique au-dessus du niveau de tolérance diminue son efficacité thermique ainsi que son taux de combustion. Un autre inconvénient d'une teneur en humidité élevée est la facilitation d'un terrain de reproduction pour les champignons

et autres micro-organismes.

- Taux de Cendre

D'après les résultats, la teneur en cendre des briquettes fabriquées à partir de déchets de rotin est la plus faible, et le taux de cendre des peaux de banane est la plus élevée. Même si le niveau de tolérance de la teneur en cendre pour le combustible est inférieur à 4% [160], il faut signaler que le charbon de bois produit à partir de la biomasse des déchets agricoles a une teneur en cendres relativement élevée (9,4 - 22,1%) [155], et les résultats de la teneur en cendres des briquettes fabriquées à partir de coquilles de noix de coco et de bagasse de canne à sucre se situent dans la fourchette recommandée.

- Taux de Matières Volatiles

Les résultats montrent que la teneur en matières volatiles la plus faible (60,92%) a été obtenue pour les briquettes de pelures de banane, tandis que la teneur en matière volatile la plus élevée (70,50 %) a été obtenue pour les coques de noix de coco ; cela signifie que plus d'énergie sera nécessaire pour brûler les briquettes de noix de coco avant la libération de l'énergie thermique qui y est contenue. Une teneur élevée en matières volatiles est une indication de la capacité des échantillons de combustible à s'enflammer. En termes de qualité de la briquette, une teneur élevée en matières volatiles implique que la briquette produira une flamme de forte proportion pendant la combustion. Cette valeur élevée de la matière volatile est corroborée par [23] qui a rapporté que la biomasse a généralement une matière volatile élevée autour de 70% - 86%.

- Pourcentage de Carbone Fixe

En général, il a été observé que plus la teneur en carbone fixe est faible, plus les briquettes ont tendance à être dures, lourdes et s'enflamment plus facilement. Les peaux de banane et la bagasse de canne à sucre ont le pourcentage le plus élevé de carbone fixe de 19,49 % et 18,98 % respectivement. La teneur en carbone la plus faible a été observée dans les déchets de rotin et les coquilles de noix de coco, soit 18,87% et 15,15 % respectivement. Globalement, le Carbone Fixe des briquettes produites, était dans la gamme de 15.15-19.49%, ces valeurs sont similaires à celles des coquilles de noix de cajou et des coquilles de noix d'arec 17.23-20.62%, (20%) [35] et des briquettes de charbon de sciure de bois (20%) [23].

- Pouvoir Calorifique

Le pouvoir calorifique est une propriété très importante du combustible, il détermine la quantité d'énergie thermique présente dans un matériau. On observe immédiatement que les valeurs énergétiques des briquettes de coques noix de coco sont plus élevées que les autres, ce qui implique que sa chaleur de combustion est élevée par rapport aux autres,

cependant l'accès aux déchets de coco n'est pas du tout évident, par contre, les pouvoirs calorifiques des briquettes de peaux de banane sont faibles. Le pouvoir calorifique de la briquette fabriquée à partir de bagasse de canne à sucre produite ici est corroboré par [32, 103] qui ont déclaré que le PCI de la briquette fabriquée à partir de bagasse de canne à sucre est compris entre 22,6 MJ/kg - 29,08MJ/kg et 25,55 MJ/kg respectivement. Les valeurs calorifiques des coques de noix de coco, des déchets de rotin et de la bagasse de canne à sucre sont supérieures à celles d'autres matières premières de la biomasse telles que les coques de noix de cajou (20,18 MJ/kg), les coques de noix d'arec (16,17 MJ/kg). Les peaux de banane ont un PCI inférieur à celui de la balle de riz (17,6-18,1 MJ/kg) [9] mais ont une valeur supérieure à celle de nombreux résidus agricoles comme la paille de blé (16,27 MJ/kg), la paille de maïs (15,54 MJ/kg) et la paille de riz (16,16 MJ/kg) [83].

3.4.3 Résultats de l'analyse élémentaire

Le tableau 3.3 présente les résultats de l'analyse élémentaire obtenus à travers les formules empiriques. Les taux de carbone des briquettes varient entre 44,13 et 48,01% ; ce qui est supérieur aux valeurs trouvées par Ajimotokan et Akowah [137], et proche des valeurs de et Akowuah [23]. Les taux d'hydrogène sont compris entre 5,9 et 6% sont élevés par rapport à ceux trouvés par Lubwama et Yiga [8], mais proche des résultats de [137].

TABLE 3.3 – Composition élémentaire des briquettes

| Caractéristiques | DRT | CNC | BCS | PBN |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Carbone | 48,01 | 49,9 | 44,9 | 45,13 |
| Hydrogène | 6 | 6,2 | 5,95 | 5,9 |
| Oxygène | 38,17 | 37,04 | 35,09 | 34,92 |
| Autres (Soufre, Azote, ...) | 7,2 | 6,86 | 14,6 | 14,05 |
| H/C | 1,15 | 1,16 | 1,12 | 1,13 |
| O/C | 0,42 | 0,45 | 0,40 | 0,41 |

Les taux d'oxygène sont compris dans la plage de 34,92 à 38,17 % : ce qui est inférieur à la plupart des valeurs de la littérature. Ces valeurs trouvées montrent que la carbonisation s'est effectuée à haute température comme le démontre Sessa et al., 2021, qui rapportent que plus le taux de carbone est élevé et les taux d'hydrogène et d'oxygène sont bas et la la température de pyrolyse est élevée [161].

La moyenne des rapports H/C est 1,124 ce qui est inférieur à 1,5 valeur à laquelle le charbon est moins inflammable et celle du rapport O/C est 0,452 ce qui correspond à la biomasse lignocellulosique et permettra aux briquettes d'être stables.

Les briquettes B ont des rapports de H/C et de O/C plus élevés. Ces valeurs trouvées sont plus élevées que celles déterminées par Kapen et al., sur les biomasses agricoles ce qui est dû à la composition chimique des bois tropicaux qui sont fortement carbonés [11].

Le rapport H/C des déchets de rotin est 1,15, 1,16 pour les briquettes de coques de noix de coco, 1,12 pour les briquettes de bagasse de canne à sucre et 1,13 pour les briquettes de peaux banane ; ces valeurs sont corroborées par la plupart des résultats expérimentaux documentés dans la littérature [11, 31, 32, 132, 38].

3.4.4 Résultats de l'analyse thermogravimétrique

Les figures 3.7, 3.8, 3.9, 3.10 présentent les résultats du comportement de décomposition des briquettes de biomasse dans une atmosphère inerte à une vitesse de chauffage de $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ dans l'analyseur. Les courbes TG (ThermoGravimétric) en couleur rouge montrent la décroissance du pourcentage de perte de masse des briquettes au cours de la pyrolyse en fonction de la température. Les courbes DTG (Differential ThermoGravimetric) en noir montrent l'évolution de la dérivée des pertes en masse dans l'atmosphère inerte [87].

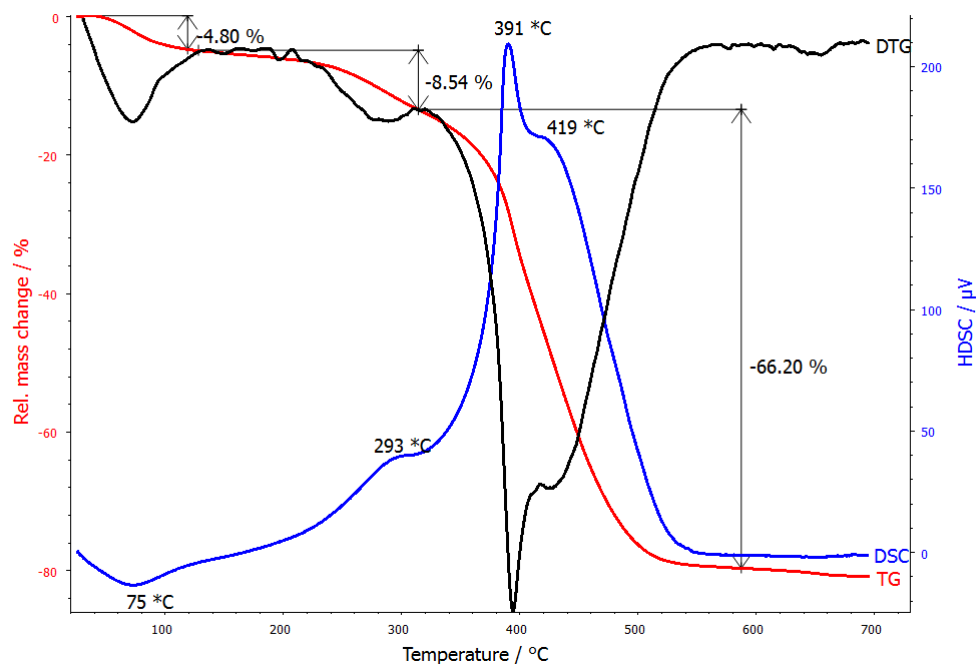


FIGURE 3.7 – Courbes TG, DSC et DTG des briquettes BCS

Alors que celles de DSC : Differential Scanning Calorimetry (Calorimétrie différentielle à balayage) en couleur bleue décrivent la manière avec laquelle la différence de quantité de chaleur nécessaire pour augmenter la température d'un échantillon et d'une référence se comporte en fonction de la température.

Selon l'ensemble de ces courbes, une première zone de température est observée de la température ambiante à 270°C environ pour les briquettes de DRT et 300°C pour les briquettes de BCS, PBN et CNC. Pendant cette étape, un léger changement dans le pourcentage de perte de masse a été observé, ceci est dû à l'élimination de l'humidité

initiale et d'autres composés peu volatiles des briquettes. Il s'agit de la phase initiale de séchage.

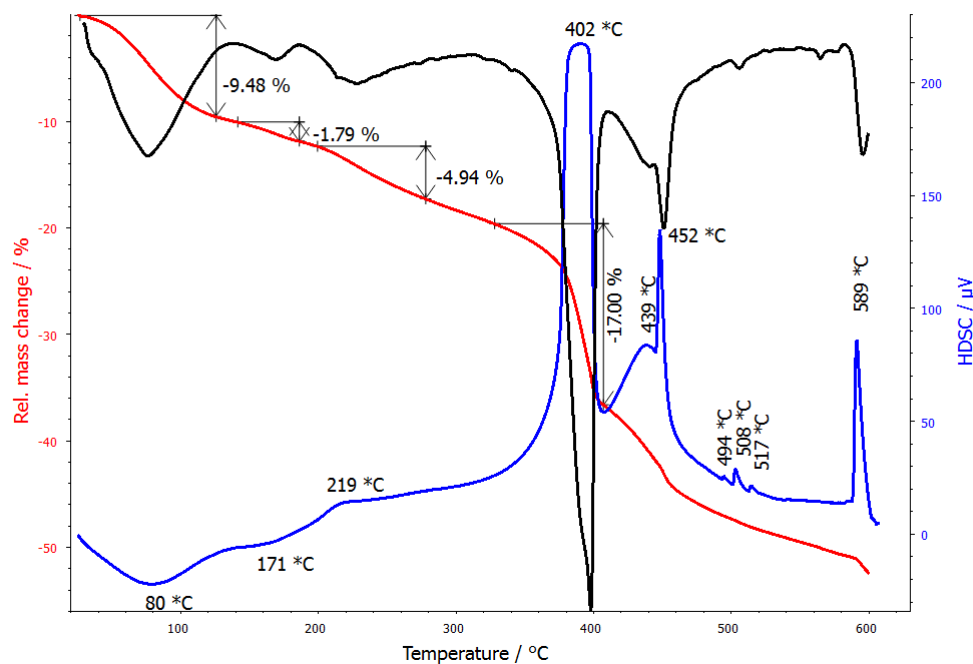


FIGURE 3.8 – Courbes TG, DSC et DTG des briquettes PBN

La zone de la deuxième étape est observée de 300°C à 500°C . La pente des courbes a été trouvée plus raide, les briquettes perdent considérablement de la masse avec l'augmentation de la température. Les profils des courbes indiquent la dégradation des hémicelluloses (augmentation du DTG) et de la cellulose (pic du DSC). Il est rapporté dans la littérature que la zone de température entre $200 - 370^{\circ}\text{C}$ est communément appelée la zone de pyrolyse active, où la dévolatilisation maximale est observée en raison des processus de complexation à plusieurs étapes [162].

Dans la troisième étape, de 500°C à 700°C , les courbes montrent une pente moins raide par rapport à l'étape précédente, probablement en raison du ralentissement de la réaction. Ceci est dû à l'augmentation de la dégradation de la lignine, ainsi qu'à certaines réactions exothermiques et endothermiques entre les différents produits de dégradation. Les produits générés subissent de nombreuses réactions parallèles entraînant la formation de produits gazeux et liquides. Cette étape est communément appelée l'étape de pyrolyse active [162, 8].

Les briquettes produites à partir de PBN et BCS ont besoin d'une bonne quantité d'énergie pour s'enflammer, et elles ne déploieront pas une grande quantité d'énergie calorifique pendant la combustion en raison de leur teneur élevée en cendres et de leur faible pouvoir calorifique. Au vu de tout cela, il ne semble pas intéressant de valoriser ces résidus, mais les statistiques estiment la production annuelle de banane/plantain et

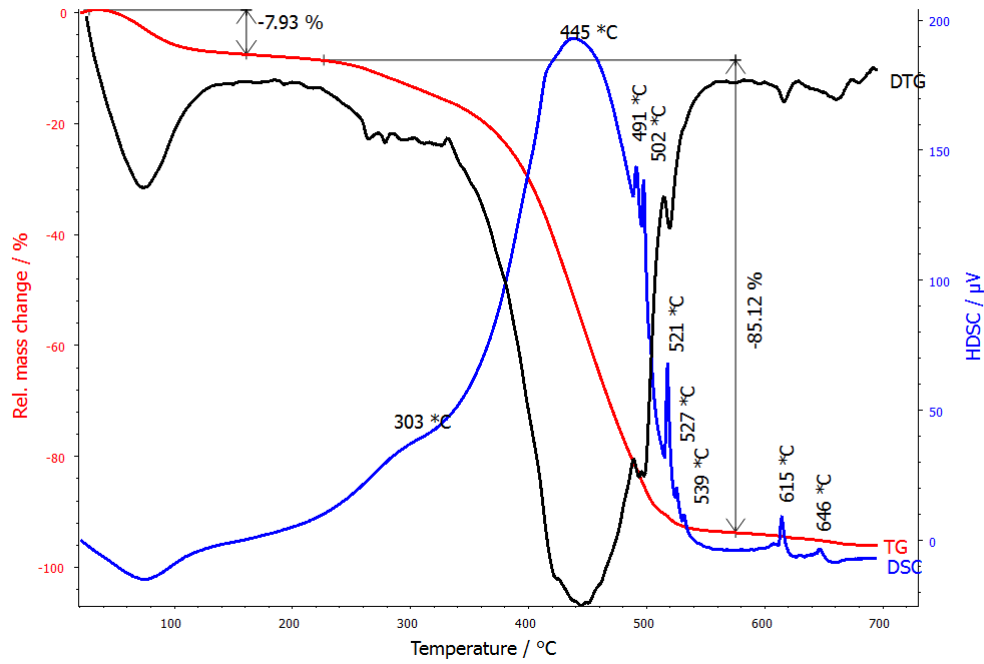


FIGURE 3.9 – Courbes TG, DSC et DTG des briquettes DRT

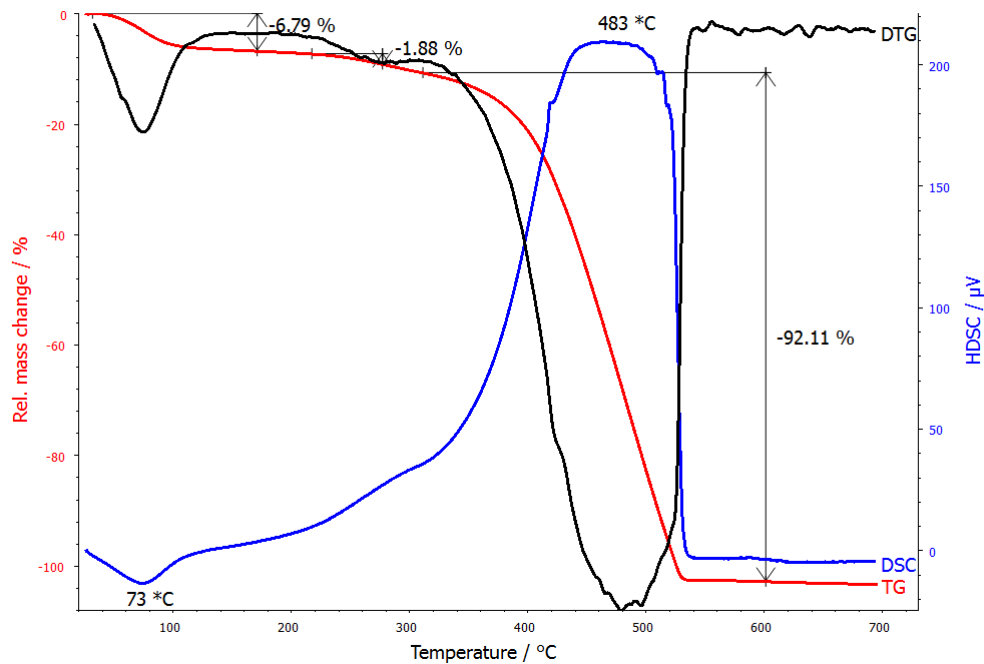


FIGURE 3.10 – Courbes TG, DSC et DTG des briquettes CNC

de canne à sucre du Cameroun à 4 850 ktonnes et 1 450 ktonnes respectivement. Cela correspond à 1 212,5 ktonnes de peaux de bananes produites et 343,5 ktonnes de bagasse produites chaque année. Ces chiffres démontrent la grande quantité de résidus agricoles disponibles et devraient encourager l'utilisation de ces déchets pour le briquetage, au

moins dans les zones de production où il y a une pénurie de combustible de cuisson. Il convient toutefois de surmonter les difficultés liées à l'optimisation de la quantité de briquettes produites et à l'acquisition de l'équipement de briquetage le plus approprié.

D'autre part, les coques de noix de coco offrent un meilleur rendement massique du fait que lesdits déchets sont naturellement secs et contiennent très peu d'humidité. De plus, ces résidus permettent de produire des briquettes avec un bon entreposage, une bonne combustibilité et une chaleur de combustion élevée mieux que les trois autres. La quantité annuelle de coques de noix de coco produite au Cameroun est de 5 ktonnes, cette quantité n'est pas négligeable mais l'installation d'une industrie de briquetage basée uniquement sur l'exploitation des coques de noix de coco pourrait provoquer une pénurie de matières premières. Une solution serait de faire un mélange avec un autre résidu comme les peaux de bananes. Les résultats de l'analyse des briquettes fabriquées à partir de déchets de rotin confirment l'hypothèse selon laquelle ce déchet agricole est un bon candidat pour le briquetage. Ses propriétés physico-chimiques sont intéressantes et le taux de perte de masse est relativement faible. Il reste à voir si cet arbre est disponible en quantité et en qualité au Cameroun et dans d'autres pays.

3.4.5 Résultats de la caractérisation thermique

Les quatre types de briquettes de charbon écologique ont été testés afin de faire une caractérisation thermique à travers un protocole expérimental précis qui a permis de faire une analyse du processus de combustion des briquettes de l'allumage jusqu'à l'extinction et de déterminer les caractéristiques de combustion.

— Description de l'inflammation, la combustion et l'extinction des briquettes

Les images de la figure 3.11(A-E) montrent les étapes d'allumage. C'est le processus de transition rapide pendant lequel une réaction d'oxydation exothermique et une combustion auto-entretenu des briquettes sont initiées. Les étapes de l'inflammation des solides comprennent une augmentation de la température du solide, la décomposition de la phase phase, l'échappement des volatiles de la surface solide, la diffusion des espèces pyrolysées de la surface solide dans la phase gazeuse, et la diffusion de l'oxygène dans la phase gazeuse, la diffusion d'oxygène vers les sites de réaction sur la surface la surface solide, suivie de réactions gazeuses et de réactions hétérogènes à la surface solide [163]. La figure 3.11-A montre les briquettes chargées dans le four avant allumage, la figure 3.11-B montre qu'après avoir enflammé l'allume-feu avec une allumette, il a brûlé avec une flamme jaune pour fournir l'énergie nécessaire à l'allumage des briquettes. Les figures 3.11-C-E montrent l'inflammation progressive ces briquettes jusqu'à l'observation d'une flamme de couleur jaune ; un comportement quasi similaire a été observé pour les quatre types de briquettes.



FIGURE 3.11 – Allumage des briquettes

Le temps d'allumage observé est de 14, 15, 17 et 18 minutes pour les briquettes de CNC, DRT, PBN et BCS respectivement. Nwabe et al. ont produit des briquettes ayant un temps d'inflammation allant de 0.88 à 3 minutes [77], cette inflammation rapide observée dans cette étude est due à la présence des matières plastiques ajoutées lors de la fabrication. L'inflammation des briquettes de DRT et CNC est plus rapide que celle des briquettes de coques d'arachides, balles de riz et coques de noix de palme [164, 165]. Senchi et Kofai [166] ont produit des briquettes mixtes à base de balles de riz et de poussières de charbon dont le temps d'inflammation allait de 36 à 45 minutes, cette durée élevée est due à l'utilisation de la gomme arabique comme liant.

La figure 3.11-E montre les briquettes complètement enflammées, elles sont donc en pleine combustion. Laquelle se définit comme une réaction exothermique auto-entretenu entre un combustible et le comburant [163]. Le comportement de combustion de la biomasse est affecté par la forme géométrique du combustible, la porosité et la tendance du combustible à se fragmenter. La surface externe du combustible détermine le taux de dévolatilisation initial ainsi que la progression ultérieure de la flamme dans la particule et la combustion du charbon formé. Mitchell et al. [167] ont signalé que les combustibles à bois très volatils libèrent une forte concentration de fumée noire hautement carbonée pendant la combustion à la flamme par contre aucune fumée n'a été observée.

Lors de la combustion, les briquettes présentent une incandescence rouge à la surface incurvée. Fernandez-Anez et al. [168] ont étudié la sensibilité à l'allumage des combustibles solides et ont montré qu'un critère fondamental pour confirmer l'inflammation complète des briquettes est l'observation d'une incandescence ou d'une flamme visible. Les briquettes allumées brûlent avec une flamme jaune à cause des terpénoïdes très volatiles de l'amidon de manioc utilisé comme liant lors de leur production [169]. La formation de la flamme jaune peut également être attribuée à la teneur élevée en matières volatiles de la briquette, ce qui indique une inflammation facile de la briquette et une augmentation proportionnelle de la longueur de la flamme [170]. On observe que les briquettes de CNC et DRT brûlent avec une flamme jaune plus intense, ce qui s'explique par un taux élevé de matières volatiles (70,5 et 68,12 respectivement) et une concentration de liant plus élevée. Les pics de températures relevés dans le four lors de la combustion des briquettes de DRT,

CNC, BCS et PBN sont respectivement de 736°C, 734°C, 630 °C et 690 °C. Les températures les plus élevées sont mesurées au cours de la combustion des briquettes de DRT et CNC, certainement à cause de leurs pouvoirs calorifiques élevés et leurs faibles taux d'humidité. Ce qui permet de libérer suffisamment d'énergie à l'origine des températures élevées. Les valeurs de températures prises dans cette étude sont inférieures à celles relevées lors de la combustion des briquettes mixtes [171], Onuegbu et al. ont montré que la température de la flamme produite au cours de la combustion des briquettes mixtes peut aller jusqu'à 850 °C Cette différence est due au système de ventilation mécanique intégré lors de l'expérimentation menée par Onuegbu et al..

Les figures 3.12 (A-D) montrent les images de l'extinction des briquettes. Au fur et à mesure que les briquettes se consomment, il y a eu une formation de cendres créant une couche d'isolation autour des briquettes brûlantes, comme le montrent les figures 3.12 B et C.

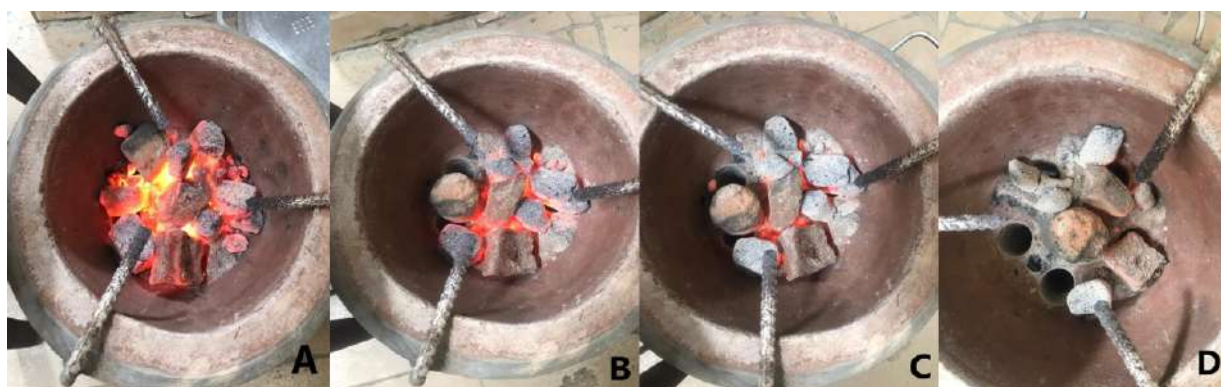


FIGURE 3.12 – Combustion et extinction des briquettes

Par conséquent, il y a eu une réduction de la vitesse de combustion et l'isolation a minimisé le transfert de chaleur vers la casserole, ce qui peut entraîner un long temps d'ébullition. Les cendres influencent le transfert de chaleur et la diffusion de l'oxygène à la surface du combustible pendant la combustion [170]. Une tendance de fragmentation des briquettes a été observée, mais elles sont restées stables jusqu'à la fin du processus de combustion. Un comportement quasi similaire a été observé pour les quatre types de briquettes.

— Caractéristiques de combustion

Le tableau 3.4 présente les résultats du test d'ébullition de l'eau. Il fait ressortir le rendement thermique, les valeurs des consommations spécifiques, la puissance de la flamme ainsi que la vitesse de combustion.

Le rendement thermique de la combustion des DRT, CNC, BCS et PBN est de 33,90 , 32,70 , 31,90 et 32,01% respectivement. G.A. Aholgo a montré que le rendement thermique de la combustion du charbon de bois est de 13,10 % lorsqu'il est brûlé dans un four

TABLE 3.4 – Caractéristiques thermiques des briquettes

| Caractéristiques | DRT | CNC | BCS | PBN |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Rendement thermique (%) | 33,90 | 32,70 | 31,90 | 32,01 |
| Puissance de combustion (W) | 7 180 | 7 079 | 6 760 | 6 100 |
| Consommation spécifique (g/l) | 19,90 | 20,40 | 23,07 | 24,10 |
| Vitesse de combustion (g/min) | 0,17 | 0,18 | 0,19 | 0,21 |
| Temps d'ébullition (min) | 13,10 | 13,40 | 14,50 | 16,30 |

classique et de 28% dans un four amélioré [172]. Les briquettes de DRT, CNC, BCS et PBN brûlent donc plus efficacement que le charbon de bois utilisé dans les mêmes conditions. Un rendement élevé implique de faibles pertes énergétiques, et partant, un ménage utiliserait moins de combustible pour les mêmes besoins énergétiques.

La puissance des flammes produites sont dans la plage de 7 100 à 8 180 W. Ces valeurs corroborent les études antérieures documentées dans la littérature qui ont montré que les valeurs de puissance des flammes produites par les briquettes de charbon écologique produites à partir des résidus agricoles sont généralement comprises entre 70 000 et 10 000 W dans un four amélioré [61].

La consommation spécifique des briquettes varie de 0,17 à 0,21 g/l, elle représente la quantité de briquettes nécessaire pour porter un litre d'eau à ébullition. Tout comme la vitesse de combustion, plus le taux de consommation est petit, plus c'est économique pour l'utilisateur. Les taux de consommation spécifique de DRT et CNC (0,175 et 0,18 g/l respectivement) sont moins élevés que ceux de BCS et PBN (0,19 et 0,21 g/l respectivement), ceci est certainement dû aux pouvoirs calorifiques plus élevés des briquettes de CNC et DRT. On a donc besoin de plus de briquettes de PBN et BCS pour porter un litre d'eau à ébullition que DRT et CNC. De façon générale, les valeurs de consommation spécifiques trouvées dans cette étude corroborent les résultats des études antérieures qui rapportent que la consommation spécifique des briquettes de charbon écologique est dans la plage 0,17 - 0,3 g/l [172-174].

La vitesse de combustion des briquettes étudiées varie de 19,90 à 24,10 g/min. Cette vitesse représente le débit de consommation de briquettes au cours de la combustion. Elle est plus élevée pour les briquettes de BCS et PBN (23,07 et 24,01 g/min respectivement), ce qui est certainement dû à leurs masses volumiques plus petites que celles de DRT et CNC. Les briquettes de BCS et PBN se consomment plus rapidement que celles de DRT et CNC. Ce qui signifie que pour les mêmes besoins énergétiques et dans les mêmes conditions d'utilisation un ménage aurait besoin d'une quantité plus importante de briquettes de BCS et PBN que de DRT et CNC. Dans la littérature des vitesses de combustion plus grandes ont été trouvées. Il a été démontré que la combustion des briquettes de

balles de riz se fait à une vitesse de 24 g/min [166], Ikelle I Ikelle [173] quant à lui a montré que la combustion des briquettes de coques d'arachides se déroule à une vitesse de 27 g/min. Plus la vitesse de combustion est petite, plus le combustible brûle longtemps.

Le temps nécessaire pour porter un litre d'eau à ébullition est de 13,10 , 13,40 , 14,50 et 16,30 minutes à partir des briquettes de DRT, CNC, BCS et PBN respectivement. On fait le constat selon lequel plus la puissance de la flamme, le pouvoir calorifique et la température de la flamme produite sont élevés, moins le temps nécessaire pour l'ébullition est grand. Boris Iq a montré qu'avec des briquettes mixtes de coques d'arachides et balles de riz on peut porter un litre d'eau à ébullition en 12 minutes [165]. Ikelle et al. [173] ont montré que les briquettes mixtes de poussières de charbon et balles de riz peuvent porter 250 ml d'eau à ébullition au bout de 2 à 4 minutes. Senchi et Kofa [166] quant à eux ont prouvé que les briquettes de balles de riz ont un temps d'ébullition de 20 minutes.

3.5 Analyse énergétique de la production des briquettes

L'évaluation de la consommation énergétique d'un processus de production joue un rôle clé dans la compréhension du système de production. L'énergie primaire consommée par étape de production des briquettes, pour chaque déchet utilisé a été estimée.

3.5.1 Bilan de la consommation énergétique

Le bilan de la consommation énergétique est présenté dans le tableau 3.5. L'énergie primaire totale requise pour convertir 1000 kg de déchets de rotin (DRT), de coques de noix de coco (CNC), de bagasse de canne à sucre (BCS) et de peaux de bananes (PBN) en briquettes est de 142,52 kWh, 148,86 kWh, 58,38 kWh et 52,18 kWh, respectivement. Cela est équivalent à 0,78 kWh/kg, 0,75 kWh/kg, 1,46 kWh/kg, et 2,6 kWh/kg de consommation d'énergie primaire utilisée dans la fabrication des briquettes à partir de DRT, CNC, BCS, et PBN, respectivement. Il apparaît clairement que CNC consomme la plus petite quantité d'énergie primaire par kg parmi les quatre déchets étudiés, alors que le PBN en consomme le plus. Ceci est probablement dû aux caractéristiques initiales des déchets. En effet, les CNC et le DRT sont des combustibles intéressants avec de grandes valeurs de pouvoir calorifique et une faible teneur en humidité; leur transformation en briquettes améliore juste le pouvoir calorifique et ne nécessite pas une grande quantité d'énergie, contrairement à BCS et PBN, qui nécessitent beaucoup plus d'énergie pendant la fabrication des briquettes.

TABLE 3.5 – Bilan de la consommation énergétique

| | Déchets de rotin | coques de noix | Bagasse | Peaux de banane |
|---|------------------|----------------|---------|-----------------|
| Quantité initiale de déchets (kg) | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| Quantité de briquettes produites (kg) | 183,25 | 198,5 | 40 | 20,4 |
| Énergie primaire totale consommée (kWh) | 142,52 | 148,86 | 58,38 | 52,18 |
| Énergie totale produite(kWh) | 1528,31 | 1770,62 | 287,2 | 93,2 |
| Énergie primaire spécifique consommée (kWh/kg) | 0,78 | 0,75 | 1,46 | 2,60 |
| Énergie primaire spécifique consommée (kWh/kWh) | 0,09 | 0,08 | 0,20 | 0,56 |
| Quantité spécifique de gasoil consommée (l/kg) | 0,05 | 0,04 | 0,068 | 0,14 |
| Énergie électrique consommée (kWh/kg) | 0,16 | 0,16 | 0,43 | 0,68 |
| Durée du cycle de production (h) | 17,75 | 17,75 | 12,75 | 12 |
| Capacité de production (kg/h) | 10,32 | 11,18 | 3,13 | 1,66 |

Ces résultats permettent de faire le constat selon lequel plus la quantité d'énergie consommée est élevée, plus la quantité de briquettes produites est grande, et plus le PCI des briquettes est important. Les rapports de la quantité d'énergie primaire consommée par l'énergie produite varient dans l'intervalle 0,08-0,20 kWh/kWh. Bien que le ratio énergétique du PBN soit important par rapport aux autres, toutes ces valeurs sont inférieures à 1 kWh/kWh.

Cela signifie que la quantité d'énergie primaire utilisée est inférieure à l'énergie produite. Il est donc énergétiquement intéressant de produire des briquettes avec DRT, CNC, BGC et PBN par le processus suivi par l'entreprise témoin.

Un cycle de production de briquettes dure 17,75h, 17,75h, 12,75h, et 12h à partir de 1000 kg de DRT, CNC, BGC et PBN respectivement ; à partir de ces données, des projections de production annuelle de briquettes de 29 526,47 kg ; 31 983,66 kg ; 8972,54 kg et 4 766,6 kg sont calculées. Sur la base des résultats, il peut être conseillé à l'industrie de se concentrer sur la production de briquettes à partir de CNC en raison de sa capacité de production plus élevée que celles des trois autres résidus. En outre, les briquettes de CNC ont le PCI le plus élevé et nécessitent moins d'énergie pour leur fabrication. La capacité de production de briquettes à partir de n'importe quel résidu est comprise entre 1,67 et 10,32 kg/h, ce qui est relativement faible par rapport aux capacités de production rapportées dans la littérature pour d'autres résidus. Selon Hamid et al., la capacité de production de briquettes à partir de coques d'hévéa et de coques de noix de palme est de 200 kg/h [127] et Srivastava et al. a rapporté une capacité de production de 500 kg de briquettes par heure en utilisant les déchets du marché des légumes [116]. Cependant, dans ces travaux, l'étude ne porte pas sur toutes les étapes de production, mais seulement sur la phase de compactage et les études étaient appliquées sur de grandes installations industrielles.

3.5.2 Énergie primaire consommée par étape

La figure 3.13 montre la répartition de la consommation d'énergie primaire à chaque étape de la production. D'un point de vue global, on peut remarquer que la collecte des déchets est l'étape où la plus grande partie de l'énergie est utilisée. L'énergie consommée pendant la collecte représente environ 40% de l'énergie primaire totale consommée pour la fabrication des briquettes. La consommation d'énergie est plus élevée pour DRT et CNC et plus faible pour BCS et PBN pendant cette phase de production. Ceci est dû à la disponibilité évidente de PBN et de BCS sur les marchés, dans les foyers et dans d'autres zones de la ville. La collecte de DRT et de CNC nécessite des déplacements sur de longues distances, ce qui implique une consommation de gasoil plus élevée.

Le séchage des DRT et du CNC ne nécessite que 0,8 kWh, tandis que celui de la BCS et du PBN nécessite 8,3 kWh en raison de leur teneur en humidité initiale plus élevée. La carbonisation du BCS et du PBN nécessite respectivement 9,6 kWh et 7,6 kWh. Le DRT

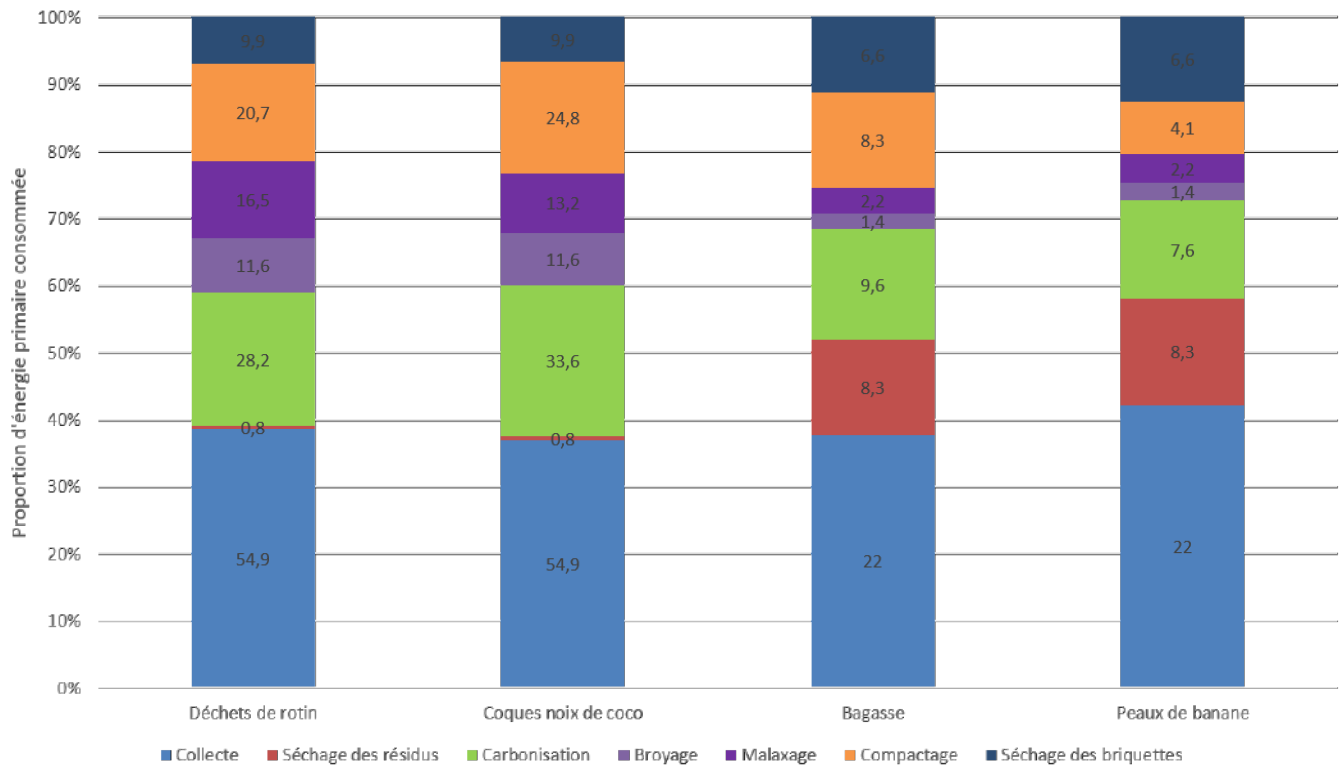


FIGURE 3.13 – Répartition de la consommation énergétique par étape de production

et le CNC nécessitent respectivement 28,2 et 33,6 kWh en raison de leur structure résistante qui nécessite plus d'énergie pour être carbonisée. Pour la même raison, les résidus carbonisés DRT et CNC nécessitent plus d'énergie pour le broyage (11,6 kWh) que PBN et BCS (1,4 kWh).

L'énergie nécessaire pour le séchage des briquettes issues de CNC et DRT est plus élevée que pour BNP et SGC en raison du nombre de résidus restant à ce stade du processus de fabrication ; en effet, à la fin du processus de briquetage, 183,25 kg de briquettes issues de RWT et 198,5 kg de briquettes issues de CCS sont séchées, contre 40 kg de briquettes issues de BCS et 20 kg de briquettes issues de PNB. L'énergie utilisée pour le compactage est de l'ordre de [4,1-24,8] kWh par 1000 kg de résidus initialement pesés. À la lumière de ces chiffres, il est clair que si l'on veut réduire la consommation d'énergie pour la fabrication des briquettes, il faut agir sur la collecte des déchets et leur séchage éventuel. Il peut être conseillé d'implanter les usines de production de briquettes à proximité des sources de production de déchets afin de réduire la distance parcourue par les véhicules de collecte motorisés.

Le séchage électrique peut être remplacé par le séchage solaire, qui est gratuit et propre. Cependant, des stratégies devront être développées pour optimiser le séchage solaire car il pourrait augmenter le temps de production, le séchage solaire étant plus lent et intermittent.

3.5.3 Énergie primaire consommée par résidu

La figure 3.14 montre la répartition de l'énergie primaire par source primaire. On remarque clairement sur cet histogramme que l'énergie primaire utilisée est majoritairement issue du gasoil. La consommation d'énergie primaire est de 104,1 kWh, 107,2 kWh, 36 kWh et 34,6 kWh pour DRT, CNC, BCS et PBN respectivement. Cette consommation de gasoil est due à l'utilisation de véhicules motorisés pour la collecte des résidus. Il est déjà établi que l'utilisation excessive de gasoil a des effets négatifs sur l'environnement en raison de l'émission de polluants pendant la combustion.

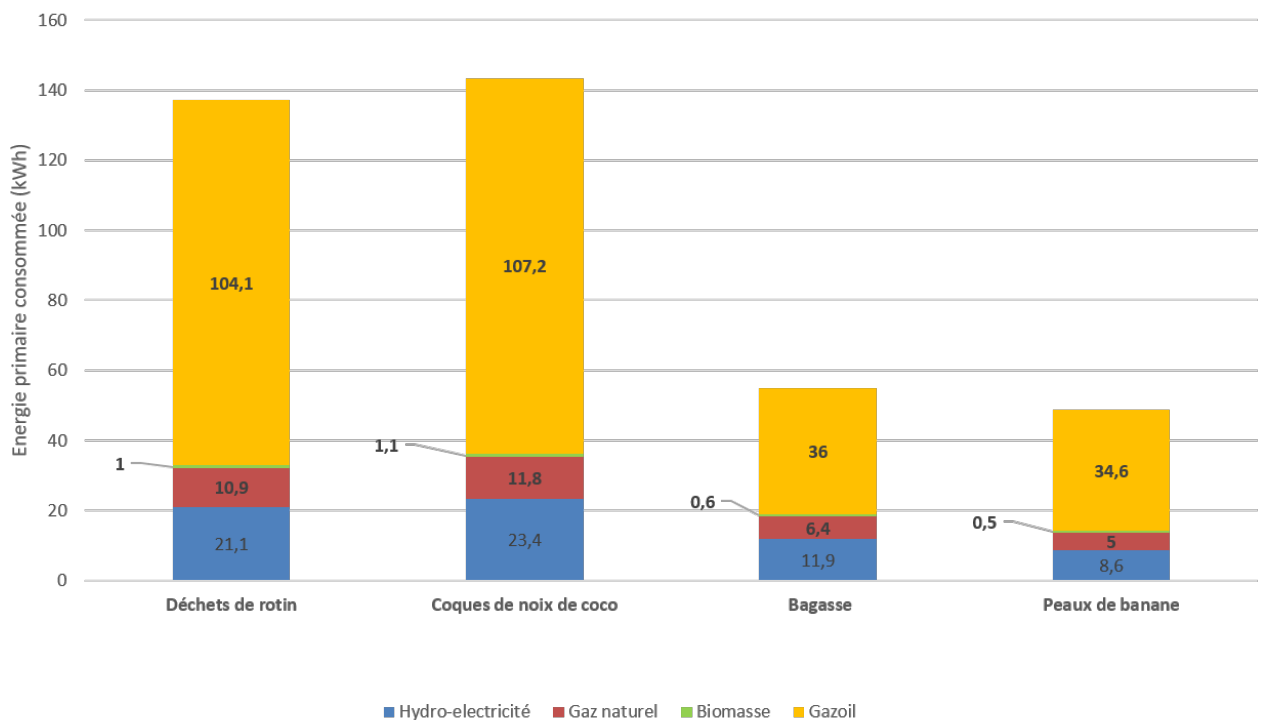


FIGURE 3.14 – Énergie consommée par source primaire

L'installation d'une usine de conversion de la biomasse à proximité des sources de production de déchets et l'adoption de moteurs électriques pour le mélange réduiraient la consommation en gasoil. La deuxième part de l'énergie primaire est fournie par l'hydroélectricité, avec 21,1 kWh, 23,4 kWh, 11,9 kWh, 8,6 kWh pour DRT, CNC, BCS et PBN respectivement. À cause du fait que l'hydroélectricité est l'énergie renouvelable la plus développée au Cameroun, produisant 73 % de l'électricité consommée dans le pays [2]. L'utilisation de la biomasse pour la production d'électricité n'est pas suffisamment développée au Cameroun, ce qui explique le fait que l'énergie primaire issue de la biomasse n'est que de 1kWh, 1,1kWh, 0,6kWh, et 0,5 kWh pour respectivement DRT, CNC, BCS et PBN.

3.6 Analyse économique de la production des briquettes

3.6.1 Coûts de production des briquettes

Le tableau 3.6 présente les coûts associés à la fabrication des briquettes. Il s'agit des coûts d'achat des intrants nécessaires à chaque étape du processus pour un cycle de production. Les étapes les plus coûteuses de la production sont incluses dans ce tableau. La phase de collecte des matières premières de la fabrication des briquettes de DRT est la plus coûteuse (28,2 XAF/kg).

TABLE 3.6 – Coûts de production unitaires (XAF/kg)

| Etapes | DRT | CNC | BCS | PBN |
|---------------|-------|-------|--------|--------|
| Collecte | 28,2 | 26,24 | 52,48 | 104,96 |
| Séchage | 1,312 | 1,312 | 129,88 | 259,12 |
| Carbonisation | 13,77 | 13,77 | 24,27 | 31,48 |
| Broyage | 13,77 | 13,12 | 7,872 | 16,4 |
| Malaxage | 27,55 | 22,96 | 18,37 | 27,55 |
| Compactage | 18,37 | 30,17 | 31,48 | 31,48 |
| Séchage | 34,11 | 31,48 | 103,64 | 207,30 |
| Emballage | 7,87 | 7,21 | 11,8 | 23,61 |

Ce coût élevé est imputable aux frais de gasoil pour le véhicule motorisé qui a été utilisé pour collecter les matières premières. L'étape la moins coûteuse du processus est l'emballage. En revanche, le briquetage est la partie la plus coûteuse du processus de fabrication des briquettes de la CNC. Ces coûts sont liés à l'énergie électrique utilisée par le moteur électrique de la machine à briquettes.

En examinant à la fois le DRT et le CNC, on constate aisément que la phase de séchage est la moins coûteuse en raison du taux d'humidité initialement faible de ces déchets. Contrairement à BCS et PBN, où les coûts liés au séchage sont les plus élevés, soit respectivement 129,88 XAF/kg et 259,12 XAF/kg. La phase de broyage est la moins chère pour la fabrication de briquettes à partir de PBN et de BCS, sans doute en raison de la structure moins solide des résidus de PBN et de BCS, qui ne nécessitent pas une grande dépense liée au paiement de la facture d'électricité.

La figure 3.15 montre la répartition des différents coûts liés à chaque système de production sur 20 ans. Il apparaît que le remboursement des dépenses d'investissement (emprunt bancaire) représente 15-20%, les coûts de maintenance 8-10 %, les taxes et le paiement du loyer 15-20 %, et les coûts de fabrication représentent entre 50 et 62 % des dépenses totales. Les coûts de fabrication sont principalement composés des salaires des employés, qui représentent la charge financière la plus importante (environ 30% des dépenses to-

tales), suivis des dépenses dues à la fourniture de gazoil (10-16% des dépenses totales). Les dépenses liées à l'achat d'emballages sont les plus faibles.

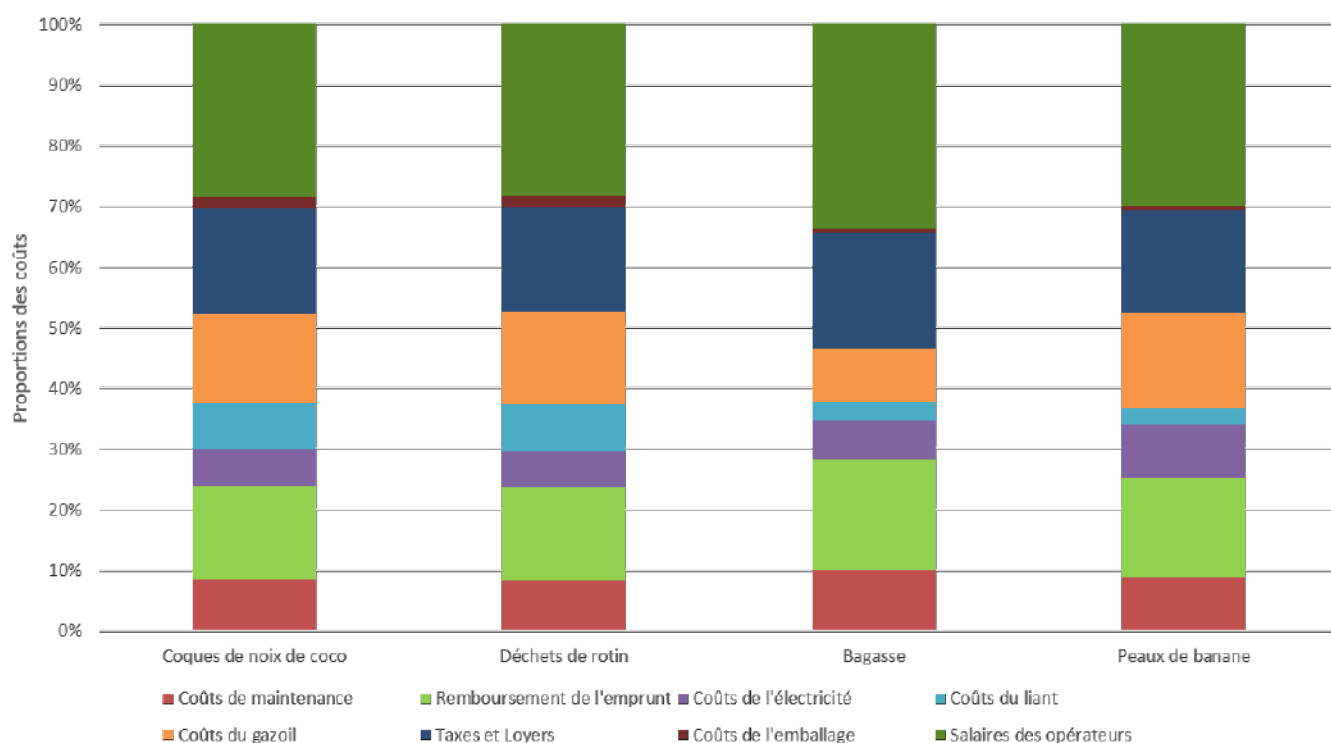


FIGURE 3.15 – Répartition des coûts liés à chaque système de production

La figure 3.16 montre l'évolution des coûts de production unitaire des briquettes, ainsi que leur prix de marché. L'évolution des coûts de production du CNC et du DRT est presque identique. Pour les quatre types de briquettes, les coûts de production augmentent légèrement au cours des cinq premières années, puis baissent considérablement la sixième année. Cette baisse des coûts est probablement due au remboursement du prêt bancaire, qui prend fin la cinquième année. Pendant les 20 années représentant la période d'étude, les coûts de production unitaires des briquettes de CNC et de DRT restent inférieurs au prix du marché, tandis que les coûts de production unitaires des briquettes de PBN et de BCS restent supérieurs au prix du marché. Par conséquent, la vente des briquettes de la PBN et de la BCS ne générera pas de bénéfice pour l'unité de production.

3.6.2 Les paramètres économiques

Le tableau 3.7 présente les indicateurs économiques qui donnent une indication claire de la viabilité économique de l'unité de production. La VAN de CNC et DRT est respectivement de 43 641 056 XAF et 44 075 984 XAF ; celles de BCS et PBN sont respectivement de -22 551 951 XAF et -29 475 396 XAF. Au vu de ces chiffres, la production de briquettes CNC et DRT est rentable pour l'entreprise, ce qui n'est pas le cas pour BCS et PBN. D'autres études recensées dans la littérature mentionnent des VAN positives pour les projets de briquetage à partir d'autres matières premières. Les indices de rentabilité de la

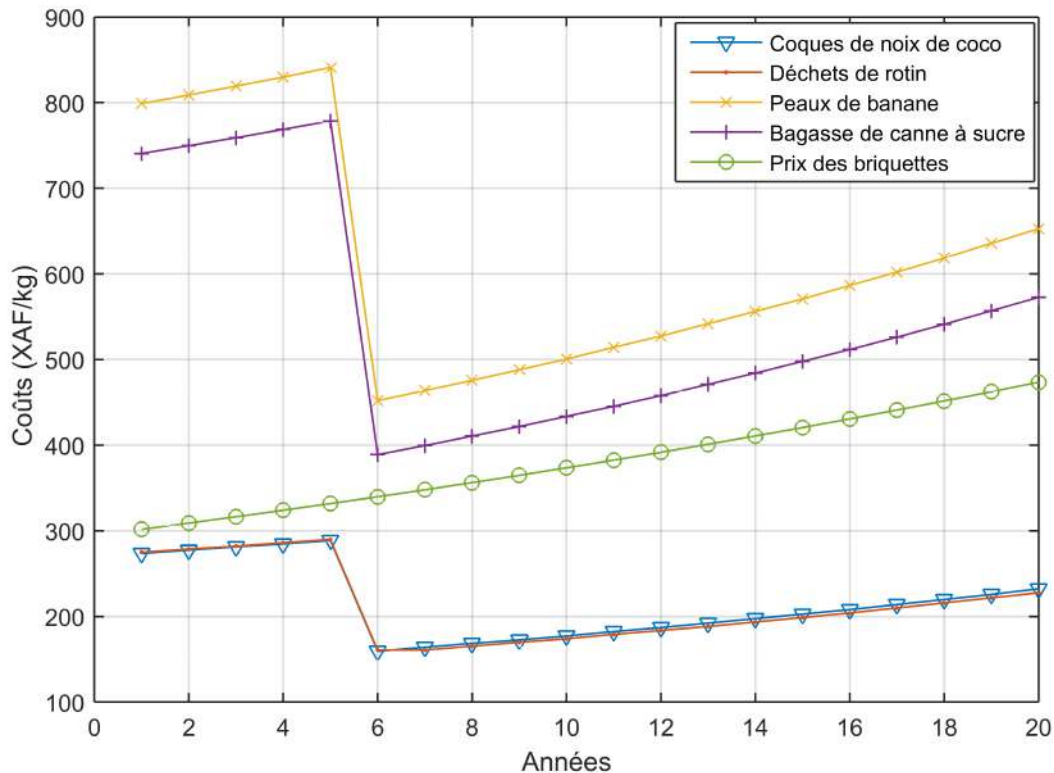


FIGURE 3.16 – Évolution des coûts de production sur 20 ans

production de briquettes de CNC et DRT ont des valeurs supérieures à 1, tandis que les valeurs de l'IP de PBN et BCS sont inférieures à 1. Ces valeurs de l'IP confirment les conclusions tirées des résultats du coûts de production et de la VAN, à savoir que la production de briquettes à partir de CNC et DRT est économiquement viable, contrairement à PBN et BCS.

TABLE 3.7 – Paramètres économiques

| Paramètres économiques | Déchets de rotin | Coques de noix | Bagasse | Peaux |
|-------------------------|------------------|----------------|-------------|-------------|
| V A N (XAF) | 44 075 984 | 43 641 056 | -22 511 951 | -29 475 396 |
| Indice de Profitabilité | 1 758 | 1 744,96 | -898,72 | -1 174,24 |

La viabilité économique d'autres déchets a été démontrée dans la littérature, Sengar et al. [123] ont calculé que la VAN des briquettes de coquille de noix de cajou, d'herbe et de balle de riz était de 25 831,88 dollars ; 30 117,20 dollars et 8 434,78 dollars, respectivement. Des calculs de Hakizimana et Kim [124] ont donné une valeur actuelle nette de 17,2 millions de dollars et a validé la commercialisation des briquettes de tourbe.

3.6.3 Analyse de sensibilité économique

La viabilité économique de la production des briquettes est sensible aux variations du taux d'actualisation, du montant de l'investissement initial et du prix de vente des briquettes sur le marché. Comme le montrent les figures 3.17, 3.18 et 3.19, chaque facteur varie de 0 à deux fois sa valeur initiale tandis que les autres variables restent fixes. Le taux d'actualisation est un chiffre sujet à l'incertitude ; par conséquent, il peut avoir un impact substantiel sur la faisabilité économique d'une évaluation économique. Une analyse de sensibilité a donc été menée pour voir si la variation du taux d'actualisation peut transformer des systèmes de briquetage économiquement non rentables en un investissement monétaire réalisable, et vice versa.

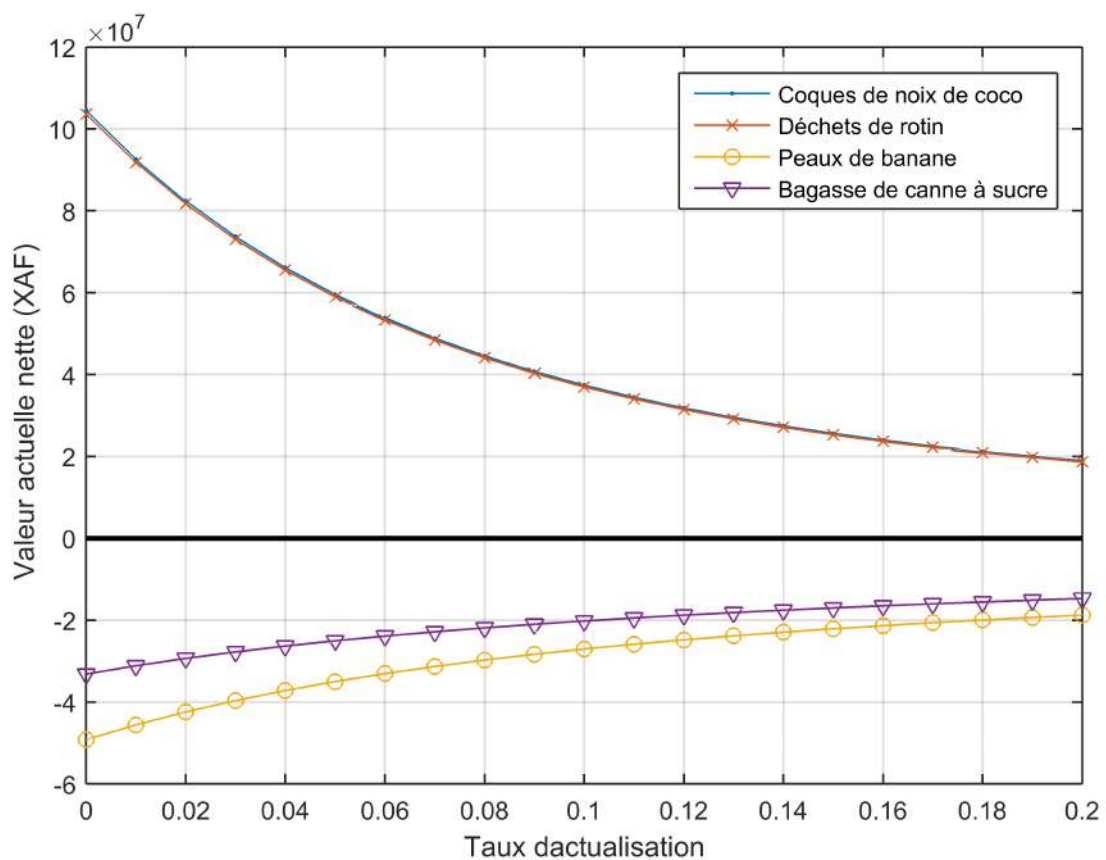


FIGURE 3.17 – Sensibilité de la VAN par rapport au taux d'actualisation

Il ressort de la figure 3.17 que les quatre systèmes de production sont sensibles à la variation du taux d'actualisation, mais cette sensibilité est observée de manière plus significative dans la production de briquettes de CNC et DRT. On peut voir sur cette figure que la VAN des systèmes de production CNC et DRT diminue avec l'augmentation du taux d'actualisation mais reste positive. Par conséquent, quelle que soit la valeur du taux d'actualisation, il n'est pas économiquement viable pour l'entreprise de produire les briquettes produites par PBN et BCS, car non seulement l'investissement initial ne sera jamais amorti, mais les coûts d'exploitation sont supérieurs aux bénéfices. La viabilité

économique de la production de briquettes de BCS et de DRT serait plus importante si le taux d'actualisation diminuait, mais moins importante si le taux d'actualisation augmentait.

La figure 3.18 illustre la sensibilité de la VAN au coût du capital initial. Dans la plage de valeurs du coût du capital choisie, toutes les VAN, à l'exception de celles de CNC et DRT, restent positives, tandis que celles de PNB et BCS sont négatives. Les courbes ont une tendance décroissante, et la viabilité économique des quatre systèmes devient moins attrayante à mesure que le coût du capital augmente. Cela s'explique certainement par l'augmentation du montant des prêts à rembourser à la banque. Un scénario similaire a été observé par Hu et al. 2014 pour le briquetage à partir de tiges de maïs, où l'analyse de sensibilité a montré que la VAN diminuerait considérablement si le coût du capital initial augmentait [126].

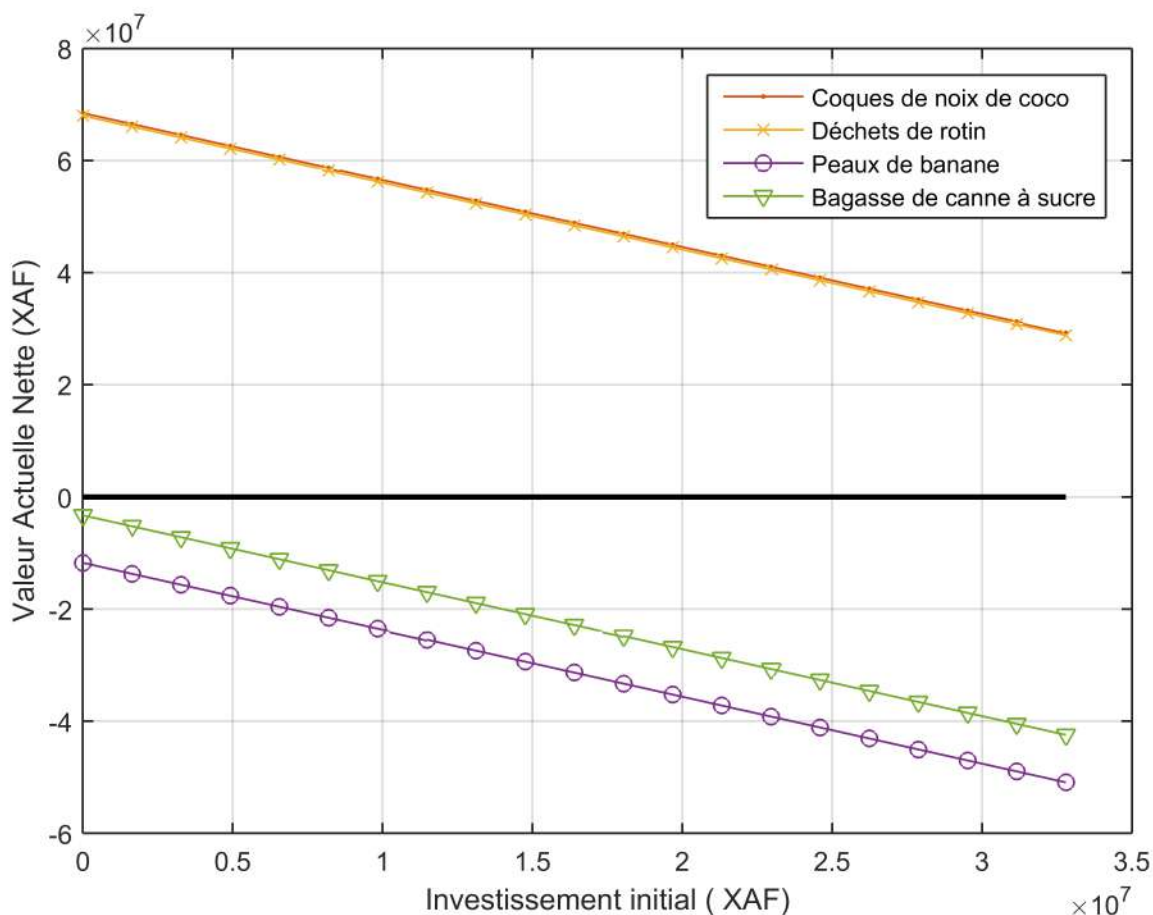


FIGURE 3.18 – Sensibilité de la VAN fonction du coût du capital initial

On peut observer la croissance des courbes dans la figure 3.19. Cela reflète le fait que les quatre systèmes sont économiquement intéressants avec un prix du marché des briquettes en hausse. Les systèmes CNC et DRT sont plus sensibles aux variations du prix du marché des briquettes. La viabilité économique est effective à partir d'un prix de la briquette de 180 XAF/kg pour les systèmes CNC et DRT ; un doublement de la valeur

actuelle du marché se traduirait par une VAN d'environ 17 000 000 XAF. Alors que, la production de briquettes de BCS et PBN n'est économiquement viable qu'à des prix de vente minimums supérieurs au prix de marché actuel, soit 480 XAF/kg et 520 XAF/kg. Les conclusions tirées de ce graphique sont en accord avec celles de [126, 125], qui ont montré que la VAN est très sensible à la variation du prix des briquettes sur le marché.

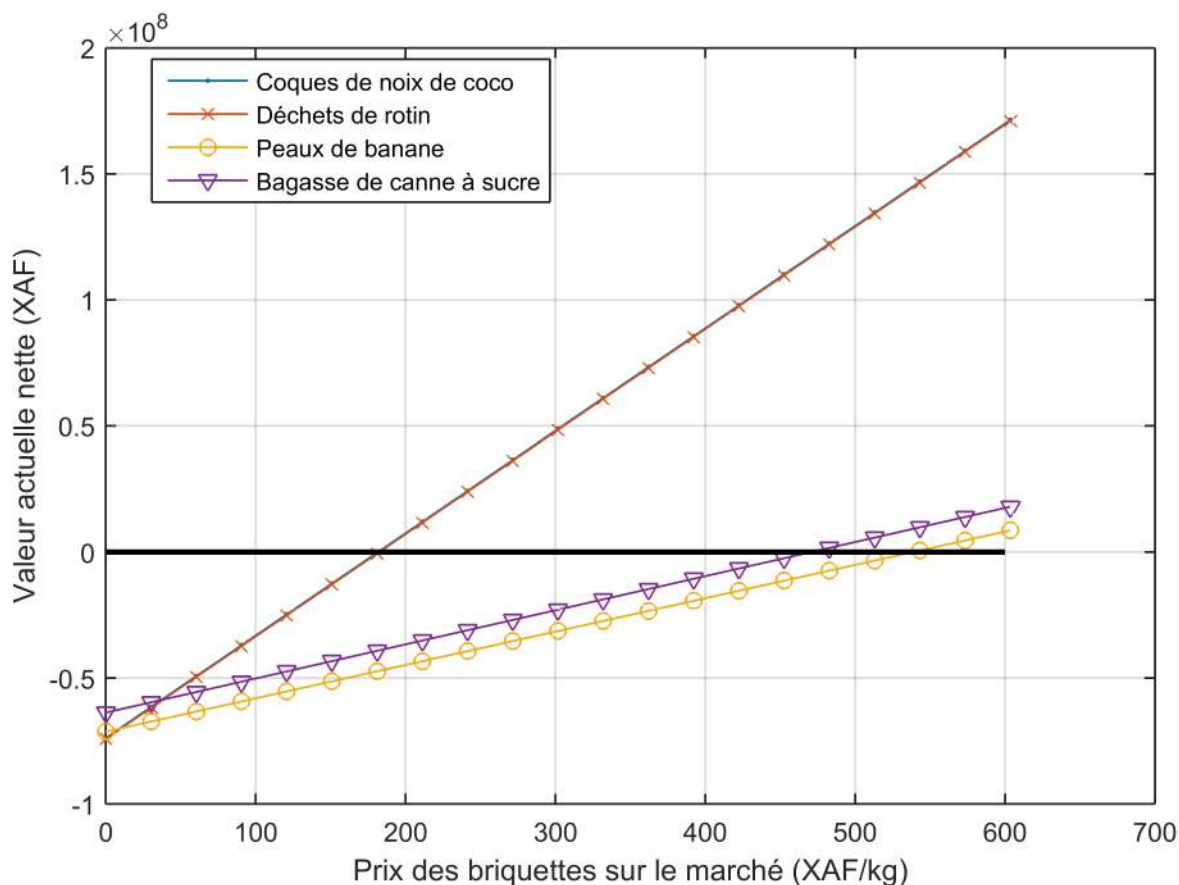


FIGURE 3.19 – Sensibilité de la VAN en fonction du prix local des briquettes

Les usines de production de briquettes doivent être efficaces sur le plan énergétique et viables sur le plan économique, en particulier dans un pays agricole en développement pauvre en énergie comme le Cameroun. Le bois de chauffage représente 72,61% de la consommation totale d'énergie au Cameroun. Les briquettes de biomasse sont un choix important pour le remplacer, elles peuvent être utilisées pour la cuisson, le chauffage, le séchage et autres [175]. La production et l'utilisation de briquettes est un moyen de transition énergétique et un moyen d'aller vers le développement durable. Elle mérite donc une attention particulière de la part des gouvernements, des investisseurs et des décideurs.

Les résultats de l'analyse énergétique montrent que la production de briquettes à partir de CNC et DRT consomme moins d'énergie que PBN et BCS. Mais pour la même quantité initiale de déchets, DRT et CNC consomment plus de combustible fossile, ce

qui a des effets négatifs sur l'environnement. Il serait écologique pour l'unité de production d'adopter l'utilisation de ressources énergétiques renouvelables dans le processus de conversion. Par exemple, l'utilisation de la chaleur solaire, qui est verte et gratuite, peut être utilisée pendant la phase de séchage, ce qui réduira également les coûts de production. Suopajervi et Fabritius ont établi que le coût de production du charbon de bois est d'environ 0,28 Euro/kg [176], soit 183,68 XAF/kg. Les coûts de production des briquettes sont légèrement plus élevés que ceux du charbon de bois, il est donc nécessaire d'explorer les moyens de les réduire.

Avec un capital limité, les petites unités de production ne peuvent que se procurer des équipements peu performants, généralement fabriqués avec des matériaux locaux. Le soutien du gouvernement et des investisseurs permettrait l'achat d'équipements de pointe à faible consommation d'énergie afin de respecter strictement toutes les conditions de production de briquettes telles que spécifiées par [36]. Les investissements permettraient également la mise en place d'usines à grande échelle pour la production industrielle. D'autre part, un équipement sophistiqué signifierait moins de coûts d'entretien et de réparation. Par ailleurs, le prix du marché des briquettes est le même quel que soit le déchet utilisé, cela a un impact sur la rentabilité économique de l'entreprise car le coût minimum sans profit des briquettes PBN et BCS est supérieur au prix actuel du marché et le coût minimum sans profit des briquettes CNC et DRT est inférieur au prix du marché. Il conviendrait d'étudier la possibilité de préparer des briquettes à partir d'un mélange de déchets à un coût inférieur qui pourraient être vendues au prix actuel du marché sans pertes financières pour l'entreprise.

3.7 Résultats de l'analyse économique de l'utilisation des briquettes

L'évaluation de la viabilité économique de l'utilisation des briquettes comme combustibles de cuisson dans les ménages est une étape préalable à son adoption. Une estimation des coûts de cycle de vie de l'utilisation des combustibles de cuisson et une analyse de sensibilité économique ont été faites dans un ménage camerounais de 5 personnes avec des besoins énergétiques annuels moyens de 950 kWh.

3.7.1 Coûts de Cycle de Vie liés à l'utilisation des briquettes

La figure 3.20 présente les coûts du cycle de vie pour les combustibles étudiés. On peut observer que le bois de chauffage présente le Coût de Cycle de Vie (CCV) le plus élevé parmi les combustibles conventionnels, suivi du GPL (371 296 XAF). Parmi les briquettes de biomasse étudiées, les peaux de banane ont le CCV le plus élevé (478 617 XAF), suivies

de la bagasse de canne à sucre (315 011 XAF). Cela signifie que les ménages utilisant du bois de chauffage dépensent plus d'argent par rapport aux autres combustibles étudiés et feraient beaucoup de bénéfices en adoptant des briquettes fabriquées à partir de coques de noix de coco.

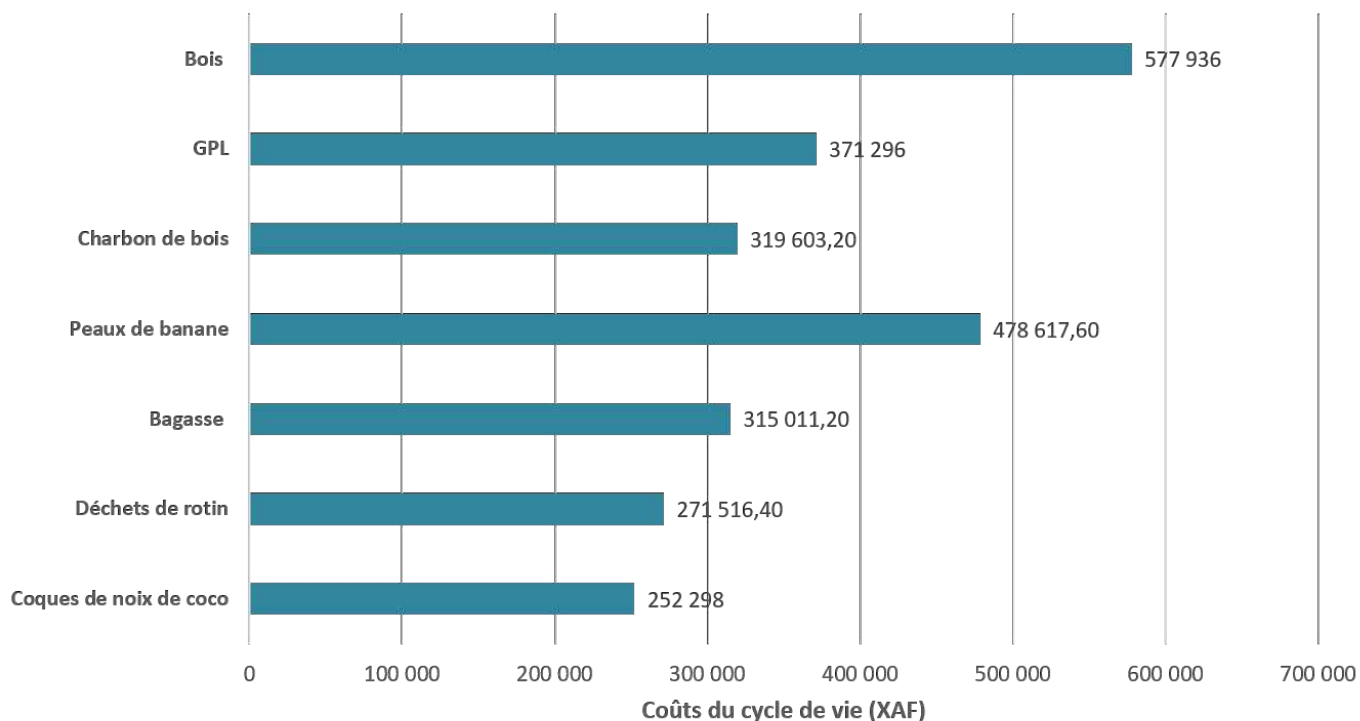


FIGURE 3.20 – Coûts du cycle de vie

Le tableau 3.8 résume les Valeurs Actuelles du Bénéfice Net (VABN) en XAF des briquettes issues des quatre types de résidus pour le remplacement de trois systèmes de cuisson conventionnels. Il est clair que l'utilisation de briquettes est économiquement rentable par rapport aux trois combustibles conventionnels, à l'exception des briquettes de PBN. En effet, les briquettes de peaux de banane ne sont pas plus économiquement rentables que le charbon de bois et au GPL. Il apparaît qu'il y a deux VABN négatives, -159 014,4 XAF et -130 281,6 XAF, ce sont les VABN pour le remplacement du charbon de bois et du GPL par des briquettes faites à partir de peaux de banane respectivement. Un ménage qui utilise exclusivement le charbon de bois ou le GPL pour la cuisson perdrait 159 014,4 XAF ou 130 281 XAF respectivement au bout de 10 ans en adoptant les briquettes BNP. Ce qui signifie qu'il n'est pas économiquement viable pour un ménage utilisant du charbon de bois ou du GPL de le remplacer par des briquettes de peau de banane. Bien que les briquettes de peaux de banane soient économiquement viables en tant que substitut du bois de chauffage, elles ont un PVNB moins élevé que les trois autres combustibles de biomasse. Ce qui est dû à son coût élevé (64,28 XAF/kWh) par rapport aux autres briquettes de biomasse.

De même, le remplacement du bois de chauffage offre la VABN la plus élevée, ce qui

TABLE 3.8 – Valeurs Actuelles de Bénéfices Nettes (XAF)

| | Charbon de bois | GPL | Bois de chauffage |
|--------------------------|-----------------|------------|-------------------|
| Peaux de bananes | -159 014,4 | -130 281,6 | 99 318,4 |
| Bagasse de canne à sucre | 4 592 | 33 324,8 | 262 924 |
| Déchets de rotin | 48 084,8 | 76 817,6 | 306 417,6 |
| Coques de noix de coco | 67 305,6 | 96 038,4 | 325 638,4 |

s'explique par son coût élevé (78,72 XAF/kWh). La rentabilité économique du remplacement du bois de chauffage s'ajoute aux inconvénients énergétiques, environnementaux et sanitaires de son utilisation. L'intégration de briquettes fabriquées à partir de coques de noix de coco offre la VABN la plus élevée surtout pour le bois de chauffage. Ceci est dû à son faible prix (34,46 XAF/kWh). Parmi les trois combustibles conventionnels, le GPL est le moins cher du marché, mais il présente moins d'avantages économiques que le charbon de bois en raison des coûts d'achat et d'entretien du four à GPL.

3.7.2 Analyse de sensibilité économique

Pour chaque type de briquette examiné, une analyse de sensibilité est présentée pour montrer l'effet du taux d'actualisation, du coût du combustible conventionnel et du coût du capital sur la valeur actuelle du bénéfice net pour les briquettes de biomasse. Les figures [3.21](#), [3.22](#), [3.23](#), [3.24](#) montrent la VABN pour des taux d'actualisation allant de 0% à 20%. Cet intervalle est suffisamment large pour inclure le taux d'actualisation le plus couramment utilisé. Les figures montrent que les briquettes fabriquées à l'aide de la CSC sont les plus rentables des quatre étudiées ; les valeurs de la VABN sont d'environ 190 000 XAF, 80 000 XAF et 40 000 XAF pour le bois de chauffage, le GPL et le charbon de bois respectivement, lorsque le taux d'actualisation est supposé être au maximum de 20%. Les figures [3.21](#), [3.22](#), [3.23](#), [3.24](#) présentent des courbes qui permettent d'apprécier l'impact de la variation du taux d'actualisation du marché sur la rentabilité économique de la substitution des combustibles de cuisson classiques (GPL, bois de chauffe et charbon de bois) aux briquettes de charbon écologique.

À la lecture de ces figures, il est clair que les briquettes de la biomasse étudiée, à l'exception de celle de PBN, entraîneraient des économies améliorées pour tout l'intervalle de valeurs du taux d'actualisation. L'utilisation des briquettes de PBN n'est économiquement bénéfique que pour la substitution du bois de chauffage. Ceci est certainement dû au fait que parmi les briquettes sélectionnées, celles fabriquées à partir de PBN ont le coût le plus élevé (64,28 XAF/kWh) ; et le bois de chauffage est plus cher que le PBN. De plus, d'après la figure [3.24](#), il apparaît que l'avantage économique du BCS par rapport au charbon de bois est marginal. Ceci est principalement dû au fait que non seulement le coût des briquettes fabriquées à partir de SGC et de charbon de bois est très proche (41,98 XAF/kWh et 42,64 XAF/kWh respectivement) mais aussi que l'utilisation des

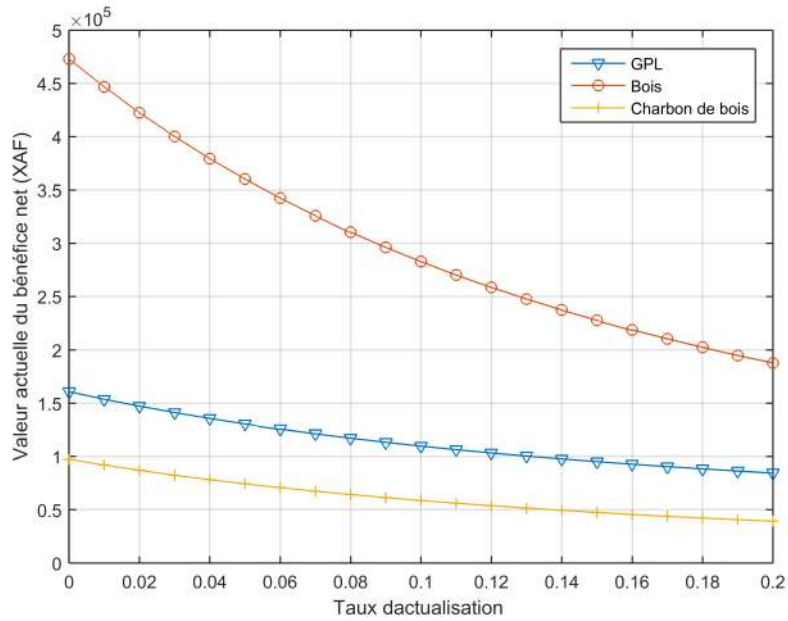


FIGURE 3.21 – Valeur actuelle du bénéfice nette pour la briquette de CNC

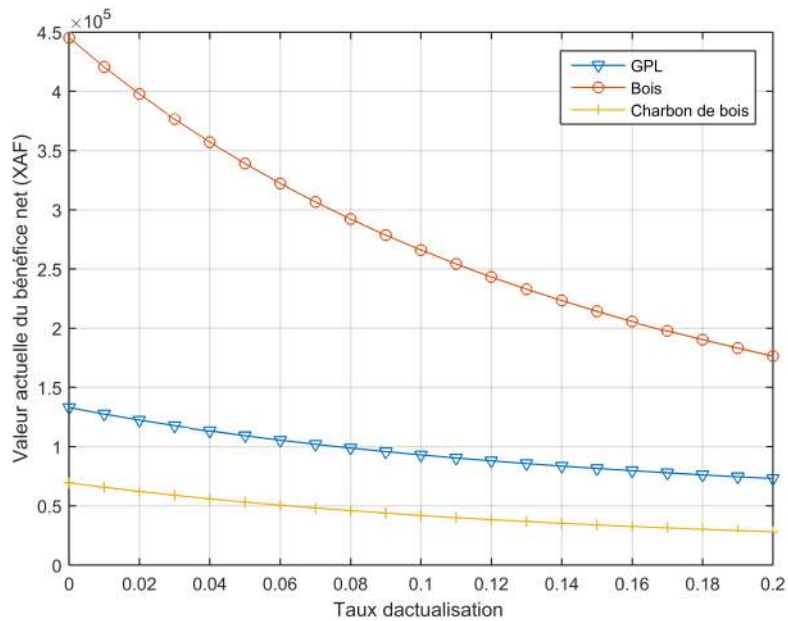


FIGURE 3.22 – Sensibilité de la VABN des briquettes DRT par rapport au taux d'actualisation

deux combustibles nécessite des fours de même coût.

Les figures [3.25](#), [3.26](#), [3.27](#), [3.28](#) montrent la viabilité économique des briquettes de biomasse à différents coûts d'investissement initiaux, jusqu'à deux fois leur coût actuel. Comme on peut le voir sur ces diagrammes, la modification des valeurs du coût d'investissement n'affecte pas de manière significative l'économie des briquettes de biomasse. La raison en est que les fours utilisés pour brûler les briquettes sont bon marché, ne né-

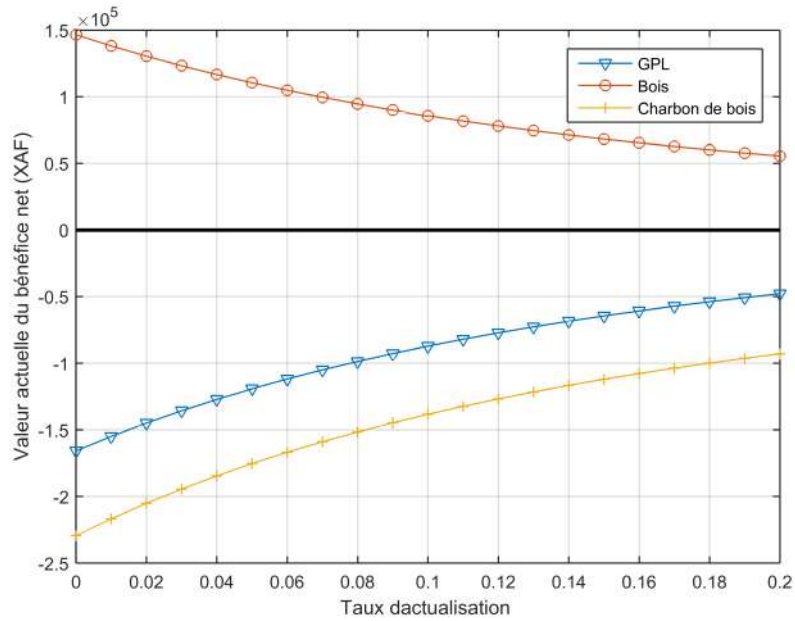


FIGURE 3.23 – Sensibilité de la VABN des briquettes PBN par rapport au taux d'actualisation

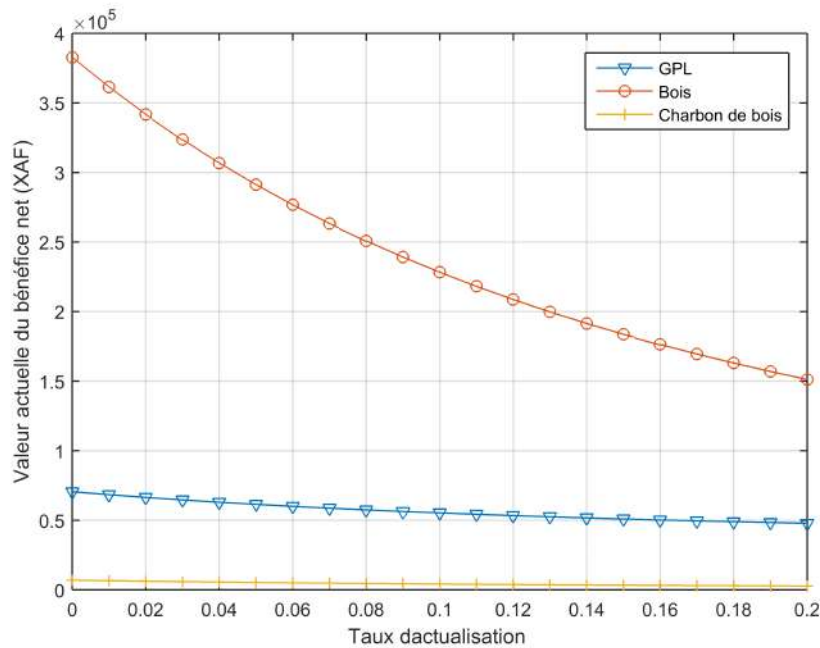


FIGURE 3.24 – Sensibilité de la VABN des briquettes BCS par rapport au taux d'actualisation

cessitent pas d'entretien particulier et ne représentent donc qu'une très petite partie des dépenses associées au coût annuel d'achat des briquettes.

Enfin, il est nécessaire d'étudier la viabilité économique des briquettes de biomasse à différents prix des combustibles conventionnels. Les figures [3.29](#), [3.30](#), [3.31](#) montrent que la viabilité économique des briquettes de charbon écologique est sensible aux change-

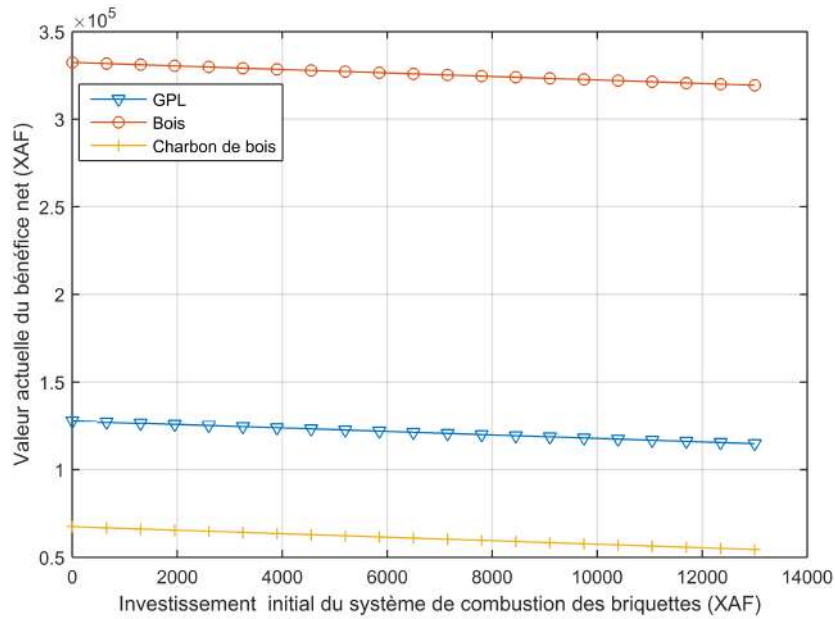


FIGURE 3.25 – Sensibilité de la VABN des briquettes CNC par rapport au prix du système de briquettes

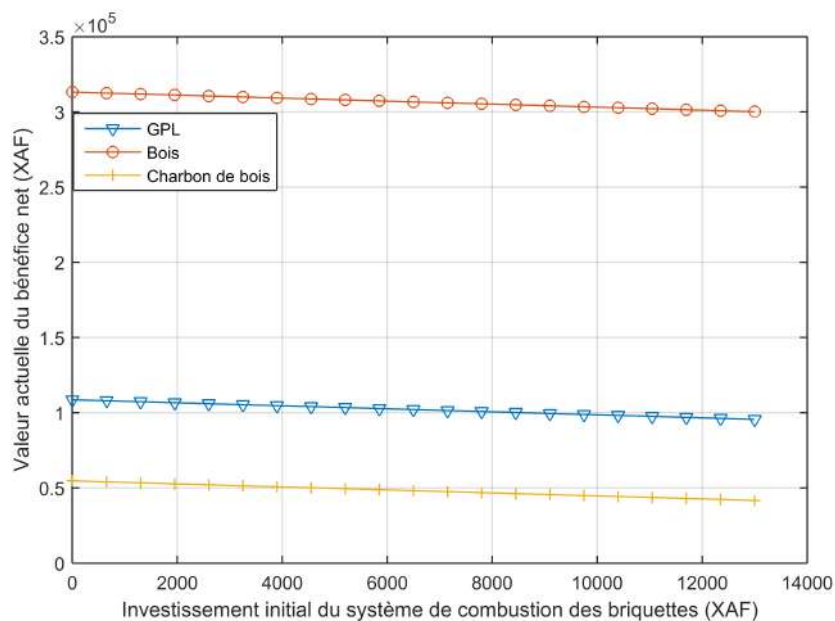


FIGURE 3.26 – Sensibilité de la VABN des briquettes DRT par rapport au prix du système de briquettes

ments de prix des combustibles conventionnels, et en fait, ces systèmes semblent ne pas être rentables à des prix de combustibles conventionnels très bas. Ces chiffres montrent également qu'aux prix actuels des combustibles conventionnels sur le marché local, les briquettes de biomasse sont économiquement viables, à l'exception de celle de PBN. En effet, avec les prix actuels du GPL et du charbon de bois, BNB n'est pas économique. D'après l'analyse de sensibilité, comme le montrent toutes les courbes, bien que l'utilisa-

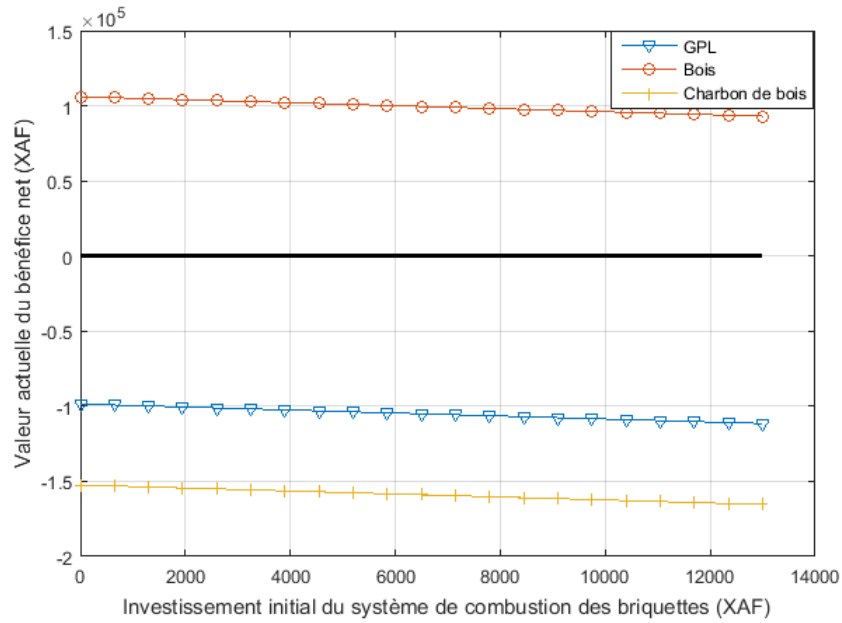


FIGURE 3.27 – Sensibilité de la VABN des briquettes PBN par rapport au prix du système de briquettes

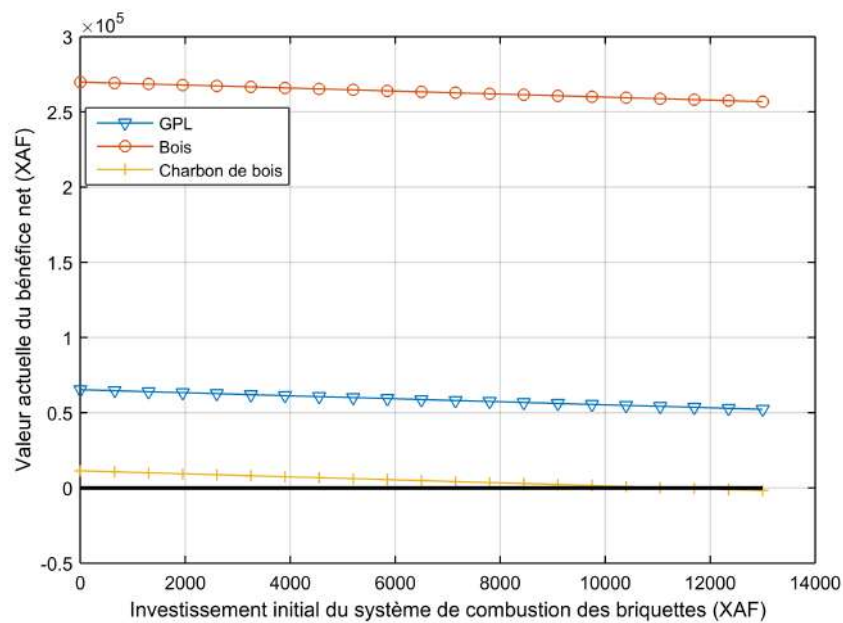


FIGURE 3.28 – Sensibilité de la VABN des briquettes BCS par rapport au prix du système de briquettes

tion du bois de chauffage ne nécessite pas de cuisinière spéciale, le plus grand avantage économique se note pour l'utilisation de briquettes contre ce bois de chauffage. Ceci est dû au coût unitaire élevé de tous les combustibles sur lesquels l'étude est basée, le bois de chauffage est le plus cher (plus du double du coût de la brique de DRT et de CNC).

Globalement, il est rentable pour un ménage de remplacer ses systèmes de cuisson conventionnels par des systèmes de combustion fonctionnant aux briquettes. Ces avantages

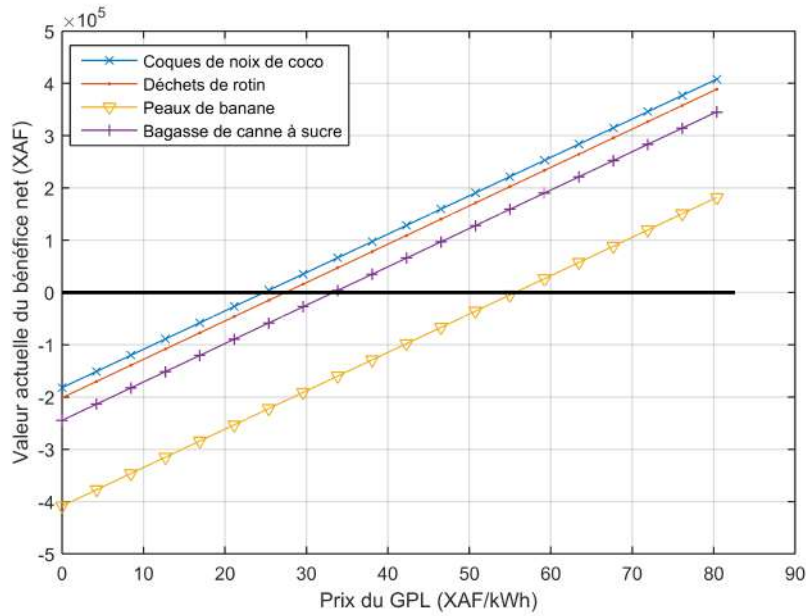


FIGURE 3.29 – Sensibilité de la VABN des briquettes par rapport au prix du GPL

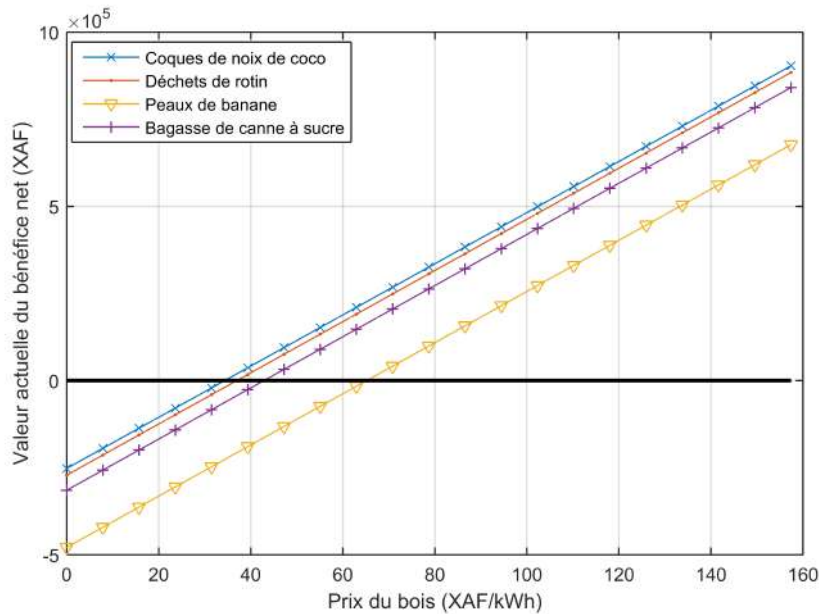


FIGURE 3.30 – Sensibilité de la VABN des briquettes par rapport au prix du bois

économiques s'ajoutent aux avantages énergétiques et environnementaux de la réduction de l'utilisation de ces combustibles conventionnels (bois-énergie, charbon de bois, GPL), qui ont déjà été démontrés par des études antérieures [9, 83].

En raison de leur coût relativement élevé et de leurs fours, les combustibles propres sont rarement utilisés en Afrique subsaharienne. De nombreux ménages ne sont pas disposés à adopter le bon fourneau pour utiliser les combustibles verts. La principale raison de cette hésitation à adopter de nouveaux fourneaux est l'investissement important requis [177]. Cependant, certains ménages utilisant du charbon de bois utilisent déjà le

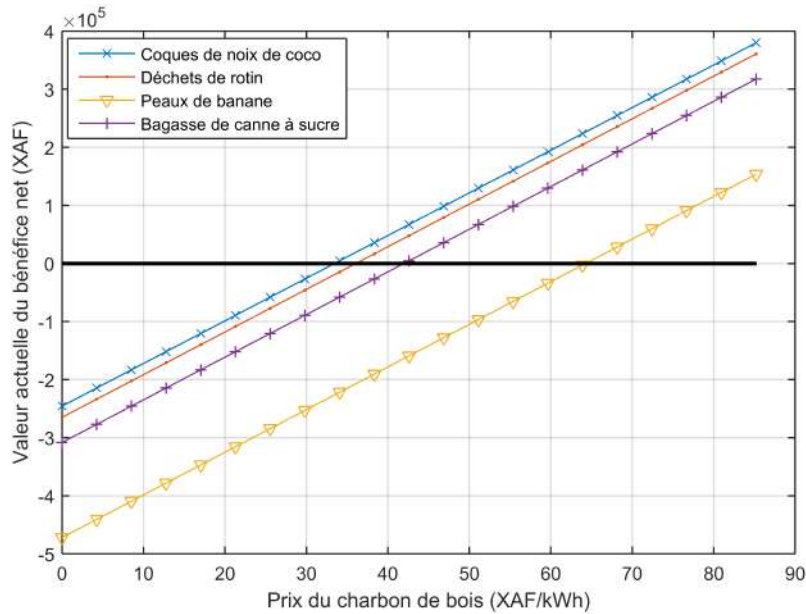


FIGURE 3.31 – Sensibilité de la VABN des briquettes par rapport prix de charbon de bois

fourneau amélioré recommandé pour les briquettes. Le remplacement du charbon de bois par des briquettes ne nécessite pas forcément pas l'achat d'un fourneau supplémentaire. Dans tous les cas, le four de cuisson a un coût relativement faible. Comme dit plus haut, le bois de feu représente 91% de l'énergie de cuisson des ménages utilisée au Cameroun. Les chiffres présentés dans ce chapitre montrent que les ménages auraient intérêt à remplacer le bois de feu par des briquettes. Cet inconvénient économique de l'utilisation du bois de chauffe dans les ménages s'ajoute aux inconvénients environnementaux (déforestation, émission de polluants) et sanitaires (développement de maladies respiratoires et pulmonaires causées par l'inhalation de gaz provenant de la combustion du bois de chauffe). Si toutes les conditions opératoires sont respectées lors de la fabrication des briquettes comme le résume Sunday et al [36], les briquettes produites seront de meilleure qualité et auront un meilleur pouvoir calorifique. Les résultats de cette étude devraient inciter les décideurs et le gouvernement à investir dans la production de briquettes afin que les briquettes soient largement disponibles et vendues à un prix plus bas. En conséquence, les dépenses des ménages en combustible de cuisson diminueraient.

Une mauvaise information ou le manque de connaissances des consommateurs pourraient compliquer l'adoption des briquettes de biomasse en Afrique subsaharienne. Pour accroître l'utilisation des briquettes, il est nécessaire de faire connaître leur existence et de susciter l'intérêt pour leur utilisation. Si une grande partie de la population adopte ce combustible, même dans les zones urbaines, l'État camerounais ferait des économies liées à l'importation de GPL. Toute solution à la question de l'énergie des ménages en Afrique sub-saharienne nécessite la participation directe et les efforts des gouvernements, des organisations non gouvernementales et d'autres structures. De nombreux autres gouvernements des pays du Sud pourraient étudier les moyens d'intégrer les briquettes de

biomasse dans leurs politiques. D'après une enquête sur les ménages en Tanzanie, le combustible dominant pour la cuisson est le charbon de bois, certains ménages n'utilisent pas certains combustibles de cuisson en raison de leur coût élevé et de la mauvaise qualité de la fumée produite lors de la combustion [178]. Au Ghana, une étude a montré que l'utilisation du bois de chauffage est associée à des problèmes tels que la mauvaise odeur, la fumée et la cuisson lente [179]. Selon Adama Sana et al, à Ouagadougou-Burkina Faso, le choix du combustible est influencé par le statut socio-économique de la famille, et le combustible prédominant est le bois [180]. En Afrique du Sud, Uhunamure et al. ont conclu que le revenu des consommateurs joue un rôle majeur dans le choix du combustible [181]. Sur la base des résultats de ces études précédentes, l'adoption des briquettes de biomasse peut être un choix prometteur pour les ménages.

Conclusion

Les déchets agricoles ont un potentiel énergétique important au Cameroun. Leur capacité à produire les briquettes de charbon écologique est de 106 139,65 TJ chaque année. L'expansion de l'agriculture entraîne une croissance de ce potentiel au fil des années. Selon la cartographie, dans chaque région, on note au moins quatre cultures dont la récolte et la transformation génèrent des résidus potentiellement utilisables pour le briquetage. La caractérisation confirme qu'il est possible de produire des briquettes ayant des paramètres physico-chimiques satisfaisants. Les résultats de l'analyse économiques permettent de conclure que les briquettes sont rentables pour le remplacement des combustibles conventionnels, en particulier le bois de chauffage. Les résultats de l'analyse énergétique montrent que la production des briquettes dépend largement de l'électricité générée par le gasoil, l'hydroélectricité, la biomasse et également le gaz naturel. La quantité d'énergie primaire requise de briquettes varient entre 0,75 kWh/kg et 2,60 kWh/kg. Le coût de production des briquettes a été déterminé principalement par le remboursement de la banque d'emprunt, les taxes, le paiement du loyer, le coût de l'énergie et le coût de la main-d'œuvre. En dehors des briquettes de peaux de banane, la substitution des combustibles classiques aux briquettes serait économiquement rentables pour les ménages.

Conclusion générale

Cette étude visait à caractériser les briquettes de charbon écologique produites à partir des coques de noix de coco, des déchets de rotin, de la bagasse de canne à sucre et des peaux de banane et analyser la possibilité de leur utilisation comme combustible de cuisson dans les ménages au Cameroun.

Une méthode expérimentale selon le protocole des normes internationales ASTM et CEN, l'analyse thermogravimétrique et les tests de combustion ont permis d'aboutir à la caractérisation des briquettes. L'étude énergétique a été effectuée à l'aide du principe de l'énergie primaire, la méthode de calculs des coûts de cycle de vie et l'analyse de sensibilité économique ont été employées pour faire l'étude économique. La recherche s'est articulée en quatre étapes. La première a été de faire une évaluation de la disponibilité des matières premières potentiellement utilisables pour la production des briquettes et analyser l'état de la production des briquettes de charbon écologique au Cameroun. Ensuite, caractériser les briquettes produites à partir de quelques biomasses agricoles camerounaises à savoir les coques de noix de coco, les déchets de rotin, la bagasse de canne à sucre et les peaux de banane. Puis étudier la production des briquettes afin de déterminer l'efficacité énergétique et la rentabilité économique de l'activité de production. Enfin, présenter une analyse économique de l'utilisation des briquettes dans un ménage camerounais moyen.

La biomasse agricole est disponible au Cameroun, le potentiel en est énorme. Les résultats montrent que le potentiel énergétique annuel est de 106 139,65 TJ/an et qu'il augmente au fil des ans. La banane/plantain, le maïs, le coton et le riz génèrent les résidus offrant les potentiels les plus importants. Selon la répartition géographique, chaque région possède au moins quatre cultures dont la transformation génère les résidus qui constituent la matière première de la production de briquettes. Le potentiel énergétique des régions varie de 3 à 30 PJ par an. Un état des lieux de la production du charbon écologique révèle que ce potentiel est sous-exploité. Les producteurs n'opèrent pas toujours le bon choix de résidus, ils ne tiennent pas compte de la variabilité saisonnière.

La masse des briquettes obtenues représente 2,02 % des résidus initiaux pour les peaux de banane et 4% pour la bagasse de canne à sucre, tandis que les coques de noix de coco et les déchets de rotin ont perdu 81,67 % et 80 % respectivement de leur masse pendant le processus de briquetage. Les résultats de la caractérisation. Les taux de matières volatiles

des briquettes produites sont comprises entre 60,92 et 70,50 %, et les valeurs de cendres et d'humidité corroborent celles de la littérature. Les résultats des analyses physiques et proximales montrent qu'il est possible de produire des briquettes avec des paramètres physico-chimiques satisfaisants en utilisant les matières premières choisies. Les briquettes étudiées ont des paramètres de combustion comparables à ceux du charbon de bois.

Une analyse énergétique et économique a été réalisée dans une entreprise de production de briquettes à petite échelle. Les résultats de l'analyse énergétique montrent que la chaleur et l'énergie mécanique sont les énergies utiles utilisées lors de la fabrication. L'entreprise utilisée comme étude de cas dépend largement de l'électricité générée par le gasoil, l'hydroélectricité, la biomasse et le gaz naturel également. La quantité d'énergie primaire requise par kg de briquettes produites est de 0,78 kWh/kg, 0,75 kWh/kg, 1,46 kWh/kg et 2,60 kWh/kg pour la production de briquettes à base de déchets de rotin, de coques de noix de coco, de bagasse de canne à sucre et de peaux de banane, respectivement. Le coût de production des briquettes a été déterminé principalement par le remboursement à la banque d'emprunt, les taxes foncières, le coût de l'énergie et le coût de la main-d'œuvre. Les indicateurs financiers estimés sont positifs sur une période de 20 ans pour la production de briquettes de CCS et RWT et négatifs pour la production de briquettes de SGC et BNP. L'unité de production pourrait améliorer ses conditions de fonctionnement afin de réduire la consommation d'énergie et les coûts de production.

D'après les résultats de l'analyse effectuée par la méthode CCV et l'analyse de sensibilité, il est conclu que les briquettes sont rentables pour le remplacement des combustibles conventionnels, en particulier le bois de chauffage. L'utilisation des briquettes peut également être bénéfique pour le gouvernement camerounais, ainsi que pour tout pays en développement à fort potentiel agricole. Si le gouvernement et les décideurs investissent dans la fabrication de briquettes écologiques, cela aura d'autres avantages environnementaux, économiques et sociaux, à savoir : (i) la limitation du déboisement dû à l'utilisation du bois de chauffage, (ii) la réduction des émissions polluantes dues à la combustion du bois de chauffage, (iii) la préservation de la santé des utilisateurs de bois de chauffage, (iv) la technologie de production des briquettes sera améliorée et les briquettes auront une meilleure performance énergétique, (v) les briquettes seront commercialisées à un prix plus bas, en raison de leur production de masse (vi) socialement, un nombre important de nouveaux emplois sera créé dans ce secteur (vii) le gouvernement réduira ses importations de GPL puisque l'énergie nécessaire à la cuisson des ménages peut être fournie localement. Vu les chiffres statistiques au Cameroun, les peaux de banane et la bagasse de canne à sucre sont plus disponibles mais ont des pertes de masse plus élevées, tandis que les coques de noix de coco sont moins disponibles et ont de faibles pertes de masse et de meilleures caractéristiques de combustion, donc le mélange des matières premières peut être recommandé afin d'équilibrer et d'assurer une production continue et une meilleure performance de combustion.

On peut conclure que les briquettes de charbon écologique peuvent être considérées comme combustibles de cuisson efficace et durable pour les ménages camerounais. Mais certaines études complémentaires peuvent se faire afin de consolider et réaffirmer cette thèse à savoir :

- L'investigation sur la définition d'une politique stratégique précise sur l'intégration des briquettes de charbon écologiques parmi les combustibles hautement utilisés au Cameroun.
- La caractérisation des briquettes produites à partir de tous les autres résidus disponibles au Cameroun en envisageant la possibilité de mélange de déchets afin d'obtenir des briquettes optimales.
- L'étude des aspects logistiques notamment la chaîne d'approvisionnement en résidus depuis la zone de production jusqu'à la conversion en briquettes.
- L'étude des techniques de conservation des résidus afin d'éviter les ruptures de stock dans les unités de production au cours de l'année.
- L'étude environnementale du système de production et d'utilisation.
- L'enquête auprès de ménages afin d'avoir leurs points de vue sur le charbon écologique.

Bibliographie

- [1] Eba'a Atyi, Guillaume Lescuyer, Jonas Ngouhou Poufoun, Thérèse Moulende Fouda, Awono Abdon, Jean-Lagarde Betti, Paolo Omar Cerutti, Julius Chupezi Tieguhong, Louis Defo, D Foundjem-Tita, et al. Étude de l'importance économique et sociale du secteur forestier et faunique au cameroun : Rapport final. 2013.
- [2] Dieudonné Kaoga Kidmo, Kodji Deli, and Bachirou Bogno. Status of renewable energy in cameroon. *Renewable Energy and Environmental Sustainability*, 6 :2, 2021.
- [3] Gabriel Tchatat. Cameroun - contribution à la préparation du rapport national pour la formulation du livre blanc régional sur l'accès universel aux services énergétiques intégrant le développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique, rapport final, 2014.
- [4] Jean Gaston Tamba. Lpg consumption and economic growth, 1975-2016 : evidence from cameroon. *International Journal of Energy Sector Management*, 2020.
- [5] Jolien Schure, Jean-Noël Marien, Carlos De Wasseige, Rudi Drigo, Fabio Salbinato, Sophie Dirou, and Méthode Nkoua. Contribution du bois énergie à la satisfaction des besoins énergétiques des populations d'afrique centrale : perspectives pour une gestion durable des ressources disponibles. 2012.
- [6] S Nnah Ndobe and K Mantzel. Déforestation, redd et le parc national takamanda au camerounâune étude de cas. *Forest Peopleâs Programme*, 2014.
- [7] Collins Okello, Stefania Pindozi, Salvatore Faugno, and Lorenzo Boccia. Bioenergy potential of agricultural and forest residues in uganda. *Biomass and bioenergy*, 56 :515–525, 2013.
- [8] Michael Lubwama and Vianney Andrew Yiga. Characteristics of briquettes developed from rice and coffee husks for domestic cooking applications in uganda. *Renewable energy*, 118 :43–55, 2018.
- [9] M Sawadogo, S Tchini Tanoh, S Sidibé, N Kpai, and I Tankoano. Cleaner production in burkina faso : Case study of fuel briquettes made from cashew industry waste. *Journal of Cleaner Production*, 195 :1047–1056, 2018.

- [10] Abdu Zubairu and Sadiq Abba Gana. Production and characterization of briquette charcoal by carbonization of agro-waste. *Energy Power*, 4(2) :41–47, 2014.
- [11] P Tiam Kapen, M Nandou Tenkeu, E Yadjie, and G Tchuen. Production and characterization of environmentally friendly charcoal briquettes obtained from agriculture waste : case of cameroon. *International Journal of Environmental Science and Technology*, pages 1–8, 2021.
- [12] Stanislav V Vassilev, David Baxter, Lars K Andersen, and Christina G Vassileva. An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, 89(5) :913–933, 2010.
- [13] Rukayya I Muazu and Julia A Stegemann. Effects of operating variables on durability of fuel briquettes from rice husks and corn cobs. *Fuel Processing Technology*, 133 :137–145, 2015.
- [14] Mary Njenga, Nancy Karanja, Gordon Prain, John Malii, Patrick Munyao, Kuria Gathuru, and Beatrice Mwasi. Community-based energy briquette production from urban organic waste at kahawa soweto informal settlement, nairobi. *Urban Harvest Working Paper Series*, 5, 2009.
- [15] PK Halder, N Paul, and MRA Beg. Assessment of biomass energy resources and related technologies practice in bangladesh. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39 :444–460, 2014.
- [16] SM Shafie, TMI Mahlia, HH Masjuki, and A Ahmad-Yazid. A review on electricity generation based on biomass residue in malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8) :5879–5889, 2012.
- [17] Md Ahiduzzaman and AKM Sadrul Islam. Development of biomass stove for heating up die barrel of rice husk briquette machine. *Procedia Engineering*, 56 :777–781, 2013.
- [18] Thapat Silalertruksa and Shabbir H Gheewala. A comparative lca of rice straw utilization for fuels and fertilizer in thailand. *Bioresource Technology*, 150 :412–419, 2013.
- [19] Lucy Wamukonya and Bryan Jenkins. Durability and relaxation of sawdust and wheat-straw briquettes as possible fuels for kenya. *Biomass and Bioenergy*, 8(3) :175–179, 1995.
- [20] OA Sotannde, AO Oluyege, and GB Abah. Physical and combustion properties of briquettes from sawdust of azadirachta indica. *Journal of Forestry research*, 21(1) :63–67, 2010.

- [21] EA Emerhi et al. Physical and combustion properties of briquettes produced from sawdust of three hardwood species and different organic binders. *Advances in Applied Science Research*, 2(6) :236–246, 2011.
- [22] C Antwi-Boasiako and BB Acheampong. Strength properties and calorific values of sawdust-briquettes as wood-residue energy generation source from tropical hardwoods of different densities. *Biomass and Bioenergy*, 85 :144–152, 2016.
- [23] Joseph O Akowuah, Francis Kemausuor, and Stephen J Mitchual. Physico-chemical characteristics and market potential of sawdust charcoal briquette. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 3(1) :20, 2012.
- [24] ABA Ibrahim, MS Aris, and Yee Sing Chin. Development of fuel briquettes from dewatered poultry sludge. 2012.
- [25] Edward E Boss and Samuel L Shepherd. Process for making a fuel product from coal fines and sewage sludge, 2001. US Patent 6,214,064.
- [26] N Mills, P Pearce, J Farrow, RB Thorpe, and NF Kirkby. Environmental & economic life cycle assessment of current & future sewage sludge to energy technologies. *Waste management*, 34(1) :185–195, 2014.
- [27] Sri Suhartini, Nur Hidayat, and Sieni Wijaya. Physical properties characterization of fuel briquette made from spent bleaching earth. *biomass and bioenergy*, 35(10) :4209–4214, 2011.
- [28] JeongIn Gug, David Cacciola, and Margaret J Sobkowicz. Processing and properties of a solid energy fuel from municipal solid waste (msw) and recycled plastics. *Waste management*, 35 :283–292, 2015.
- [29] Chuen-Shii Chou, Sheau-Horng Lin, and Wen-Chung Lu. Preparation and characterization of solid biomass fuel made from rice straw and rice bran. *Fuel processing technology*, 90(7-8) :980–987, 2009.
- [30] Jindaporn Jamradloedluk and Songchai Wiriyaumpaiwong. Production and characterization of rice husk based charcoal briquettes. *Engineering and Applied Science Research*, 34(4) :391–398, 2007.
- [31] JT Oladeji. Fuel characterization of briquettes produced from corncob and rice husk residues. *The Pacific Journal of Science and Technology*, 11(1) :101–106, 2010.
- [32] Jindaporn Jamradloedluk and Songchai Wiriyaumpaiwong. Production and characterization of rice husk based charcoal briquettes. *Engineering and Applied Science Research*, 34(4) :391–398, 2007.
- [33] A Olorunnisola. Production of fuel briquettes from waste paper and coconut husk admixtures. 2007.

- [34] Patomsok Wilaipon. Physical characteristics of maize cob briquettes under moderate die pressure. 2007.
- [35] Thatchapol Chungcharoen and Naruebodee Srisang. Preparation and characterization of fuel briquettes made from dual agricultural waste : Cashew nut shells and areca nuts. *Journal of Cleaner Production*, 256 :120434, 2020.
- [36] Sunday Yusuf Kpalo, Mohamad Faiz Zainuddin, Latifah Abd Manaf, and Ahmad Muhaimin Roslan. A review of technical and economic aspects of biomass briquetting. *Sustainability*, 12(11) :4609, 2020.
- [37] UNESCO. valorisation des résidus agricoles et des déchets ménagers : Leçon d’initiatives de production de charbon vert au mali, initiative de l’afrique pour les résultats. *UNESCO Report*, page 8, 2016.
- [38] Toby G Bridgeman, Jenny M Jones, and Alan Williams. Overview of solid fuels, characteristics and origin. *Handbook of Combustion : Online*, pages 1–30.
- [39] Ademe, contrôles de la qualité du combustible : Méthodes de mesure de l’humidité - fiche 16,(2018) consulté le 20 mai 2020 à 16h52.
- [40] Solid biofuelsâdetermination ofthe content of volatile matter ; consulté le 30 mai 2020 à 16h50, 2017.
- [41] ASTM. Standard test. methods for direct moisture content measurement ofwood and wood-based materials,(2016) consulté le 30 mai 2020 à 16h50, 2016.
- [42] ASTM. Standard test. method for volatile matter in the analysis sample of coal and coke ;(2018) consulté le 30 mai 2020 à 16h50, 2018.
- [43] Ademe, contrôles de la qualité du combustible : Méthodes de mesure du taux de cendres - fiche 18,(2018) consulté le 20 mai 2020 à 16h52.
- [44] Solid biofuels determination of ash content ; consulté le 30 mai 2020 à 16h50, 2015.
- [45] ASTM. Standard test. method for ash in the analysis sample of coal and coke from coal ;(2012) consulté le 30 mai 2020 à 16h50, 2012.
- [46] Critt bois / fibois, validation des méthodes de mesures des caractéristiques des combustibles bois déchiquetés, ademe, consulté le 20 mai 2020 à 16h52.
- [47] Ademe, contrôles de la qualité du combustible : Méthodes de mesure de la masse volumique apparente - fiche 19, (2018) consulté le 20 mai 2020 à 16h52.
- [48] Michael E Brown. *Introduction to thermal analysis : techniques and applications*. Springer, 2001.

- [49] Sampathkumar Velusamy, Anandakumar Subbaiyan, and Ramesh Srikrishnaperumal Thangam. Combustion characteristics of briquette fuels from sorghum panicle–pearl millets using cassava starch binder. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(17) :21471–21485, 2021.
- [50] A Skreiberg, Ø Skreiberg, J Sandquist, and L Sørum. Tga and macro-tga characterisation of biomass fuels and fuel mixtures. *Fuel*, 90(6) :2182–2197, 2011.
- [51] Yris D Fondja Wandji. Energy consumption and economic growth : Evidence from cameroon. *Energy Policy*, 61 :1295–1304, 2013.
- [52] André Faaij. Energy consumption and economic growth : evidence from cameroon,. *Energy policy*, 61 :1295–1304, 2013.
- [53] René Tchinda, Joseph Kendjio, Ernest Kaptouom, and Donatien Njomo. Estimation of mean wind energy available in far north cameroon. *Energy Conversion and Management*, 41(17) :1917–1929, 2000.
- [54] Joël Sotamenou. *Le compostage : une alternative soutenable de gestion publique des déchets solides au Cameroun, PhD thesis, Université de Yaoundé 1*. PhD thesis, 2010.
- [55] INS. Rapport annuel de l’institut national de la statistique, chapitre 13 : Agriculture, 2017.
- [56] Md Anisur Rahman, Henrik B Møller, and Md Monjurul Alam. Assessing the energy potential of agricultural residues and an approach to meet the rural energy demand : The bangladesh perspective. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 8(4) :925–934, 2018.
- [57] André Faaij. Modern biomass conversion technologies. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 11(2) :343–375, 2006.
- [58] R Eba’a Atyi, J Ngouhou Poufoun, JP Mvondo Awono, A Ngoungoure Manjeli, R Sufo Kankeu, et al. Economic and social importance of fuelwood in cameroon. *International Forestry Review*, 18(1) :52–65, 2016.
- [59] Mesure et cartographie de la pauvreté en fonction des conditions de vie, 2022.
- [60] Joel Mebada. La pauvreté des ménages et bien-être individuel au cameroon, une analyse spatiale et régionale du phénomène. 2018.
- [61] Okey Francis Obi, Jeremiah C Ezema, and Wilfred I Okonkwo. Energy performance of biomass cookstoves using fuel briquettes. *Biofuels*, 2017.
- [62] MINEPAT. Stratégie nationale de développement 2020-2030, rapport, 2020.

- [63] Simona Di Fraia, Salvatore Fabozzi, Adriano Macaluso, and Laura Vanoli. Energy potential of residual biomass from agro-industry in a mediterranean region of southern italy (campania). *Journal of Cleaner Production*, 277 :124085, 2020.
- [64] Nikola Bilandzija, Neven Voca, Barbara Jelcic, Vanja Jurisic, Ana Matin, Mateja Grubor, and Tajana Kricka. Evaluation of croatian agricultural solid biomass energy potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93 :225–230, 2018.
- [65] AO Avcioğlu, MA Dayıoğlu, and U Türker. Assessment of the energy potential of agricultural biomass residues in turkey. *Renewable Energy*, 138 :610–619, 2019.
- [66] Ana Claudia Latronico and Zeâev Hochberg. G protein–coupled receptors in child development, growth, and maturation. *Science Signaling*, 3(143), 2010.
- [67] Faugno S Boccia L Okello C, Pindozi S. Potential of agricultural and forest residues in uganda. *Biomass and Bienergy*, (56) :515–525, 2013.
- [68] Chipo Shonhiwa. An assessment of biomass residue sustainably available for thermochemical conversion to energy in zimbabwe. *Biomass and Bioenergy*, 52 :131–138, 2013.
- [69] YS Mohammed, AS Mokhtar, Naomi Bashir, and R Saidur. An overview of agricultural biomass for decentralized rural energy in ghana. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20 :15–25, 2013.
- [70] Ezekiel Anabire Ayamga, Francis Kemausuor, and Ahmad Addo. Technical analysis of crop residue biomass energy in an agricultural region of ghana. *Resources, Conservation and Recycling*, 96 :51–60, 2015.
- [71] Erasmus Muh, Sofiane Amara, and Fouzi Tabet. Sustainable energy policies in cameroon : A holistic overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82 :3420–3429, 2018.
- [72] Samomssa Inna, J Yvette, and Kamga Richard. Energy potential of waste derived from some food crop products in the northern part of cameroon. *International Journal of Energy and Power Engineering*, 4(6) :342, 2015.
- [73] Edouard Mboumboue and Donatien Njomo. Biomass resources assessment and bioenergy generation for a clean and sustainable development in cameroon. *Biomass and bioenergy*, 118 :16–23, 2018.
- [74] A Debdoubi, E Colacio, et al. Production of fuel briquettes from esparto partially pyrolyzed. *Energy conversion and management*, 46(11-12) :1877–1884, 2005.
- [75] Varun Panwar, B Prasad, and Kailas L Wasewar. Biomass residue briquetting and characterization. *Journal of Energy Engineering*, 137(2) :108–114, 2011.

- [76] Bianca G de Oliveira Maia^a, Ozair Souza^b, Cintia Marangoni^b, Dachamir Hotza^a, Antonio Pedro N de Oliveiraa, and Noeli Sellin^b. Production and characterization of fuel briquettes from banana leaves waste. *CHEMICAL ENGINEERING*, 37, 2014.
- [77] FI Nwabue, U Unah, and EJ Itumoh. Production and characterization of smokeless bio-coal briquettes incorporating plastic waste materials. *Environmental Technology & Innovation*, 8 :233–245, 2017.
- [78] Conand Honoré KOUAKOU and Edjikémé EMERUWA. Caractérisation thermique de combustible à base de sciure de bois : influence de l’empois d’amidon de manioc sur l’efficacité énergétique des biocharbons à base de sciure de bois. *Afrique SCIENCE*, 16(4) :123–131, 2020.
- [79] Xiaobing Song, Shouyu Zhang, Yuanmo Wu, and Zhongyao Cao. Investigation on the properties of the bio-briquette fuel prepared from hydrothermal pretreated cotton stalk and wood sawdust. *Renewable Energy*, 151 :184–191, 2020.
- [80] Sisay Feleke, Fikremariam Haile, Degnechew Genene, Gemechu Yadeta, Amsalu Tollessa, Tegene Tantu, Tewabech Alemu, and Yihun Bekalu. Production and characterization of charcoal briquette from *oxytenanthera abyssinica*, *arundinaria alpina*, *acacia melifera* and *prosopis juliflora*. *Journal of Scientific and Innovative Research*, 9(1) :16–21, 2020.
- [81] Norbert Manirakiza, Théophile Ndikumana, and C Gisèle Jung. Towards the promotion of fuel briquettes using municipal solid waste and residual biomass in burundi. *International Journal of Environment*, 9(1) :14–31, 2020.
- [82] Anggoro Tri Mursito and Danang Nor Arifin. Characterization of bio-coal briquettes blended from low quality coal and biomass waste treated by garant® bio-activator and its application for fuel combustion. *International Journal of Coal Science & Technology*, pages 1–11, 2020.
- [83] Zhenkun Guo, Jianjun Wu, Yixin Zhang, Feng Wang, Yang Guo, Kening Chen, and Hu Liu. Characteristics of biomass charcoal briquettes and pollutant emission reduction for sulfur and nitrogen during combustion. *Fuel*, 272 :117632, 2020.
- [84] Inamullah Mian, Xian Li, Omar D Dacres, Jianjiang Wang, Bo Wei, Yiming Jian, Mei Zhong, Jingmei Liu, Fengyun Ma, and Noor Rahman. Combustion kinetics and mechanism of biomass pellet. *Energy*, 205 :117909, 2020.
- [85] Theophile Vitoussia, Alain Brillard, Damaris Kehrli, Alexis Kemajou, Ebenezer Njeugna, and Jean-François Brillhac. Thermogravimetric analyses and kinetic modeling of pellets built with three cameroonian biomass. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 11(5) :2107–2121, 2021.

- [86] Xin Huang, Jing-Pei Cao, Xiao-Yan Zhao, Jing-Xian Wang, Xing Fan, Yun-Peng Zhao, and Xian-Yong Wei. Pyrolysis kinetics of soybean straw using thermogravimetric analysis. *Fuel*, 169 :93–98, 2016.
- [87] Mohit Kumar, PK Mishra, and SN Upadhyay. Thermal degradation of rice husk : effect of pre-treatment on kinetic and thermodynamic parameters. *Fuel*, 268 :117164, 2020.
- [88] Mudassir Hussain Tahir, Zilong Zhao, Jianmin Ren, Tanveer Rasool, and Salman Raza Naqvi. Thermo-kinetics and gaseous product analysis of banana peel pyrolysis for its bioenergy potential. *Biomass and Bioenergy*, 122 :193–201, 2019.
- [89] Vianney Andrew Yiga and Michael Lubwama. Thermogravimetric analysis of agricultural residue carbonized briquettes for domestic and industrial applications. *MRS Advances*, 5(20) :1039–1048, 2020.
- [90] Jianbiao Liu, Xuya Jiang, Hongzhen Cai, and Feng Gao. Study of combustion characteristics and kinetics of agriculture briquette using thermogravimetric analysis. *ACS omega*, 6(24) :15827–15833, 2021.
- [91] Bemgba Bevan Nyakuma, Anwar Johari, Arshad Ahmad, and Tuan Amran Tuan Abdullah. Thermogravimetric analysis of the fuel properties of empty fruit bunch briquettes. *Jurnal Teknologi*, 67(3), 2014.
- [92] Ambedkar Balraj, Jagannathan Krishnan, Keerthana Selvarajan, and Keertthana Sukumar. Potential use of biomass and coal-fine waste for making briquette for sustainable energy and environment. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(45) :63516–63522, 2021.
- [93] Temitope Olugbade, Oluwole Ojo, and Tihamiyu Mohammed. Influence of binders on combustion properties of biomass briquettes : a recent review. *BioEnergy Research*, 12(2) :241–259, 2019.
- [94] Matthew R Lumadue, Fred S Cannon, and Nicole R Brown. Lignin as both fuel and fusing binder in briquetted anthracite fines for foundry coke substitute. *Fuel*, 97 :869–875, 2012.
- [95] Naci Emre Altun, C Hicyilmaz, and Mustafa Verşan Kök. Effect of different binders on the combustion properties of lignite part i. effect on thermal properties. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, 65(3) :787–795, 2001.
- [96] James M Onchieku, Ben N Chikamai, and MS Rao. Optimum parameters for the formulation of charcoal briquettes using bagasse and clay as binder. *European Journal of Sustainable Development*, 1(3) :477–477, 2012.

- [97] Qiang Hu, Jingai Shao, Haiping Yang, Dingding Yao, Xianhua Wang, and Hanping Chen. Effects of binders on the properties of bio-char pellets. *Applied Energy*, 157 :508–516, 2015.
- [98] Gabriela Bonassa, Lara Talita Schneider, Victor Bruno Canever, Paulo André Cremonez, Elisandro Pires Frigo, Jonathan Dieter, and Joel Gustavo Teleken. Scenarios and prospects of solid biofuel use in brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82 :2365–2378, 2018.
- [99] Tuyeni H Mwampamba, Matthew Owen, and Maurice Pigaht. Opportunities, challenges and way forward for the charcoal briquette industry in sub-saharan africa. *Energy for Sustainable Development*, 17(2) :158–170, 2013.
- [100] George K Ngusale, Yonghao Luo, and Jeremiah K Kiplagat. Briquette making in kenya : Nairobi and peri-urban areas. *Renewable and sustainable energy reviews*, 40 :749–759, 2014.
- [101] Okey Francis Obi, Busayo Sunday Adeboye, and Nneoma Nkem Aneke. Biomass briquetting and rural development in nigeria. *Int. J. Sci. Environ. Technol*, 3(3), 2014.
- [102] Felix Fonseca Felffi, José Dilcio Rocha, Daniele Filippetto, Carlos A Luengo, Walfrido Alonso Pippo, et al. Biomass briquetting and its perspectives in brazil. *Biomass and bioenergy*, 35(1) :236–242, 2011.
- [103] SR Teixeira, AFV Pena, and AG Miguel. Briquetting of charcoal from sugar-cane bagasse fly ash (scbfa) as an alternative fuel, 2010.
- [104] Alexandre Racicot. *Durabilité de combustibles de substitution au bois énergie en Haïti : filières renouvelables pour la cuisson des aliments*. PhD thesis, Université de Sherbrooke., 2011.
- [105] M Njenga, N Karanja, H Karlsson, R Jamnadass, M Iiyama, J Kithinji, and Cecilia Sundberg. Additional cooking fuel supply and reduced global warming potential from recycling charcoal dust into charcoal briquette in kenya. *Journal of cleaner production*, 81 :81–88, 2014.
- [106] Pitchou Tshimpanga Ongona. Analyse socio-économique de la consommation de charbon de bois. 2016.
- [107] Mathilde Laval. Le charbon vert, espoirs et réalités dâune alternative énergétique séduisante. *Étude commandée par la guilde européenne du Raid*, 2014.
- [108] Issoufou Oumarou. Investigating the market potential of eco-friendly coal briquettes in the region of tahoua, niger. *International Journal of Business and Social Science*, 10(10), 2019.

- [109] Nigel Bruce, Rachel Anderson de Cuevas, Jessie Cooper, Bessem Enonchong, Sara Ronzi, Elisa Puzzolo, Bertrand MBatchou, and Daniel Pope. The government-led initiative for lpg scale-up in cameroon : Programme development and initial evaluation. *Energy for Sustainable Development*, 46 :103–110, 2018.
- [110] Jean Hugues Nlom and Aziz A Karimov. Modeling fuel choice among households in northern cameroon. *Sustainability*, 7(8) :9989–9999, 2015.
- [111] Arun K Tripathi, PVR Iyer, and Tara Chandra Kandpal. A techno-economic evaluation of biomass briquetting in india. *Biomass and bioenergy*, 14(5-6) :479–488, 1998.
- [112] Wojciech Źarski. Utilization of biomass for energy production in the kujawsko-pomorskie province : Examples and development. *Studia i Materiały Polskiego Stowarzyszenia Zarządzania Wiedza/Studies & Proceedings Polish Association for Knowledge Management*, (61), 2012.
- [113] KY Tippayawong, S Santiteerakul, S Ramingwong, and N Tippayawong. Cost analysis of community scale smokeless charcoal briquette production from agricultural and forest residues. *Energy Procedia*, 160 :310–316, 2019.
- [114] Mariusz J Stolarski, Stefan Szczukowski, Józef Tworkowski, Michał Krzyżaniak, Paweł Gulczyński, and Mirosław Mleczek. Comparison of quality and production cost of briquettes made from agricultural and forest origin biomass. *Renewable energy*, 57 :20–26, 2013.
- [115] Nishant Gill, Ritu Dogra, and Baldev Dogra. Influence of moisture content, particle size, and binder ratio on quality and economics of rice straw briquettes. *BioEnergy Research*, 11(1) :54–68, 2018.
- [116] NSL Srivastava, SL Narnaware, JP Makwana, SN Singh, and S Vahora. Investigating the energy use of vegetable market waste by briquetting. *Renewable Energy*, 68 :270–275, 2014.
- [117] Sigurd Eriksson, Michael Prior, et al. *The briquetting of agricultural wastes for fuel*. Number 11. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1990.
- [118] Raphael Muzondiwa Jingura, Downmore Musademba, and Reckson Kamusoko. A review of the state of biomass energy technologies in zimbabwe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26 :652–659, 2013.
- [119] P Dinesha, Shiva Kumar, and Marc A Rosen. Biomass briquettes as an alternative fuel : A comprehensive review. *Energy Technology*, 7(5) :1801011, 2019.

- [120] JM Onchieku. Cost benefit analysis of making charcoal briquettes using screw press machine locally designed and fabricated. *Int. Adv. Res. J. Sci. Eng. Technol*, 5 :57–65, 2018.
- [121] O Adeoti, MO Ilori, TO Oyebisi, and LO Adekoya. Engineering design and economic evaluation of a family-sized biogas project in nigeria. *Technovation*, 20(2) :103–108, 2000.
- [122] Peter Nabusi Walekhwa, Drake Lars, and Johnny Mugisha. Economic viability of biogas energy production from family-sized digesters in uganda. *Biomass and Bioenergy*, 70 :26–39, 2014.
- [123] SH Sengar, SS Patil, and AD Chendake. Economic feasibility of briquetted fuel. *Global Journal of Research In Engineering*, 2013.
- [124] K Hakizimana Jean de Dieu and Hyung-Taek Kim. Peat briquette as an alternative to cooking fuel : A techno-economic viability assessment in rwanda. *Energy*, 102 :453–464, 2016.
- [125] Cheng Feng, Xinxin Yu, Hanqiu Tan, Tian Liu, Tianyu Hu, Zhuoyan Zhang, Shi Qiu, and Longjian Chen. The economic feasibility of a crop-residue densification plant : A case study for the city of jinzhou in china. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24 :172–180, 2013.
- [126] Jianjun Hu, Tingzhou Lei, Zhiwei Wang, Xiaoyu Yan, Xinguang Shi, Zaifeng Li, Xiaofeng He, and Quanguo Zhang. Economic, environmental and social assessment of briquette fuel from agricultural residues in china—a study on flat die briquetting using corn stalk. *Energy*, 64 :557–566, 2014.
- [127] M Fadzli Hamid, M Yusof Idroas, M Zulfikar Ishak, Z Alimuddin Zainal Alauddin, M Azman Miskam, and M Khalil Abdullah. An experimental study of briquetting process of torrefied rubber seed kernel and palm oil shell. *BioMed research international*, 2016, 2016.
- [128] Waraporn Rattanongphisat and Sirinuch Chindaruksa. A bio-fuel briquette from durian peel and rice straw : Properties and economic feasibility. *NU. International Journal of Science*, 8(2) :1–11, 2011.
- [129] Ranjit Sen, Sujinda Wiwatpanyaporn, and Ajit Padmakar Annachhatre. Influence of binders on physical properties of fuel briquettes produced from cassava rhizome waste. *International Journal of Environment and Waste Management*, 17(2) :158–175, 2016.
- [130] I Odeh, YG Yohanis, and Brian Norton. Economic viability of photovoltaic water pumping systems. *Solar energy*, 80(7) :850–860, 2006.

- [131] Kamalakanta Sahoo, Edward Bilek, Richard Bergman, and Sudhagar Mani. Techno-economic analysis of producing solid biofuels and biochar from forest residues using portable systems. *Applied Energy*, 235 :578–590, 2019.
- [132] Bernice Asamoah, Josiane Nikiema, Solomie Gebrezgabher, Elsie Odonkor, and Mary Njenga. A review on production, marketing and use of fuel briquettes. *International Water Management Institute (IWMI). CGIAR Research Program*, 2016.
- [133] INS. Rapport annuel de l’institut national de la statistique, chapitre 17 : Agriculture, 2017.
- [134] Zubaidah Omar and Fazleen Abdul Fatah. Unravelling the factors affecting agriculture profitability enterprise : Evidence from coconut smallholder production. *Accounting*, 6(4) :493–500, 2020.
- [135] U.S. Environmental Protection Agency. *Methodology for Thermal Efficiency and Energy Input Calculations and Analysis of Biomass Cogeneration Unit Characteristic*, 2007.
- [136] Jigisha Parikh, SA Channiwala, and GK Ghosal. A correlation for calculating elemental composition from proximate analysis of biomass materials. *Fuel*, 86(12-13) :1710–1719, 2007.
- [137] HA Ajimotokan, AO Ehindero, KS Ajao, AA Adeleke, PP Ikubanni, and YL Shuaib-Babata. Combustion characteristics of fuel briquettes made from charcoal particles and sawdust agglomerates. *Scientific African*, 6 :e00202, 2019.
- [138] Dirk Willem Van Krevelen and Klaas Te Nijenhuis. *Properties of polymers : their correlation with chemical structure ; their numerical estimation and prediction from additive group contributions*. Elsevier, 2009.
- [139] Rob Bailis, Damon Ogle, Nordica MacCarty, D Still, Kirk R Smith, and Rufus Edwards. The water boiling test (wbt) version 3.0, household energy and health programme, shell foundation. *University of California Berkeley*, 2007.
- [140] Manoj Kumar, Sachin Kumar, and SK Tyagi. Design, development and technological advancement in the biomass cookstoves : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26 :265–285, 2013.
- [141] James Jetter, Yongxin Zhao, Kirk R Smith, Bernine Khan, Tiffany Yelverton, Peter DeCarlo, and Michael D Hays. Pollutant emissions and energy efficiency under controlled conditions for household biomass cookstoves and implications for metrics useful in setting international test standards. *Environmental science & technology*, 46(19) :10827–10834, 2012.

- [142] Víctor M Berrueta, Rufus D Edwards, and Omar R Masera. Energy performance of wood-burning cookstoves in michoacan, mexico. *Renewable Energy*, 33(5) :859–870, 2008.
- [143] Rob Bailis, Victor Berrueta, Chaya Chengappa, Karabi Dutta, Rufus Edwards, Omar Masera, Dean Still, and Kirk R Smith. Performance testing for monitoring improved biomass stove interventions : experiences of the household energy and health project. *Energy for sustainable development*, 11(2) :57–70, 2007.
- [144] Yunus A Cengel, Michael A Boles, and Mehmet Kanoğlu. *Thermodynamics : an engineering approach*, volume 5. McGraw-hill New York, 2011.
- [145] Adapt Consulting AS. *Adapt Consulting AS*, 2016.
- [146] Evangelos I Sakellariou, Petros J Axaopoulos, and Andrew J Wright. Energy and economic evaluation of a solar assisted ground source heat pump system for a north mediterranean city. *Energy and Buildings*, 231 :110640, 2021.
- [147] Evangelos I Sakellariou, Petros J Axaopoulos, and Andrew J Wright. Energy and economic evaluation of a solar assisted ground source heat pump system for a north mediterranean city. *Energy and Buildings*, 231 :110640, 2021.
- [148] La Ifa, Setyawati Yani, Nurjannah Nurjannah, Darnengsih Darnengsih, Andi Rusnaenah, Maizirwan Mel, Mahfud Mahfud, and Heri Septya Kusuma. Techno-economic analysis of bio-briquette from cashew nut shell waste. *Heliyon*, 6(9) :e05009, 2020.
- [149] Shiv Prasad, Anoop Singh, Nicholas E Korres, Dheeraj Rathore, Surajbhan Sevda, and Deepak Pant. Sustainable utilization of crop residues for energy generation : A life cycle assessment (lca) perspective. *Bioresource Technology*, 303 :122964, 2020.
- [150] Edouard Mboumboue and Donatien Njomo. Potential contribution of renewables to the improvement of living conditions of poor rural households in developing countries : Cameroon³scasestudy. *RenewableandSustainableEnergyReviews*, 61 : 266 – –279, 2016.
- [151] Pepin Tchouate Heteu. *Contribution des énergies renouvelables au développement durable du secteur électrique : le cas du Cameroun*. PhD thesis, UCL-Université Catholique de Louvain, 2003.
- [152] ONACC. Calendrier agricole pour la campagne 2020 pour les cinq zones agro-écologiques du cameroun, 2020.
- [153] E Iakovou, A Karagiannidis, D Vlachos, A Toka, and A Malamakis. Waste biomass-to-energy supply chain management : A critical synthesis. *Waste management*, 30(10) :1860–1870, 2010.

- [154] V Skoulou and A Zabaniotou. Investigation of agricultural and animal wastes in greece and their allocation to potential application for energy production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(8) :1698–1719, 2007.
- [155] J Zandersons, A Kokorevics, and J Gravitis. Studies of bagasse charcoal briquetting, reduction of the ash content in charcoal, and preliminary material and energy estimations for the design of a pilot plant of bagasse charcoal. *UNU/IAS Working Paper*, (58) :1–33, 1999.
- [156] Ayhan Demirbaş and Ayşe Şahin. Evaluation of biomass residue : 1. briquetting waste paper and wheat straw mixtures. *Fuel processing technology*, 55(2) :175–183, 1998.
- [157] Ana K de G Smith, Letícia S Alesi, Luciano D Varanda, Diego A da Silva, Luis RO Santos, and Fábio M Yamaji. Production and evaluation of briquettes from urban pruning residue and sugarcane bagasse. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 23(2) :138–143, 2019.
- [158] HV Pallavi, S Srikantaswamy, BM Kiran, DR Vyshnavi, and CA Ashwin. Briquetting agricultural waste as an energy source. *Journal of Environmental Science, Computer Science and Engineering & Technology*, 2(1) :160–172, 2013.
- [159] OM Aina, A Adetogun, and KA Iyiola. Heat energy from value-added sawdust briquettes of albizia zygia. *Ethiopian Journal of Environmental Studies and Management*, 2(1), 2009.
- [160] REGIONAL WOOD ENERGY. Regional wood energy development programme in asia gcp/ras/154/net. 2017.
- [161] Priscilla Zwiercheczewski de Oliveira, Luciana Porto de Souza Vandenberghe, Cristine Rodrigues, Gilberto Vinícius de Melo Pereira, and Carlos Ricardo Soccol. Exploring cocoa pod husks as a potential substrate for citric acid production by solid-state fermentation using aspergillus niger mutant strain. *Process Biochemistry*, 113 :107–112, 2022.
- [162] Ashish Pawar, NL Panwar, Sudhir Jain, NK Jain, and Trilok Gupta. Thermal degradation of coconut husk waste biomass under non-isothermal condition. *Biomass Conversion and Biorefinery*, pages 1–10, 2021.
- [163] Shadi Moqbel, Debra Reinhart, and Ruey-Hung Chen. Factors influencing spontaneous combustion of solid waste. *Waste Management*, 30(8-9) :1600–1607, 2010.
- [164] EC Mbamala. Burning rate and water boiling testsfor differently composed palm kernel shell briquettes. 2019.
- [165] Ige Bori, AB Muhammad, MB Maina, and HM Iyodo. Evaluation of rice husk-groundnut shell bio-briquette as an alternative fuel for domestic cooking in nigeria. 2022.
- [166] DS SENCHI. Comparative studies of water boiling test and ignition time of carbonized rice husk using starch and gum arabic as adhesives. 2020.

- [167] EJS Mitchell, AR Lea-Langton, JM Jones, A Williams, P Layden, and R Johnson. The impact of fuel properties on the emissions from the combustion of biomass and other solid fuels in a fixed bed domestic stove. *Fuel Processing Technology*, 142 :115–123, 2016.
- [168] Nieves Fernandez-Anez, David JF Slatter, Muhammad Azam Saeed, Herodotos N Phylaktou, Gordon E Andrews, and Javier Garcia-Torrent. Ignition sensitivity of solid fuel mixtures. *Fuel*, 223 :451–461, 2018.
- [169] Bernard Kivumbi, Yusufu AC Jande, John B Kirabira, and Thomas T Kivevele. Water boiling test of carbonized briquettes produced from charcoal fines using african elemi (*canarium schweinfurthii*) resin as an organic binder. *Biomass Conversion and Biorefinery*, pages 1–16, 2021.
- [170] Okey Francis Obi. Evaluation of the effect of palm oil mill sludge on the properties of sawdust briquette. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52 :1749–1758, 2015.
- [171] TU Onuegbu, UE Ekpunobi, IM Ogbu, MO Ekeoma, FO Obumselu, et al. Comparative studies of ignition time and water boiling test of coal and biomass briquettes blend. *IJRRAS*, 7(2) :153–159, 2011.
- [172] Gilbert Ayine Akolgo, Edward A Awafo, Eric Osei Essandoh, Prosper Achaw Owusu, Felix Uba, and Kofi A Adu-Poku. Assessment of the potential of charred briquettes of sawdust, rice and coconut husks : Using water boiling and user acceptability tests. *Scientific African*, 12 :e00789, 2021.
- [173] Ikelle I Ikelle, Nworu J Sunday, Nworie F Sunday, Jedidiah John, Ogbuagu J Okechukwu, and Nwabueze I Elom. Thermal analyses of briquette fuels produced from coal dust and groundnut husk. *Acta Chemica Malaysia*, 4(1) :24–27, 2020.
- [174] Sulaiman Abdulkareem, BADEJO A Hakeem, Ismaila I Ahmed, Tajudeen K Ajiboye, Jeleel A Adebisi, and TAIWO Yahaya. Combustion characteristics of bio-degradable biomass briquettes. *School of Engineering, Taylor&s University, Malaysia*, 2018.
- [175] Anil Kumar, Nitin Kumar, Prashant Baredar, and Ashish Shukla. A review on biomass energy resources, potential, conversion and policy in india. *Renewable and sustainable energy reviews*, 45 :530–539, 2015.
- [176] Hannu Suopajärvi and Timo Fabritius. Towards more sustainable ironmakingâan analysis of energy wood availability in finland and the economics of charcoal production. *Sustainability*, 5(3) :1188–1207, 2013.
- [177] Nicolai Schlag and Fiona Zuzarte. Market barriers to clean cooking fuels in sub-saharan africa : a review of literature. 2008.
- [178] Nike Doggart, Remidius Ruhinduka, Charles K Meshack, Romanus C Ishengoma, Theron Morgan-Brown, Jumanne M Abdallah, Dominick V Spracklen, and Susannah M Sallu.

The influence of energy policy on charcoal consumption in urban households in tanzania. *Energy for Sustainable Development*, 57 :200–213, 2020.

- [179] ED Wiafe and PA Kwakwa. Fuel-wood usage assessment among rural households in ghana. *Spanish Journal of Rural Development*, 4(1) :41–48, 2013.
- [180] Adama Sana, Benoit Kafando, Michèle Dramaix, Nicolas Meda, and Catherine Bouland. Household energy choice for domestic cooking : distribution and factors influencing cooking fuel preference in ouagadougou. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(15) :18902–18910, 2020.
- [181] Solomon Eghosa Uhunamure, Nthaduleni Samuel Nethengwe, and Agnes Musyoki. Driving forces for fuelwood use in households in the thulamela municipality, south africa. *Journal of Energy in Southern Africa*, 28(1) :25–34, 2017.

TRAVAUX ISSUS DE LA THÈSE

Articles publiés

1. **Bill Vaneck Bot**, Petros J. Axaopoulos, Olivier Thierry Sosso, Evangelos I. Sakkellariou, Jean Gaston Tamba, (2022) Energetic and economic analysis of biomass briquettes production from agricultural residues, Applied Energy, 12p, 321, 119430, Elsevier, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119430>

2. **Bill Vaneck Bot**, Petros J. Axaopoulos, Olivier Thierry Sosso, Evangelos I. Sakkellariou, Jean Gaston Tamba,(2022), Economic analysis of biomass briquettes made from coconut shells, rattan waste, banana peels and sugarcane bagasse in households cooking, International Journal of Energy and Environmental Engineering, Springer, 9p <https://doi.org/10.1007/s40095-022-00508-2>

3. **Bill Vaneck BOT**, Jean Gaston TAMBA Olivier T. SOSSO, (2022), Assessment of biomass briquettes energy potential from agricultural residues in Cameroon, Biomass Conversion and biorefinery, Springer, 13p, <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02388-2>

4. **Bill Vaneck BOT**, Olivier T. SOSSO, Jean Gaston TAMBA, Eugenie LEKANE, Jacques BIKAI, Max Keller NDAME, (2021), Preparation and characterization of fuel briquettes made from banana peels, sugar cane bagasse, coconut shells and rattan waste, Biomass Conversion and biorefinery, Springer, 10p, <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01762-w>

Communications aux colloques et rencontres internationales

1. **Bill Vaneck BOT**, Olivier T. SOSSO, Jean Gaston TAMBA, Assessment of energy potential and characterization of biomass briquettes made from crop residues, PROCEEDINGS OF THE DOCTORATE SEMINARS 2021, LE3M, University of Douala.

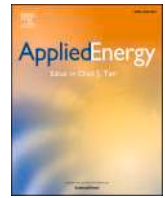
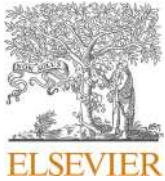
2. **Bill Vaneck BOT**, Olivier T. SOSSO, Jean Gaston TAMBA, "Production et caractérisation des briquettes de charbon écologique produites à partir des déchets agricoles", Doctoriales de l'Institut Internationale de l'Energie et de l'Eau, Ouagadougou, du 17 au 18 Décembre 2020.

3. **Bill Vaneck BOT**, Olivier T. SOSSO, Jean Gaston TAMBA, "Characterization of fuel briquettes made from agro-waste", Webinar on Biofuels and Renewable Energy, Phronesis, 26-27 Octobre 2020.

4. **Bill Vaneck BOT**, Olivier T. SOSSO, Jean Gaston TAMBA, "Valorisation des déchets en vue de la fabrication du charbon écologique : Une solution managériale pour le développement durable des villes", Colloque International de l'Université Internationale des pluies, Institut des Relations Internationales du Cameroun, Yaoundé-Cameroun 3-4 Septembre 2020.

ARTICLES PUBLIÉS

**ARTICLES
PUBLIÉS**



Energetic and economic analysis of biomass briquettes production from agricultural residues

Bill Vaneck Bot^{a,b,*}, Petros J. Axaopoulos^b, Evangelos I. Sakellariou^b, Olivier Thierry Sosso^c, Jean Gaston Tamba^{d,*}

^a Laboratory of Energy, Materials, Modelling and Methods, Higher National Polytechnic School, University of Douala, PO Box 2701 Douala, Cameroon

^b Department of Mechanical Engineering, University of West Attica, Campus II, Thivon 250, 12241 Aegaleo, Athens, Greece

^c Laboratory of Thermal and Environment, Advanced Teacher's Training College for Technical Education, University of Douala Cameroon, PO Box 1872 Douala, Cameroon

^d Department of Thermal and Energy Engineering, University Institute of Technology, University of Douala, PO Box 2701 Douala, Cameroon

HIGHLIGHTS

- Energy analysis and Economic viability of briquetting conversion of crop residues are investigated.
- Coconut shells, rattan waste, banana peels and sugarcane bagasse are residues selected.
- Energy balance, Life Cycle Analysis method and sensitivity analysis are applied.
- Biomass briquettes production could offer benefit for plant industry.

ARTICLE INFO

Keywords:

Energy- economic analysis
Biomass briquettes
Agricultural residues

ABSTRACT

This paper aims to analyse the energy consumption and economic viability of biomass briquettes production from agricultural residues. The work focus on briquetting conversion of coconut shells, rattan waste, sugarcane bagasse and banana peels based on a small-scale production plant located in Cameroon. Balance energy shows that the useful energy, mainly consumed during the briquetting process, is mechanical and thermal energy. Rattan waste, coconut shells, sugarcane bagasse, and banana peels briquettes need 0.78 kWh/kg, 0.75 kWh/kg, 1.46 kWh/kg, and 2.60 kWh/kg of primary energy, respectively. Economic analysis was carried out of 20 years' span. The manufacturing cost is comprised mainly by the labour cost of the employees, which stands for about the 30% of total expenses, following the expenses for the gasoil (10–16% of total expenses). Net Present Values for rattan waste, coconut shells, sugarcane bagasse, and banana peel briquetting systems were discovered to be 66,526€; 67,189€; –34,317€; and –44,932€, respectively. The economic viability of the briquette production is sensitive to briquette market price, discount rate and capital cost. In conclusion, briquettes production from crop residues could be economically benefited by adopting suitable strategies in Cameroon and in any developing country.

1. Introduction

The energy demand of the developing countries is continuously increasing due to a variety of factors, including population and gross world product growth. The global and domestic energy sectors have both grown significantly in recent years [1]. The Energy consumption pattern of any country is an indicator of its socio-economic status [2].

The International Energy Agency (IEA) estimates that the increase in global energy consumption will reach about 34% between 2012 and 2035 [3]. Conventional non-renewable energy (gas, oil, coal) is the main source of energy in the world; it accounts for over 2/3 of the world's energy consumption, with 34% oil, 27% coal and 24% natural gas, followed by hydro at 7%, nuclear at 4% and renewables (solar, wind, geothermal, biomass, etc.) at 4% [4]. Primary energy sources have

* Corresponding authors at: Laboratory of Energy, Materials, Modelling and Methods, Higher National Polytechnic School, University of Douala, PO Box 2701 Douala, Cameroon (B.V. Bot).

E-mail addresses: bbillvaneck@yahoo.fr (B.V. Bot), tambajea@gmail.com (J.G. Tamba).

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119430>

Received 26 January 2022; Received in revised form 10 May 2022; Accepted 3 June 2022

0306-2619/© 2022 Elsevier Ltd. All rights reserved.

limited reserves, and their extraction has a harmful environmental impact. The focus should therefore be on exploiting renewable energies to avoid the imminent depletion of fossil fuel sources.

To convert biomass to bioenergy can be a potential, inexhaustible, and long-term source of energy that can help mitigate the mounting environmental, economic, and technological concerns associated with the depletion of fossil fuels. Biomass residues from the agricultural system include straws, husks, shells, stalks and stem. Briquetting is a great way of biomass valorisation; it is shown that it improves biomass properties. Briquette fuel has more benefits than raw materials in general: it is a renewable source, has a higher calorific value than other solid fuel sources, has lower ash content than coal (2–10% vs. 20–40%), and the combustion is more efficient than coal [5,6]. Briquettes are utilised in both rural and urban locations for residential and industrial applications as such as cooking, steam generation, oil milling, tile making [7].

It is therefore interesting to set up plants that would ensure a stable and profitable production of briquettes, especially in developing countries due to their precarious economic situation. The briquette-making process involves drying, carbonizing, grinding, mixing with the addition of a binder, pressing, and finally drying of the briquettes. These processes need a constant supply of energy, necessitating the use of an efficient energy system. Inefficient energy consumption in industry can result in significant financial losses and raise the cost of items produced. In light of this, an attempt should be made to assess the amount of energy utilized throughout the manufacturing process. A careful study of energy and the economy is required to assess the feasibility of the briquetting industrialisation process. The present work is a contribution to the feasibility study of small-scale briquette production in developing countries.

Although there is a literature on energetic analysis of manufacturing processes, only a handful of works have been done on energetic analysis of the briquetting process. *Srivatava et al.* estimated the energy consumed in the production of briquettes from plant waste [8]. The results showed that the production of briquettes from cauliflower leaves, coriander stalks and leaves, fiddle beans, papdi, and green pea pods required 17 kWh/t, 17.5 kWh/t, 20 kWh/t, and 21 kWh/t, respectively. Some studies have already focused on the economic analysis of briquette production from biomass. For instance, in China, *Cheng Feng et al.* analysed the economic feasibility of briquette production from agricultural residues over a period of 10 years in a city [9]. By applying the method of sensitivity analysis, the authors showed that briquette production can be economically viable. An economic study applied to a corn stalk briquetting plant in China over a period of 15 years showed the possibility to have a payback time of 4.4 years [10]. In Poland, a study performed by *Mariusz J. Stolarski* showed that the cost of producing briquettes from willow, Virginia mallow, rape straw, and pine sawdust varies between 66.55 € euros per ton and 137.87 € per ton [11]. *Ifa et al.* stated in a techno-economic study that for a capacity of 2000 t/year, the net profit would be 147,402€/year and the payback time is 3.42 years [5]. In the USA in 2018, *Sahoo et al.* concluded that portable briquette making systems are economically viable and can bring competitively priced briquettes to the market [12].

To the best of the authors' knowledge, no study has been documented in the literature on the energetic and economic study of the production of briquettes from coconut shells (CCS), rattan waste (RWT), banana peels (BNP), and sugarcane bagasse (SGC). *Bot et al.* recently investigated production and characterization of biomass briquettes from these four residues and reported their physico-chemical properties of each briquette [13]. Biomass is particularly available in Cameroon because of its agro-industry, major agricultural produce in the country include banana, sugarcane, coconut and others [14]. There are some solid biofuel manufacturers using crop residues, there is a need to look into their activities to perform it. The objective of this paper to analyse the energy and economic situation of a small-scale briquetting plant located in Cameroon by assessing the energy consumption, cost production and economic parameters of briquetting process from rattan

waste, coconut shells, sugar cane bagasse and banana peels. This work is part of the ongoing efforts applied to the geo-specific feasibility studies of solid biofuels manufacturing. In this paper, an energy balance is done at each step of the briquetting process, while, the Life Cycle Analysis method, and sensitivity analysis are conducted in order to assess the feasibility of the business.

2. Materials and methods

The current study was carried out based on a small-scale briquetting industry located in Douala-Cameroon operating with agricultural residues, including coconut shells, rattan waste, banana peels and sugarcane bagasse. Cameroon is a central African country located between 2° and 13° North latitude, between 8° and 16° East longitude at the bottom of the Gulf of Guinea. The parameters and data used in this work have been collected in the briquetting plant and from *Bot et al.* study [13]. The briquetting steps as carried out in the production unit are illustrated in Fig. 1 and described in the following section.

2.1. Briquettes making description

The residues are gathered in Douala, Cameroon. A diesel-powered motor vehicle transports them to the briquetting area. The following are the phases involved in a briquetting process as illustrated in the Fig. 1:

2.1.1. Drying of crops residues collected

The goal is to remove humidity from the residues in order to improve the efficiency of the following stage, pyrolysis. This is done with a 1000 W electric dryer at 60 °C.

2.1.2 Carbonizing or slow pyrolysis

This is a crucial step in the manufacture of biomass briquettes. The aim is to induce the chemical decomposition of the raw material by the action of heat in order to obtain a product composed mainly of carbon. The main material used at this stage is a stainless-steel rotary carboniser, which is powered by a 5000 W electric motor. The carbonisation is accompanied by a gasoil in order to boost the ignition.

2.1.3 Crushing

The carbonised material is ground into fine particles of less than 5 µm in a 3500 W electric motor grinder.

2.1.4 Mixing

The mixing of crushed materials is done by the addition of binder, which leads to the facilitation of briquetting. The mass ratio of carbonized waste to binder is about 90:10. The equipment used is a mixer driven by an internal combustion engine consuming gasoil (Octane C₈H₁₈), which rotates for some time until the mixture is homogeneous.

2.1.5 Briquetting

The carbonized material mixed with binder is fed into a 5000 W electric briquette press. The compaction pressure used to produce briquettes is between 5 and 7 MPa for approximately 20 s.

2.1.6. Drying of briquettes produced

The moulded briquettes are then dehydrated by a 1000 W electric dryer at 60 °C. Finally, the briquettes are packed in bags of 40 kg.

2.2. Assumptions

For this study, the following assumptions are considered:

- The briquette-making experiment was carried out independently for each raw material, four kind of briquettes are therefore produced from the separately collected residues.

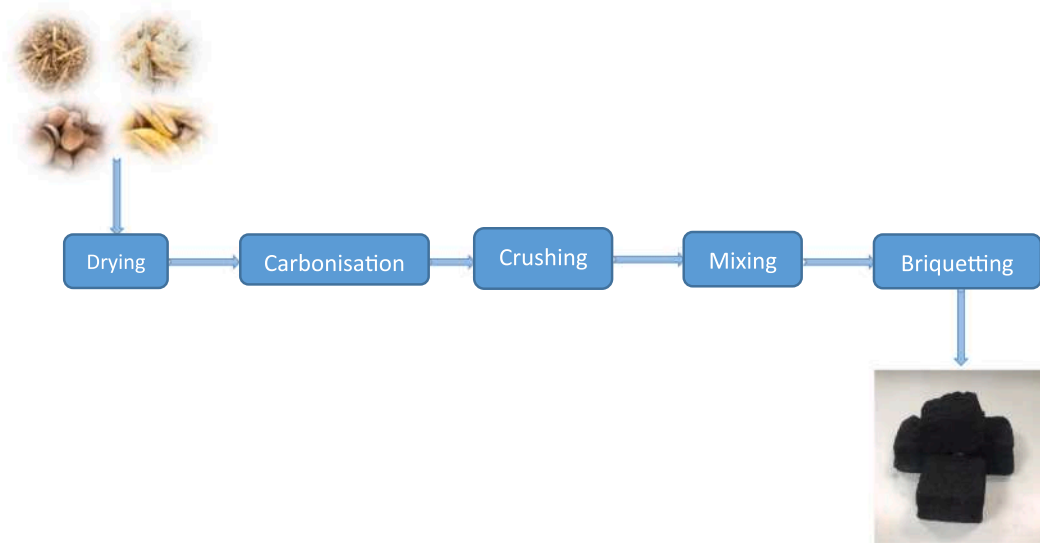


Fig. 1. Briquettes making process.

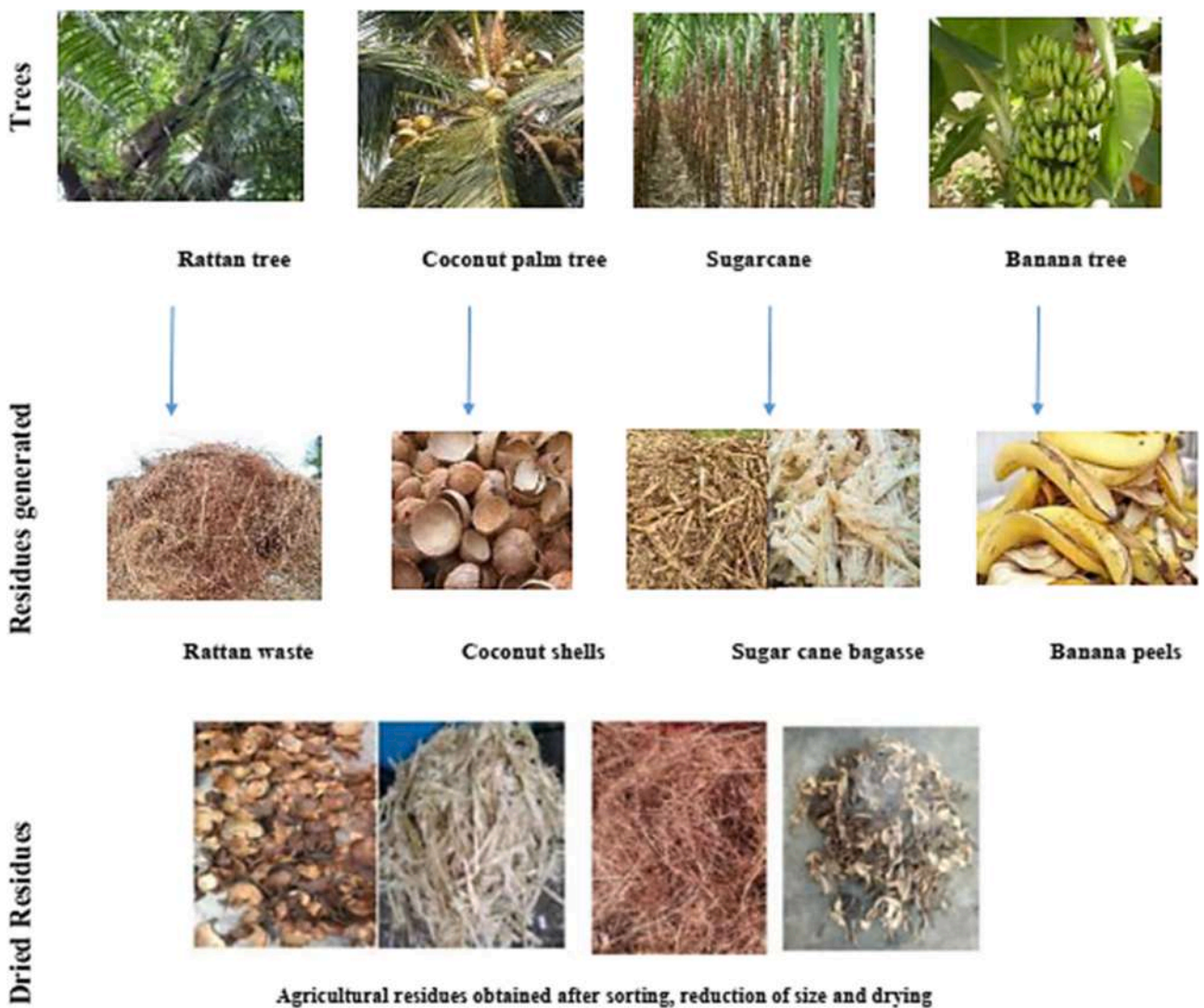


Fig. 2. Agricultural residues production [20].

- According to Bot et al. [13], 1000 kg of rattan waste, coconut shells, banana peels and sugarcane bagasse collected allow production of 185.325 kg, 198.5 kg, 40 kg and 20 kg of briquettes, respectively.

- The small-scale plant operates 10 h a day from 8 am to 6 pm Monday to Friday and 5 h on Saturday from 8 am to 1 pm.

- Calorific values of briquettes produced are reported in Bot et al. study [13].

2.3. Justification of the choice of raw materials

The choice of raw materials used for the production of biomass briquettes is guided by the energy potential of the waste selected and also by availability. Bananas are a fruit that originates in Southeast Asia and is widely farmed in Africa, the Caribbean, and Latin America. It is among the most commonly consumed on the planet; it is planted in over 150 countries and produces 105 million tons of fruit each year [15]. Banana/plantain is one of the most important food crops in Cameroon. Cameroonian production is estimated at 6 020 000 tons per year; its manufacturing could produce 1,505,066 tons of peels each year. Sugar cane is a giant herb that has been cultivated since prehistoric times and is thought to have originated in Asia and New Guinea [16]. It is presently manufactured in large quantities in America, Asia, and Africa. Bagasse is one of the waste products obtained from the processing of sugar cane, which consists mainly of fibres and cellulose [17]. Coconut originates from Sri Lanka, and has been planted in 90 countries, but mostly in Asia and the Pacific [18]. Coconuts are produced today in 60.77 million tons per year across 12.30 million hectares in more than 94 countries throughout the world [19]. Cameroon is the 17th coconut producer in Africa, the annual production is 5 000 tons, and the shell production ratio is 3 000 tons. Sugarcane is exploited for its therapeutic and nutritional virtues; it is also manufactured for the manufacture of refined sugar. The annual production of sugar cane in Cameroon is 1 450 000 tons and the total annual amount of derived bagasse is 343 500 tons. Rattan is a liana native to Asia that is used for furniture and art. It is not an agricultural crop but its use generates waste that some operators located in Central Africa find interesting for the manufacture of briquettes [13]. Bot et al. investigated the availability and energy potential of agricultural residues in Cameroon and reported that the annual biomass briquettes energy potential from coconut shells, sugarcane bagasse and banana peels is 16 TJ, 1 813 TJ and 4 217 TJ respectively [20]. The crops generating the residues selected for this study are as widespread around the world as each other and the waste is in relatively large quantities. Fig. 2 illustrates the presentation of coconut, rattan, banana and sugar cane trees and the residues exploited for the manufacture of briquettes.

2.4. Energetic analysis

Useful energy used in the biomass conversion plant are mechanical

$$(C_b - C_c)_t = B_c AP(1+i)^{t-1} - MC(1+j)^{t-1} - E_l E_p(1+k)^{t-1} - OS(1+n)^{t-1} - G_{asoi} G_p(1+i)^{t-1} - PT(1+i)^{t-1} - B_{inder} B_p(1+i)^{t-1} - Pack_p(1+i)^{t-1} - LP \quad (3)$$

and thermal energy for briquette production. The parameters required to assess the energy in each unit operation of the briquettes were measured directly or collected in the production plant. An inventory of motors and motor power was carried out. Primary energy was evaluated at each process operation on the basis of each useful energy consumed by adopting the primary energy conversion factor, knowing that electrical energy is produced in Cameroon from hydro-electricity, gas oil, natural gas and biomass at 73%, 12.8%, 12.9% and 1.3%, respectively. Table 1 shows energetic parameters and Table 2 gives details of

briquetting operations for each raw material.

PEF: Primary Energy Factor CV: Calorific Value.

The calculation of primary energy is done using equations (1) and (2). For the useful energy used by electrical equipment (during drying, carbonization, crushing and briquetting), the primary energy needed, is calculated from equation (1):

$$E_{Pr} = \frac{P.t.P_o.PEF}{\eta} \quad (1)$$

Where : E_{Pr} is primary energy (kWh), P electrical power of equipment (kW), t operating time of the equipment (h), P_o is (0.73; 0.129; 0.128 or 0.013 according to the mix power), PEF is the primary energy factor and η is the efficiency of the power unit (%).

For the useful energy resulting from the direct combustion of gasoil (during collection, mixing and carbonization) the Primary Energy needed is estimated by equation (2):

$$E_{Pr} = Q_y.CV.PEF \quad (2)$$

Where : Q_y is the quantity of gasoil used (litre) and CV is the Calorific Value of gasoil (kWh/l).

2.5. Economic analysis

The objective of the conducted economic analysis is to estimate the cost of production of briquettes made from the four crop residues selected and to determine the profitability of the business. Economic analysis is estimated for a period of 20 years. A Life Cycle Cost Analysis (LCCA) has been performed, considering initial capital cost and operating costs. The initial capital cost was totally financed through a 5-year loan term and related to the procurement and installation of equipment, site construction, taxes and duties related to the implementation of the production unit. Operating costs include all fixed and variable costs. They include maintenance and repair costs, electrical energy costs, binder costs, property insurance taxes (1.1% of cash flow profit), site rent (1200 €/year), gasoil costs, packaging costs, operators' salaries, and the collection and purchase of raw materials. Based on discussion with briquetting operators and due to its availability in large quantities, the residues are assumed to be free. The only costs associated with their purchase are the transport charges. According to the information collected at the production site, taking into account downtime due to maintenance and holidays, the production unit currently produce 30 tons of briquettes from CCS and RWT and 10 tons of briquettes from BNP and SGC each year. The assumed economic parameters are summarised in Table 3:

The value of the current annual Cash flow benefit $C_b(t)$ and Cash flow cost $C_c(t)$ were estimated, for each simulation year (t), using the following equation:

Where B_c is briquettes price (€/kg), AP is annual briquettes production (kg), MC is Maintenance cost (€), E_l is electrical energy used (kWh), E_p is electrical energy price (€/kWh), Gasoil is the quantity of gasoil used (litre), G_p is gasoil price (€/litre), OS is operator's salaries (€), PT is properties Taxes (€), B_{inder} is quantity of binder used (kg), BP is binder price (€/kg), $Pack_p$ is the annual package price (€), i is the market inflation rate, j is the maintenance cost inflation rate, k is electricity inflation rate, m is the bank loan inflation rate, and LP is bank loan periodic payment (€) which can be expressed as:

Table 1
Energetic parameters.

| Parameters | Values |
|------------------------------------|------------|
| PEF Gasoil | 1.1 |
| PEF Biomass | 1 |
| PEF Natural gas | 1.1 |
| Hydro power plant efficiency | 0.82 |
| Gasoil power plant efficiency | 0.387 |
| Natural gas power plant efficiency | 0.387 |
| Biomass power plant efficiency | 0.387 |
| CV Gasoil | 9.98 kWh/l |

$$LP = \frac{INV}{\frac{1}{m} \left[1 - \left(\frac{1}{1+m} \right)^N \right]} \quad (4)$$

Where INV is the initial capital cost and N the fixed number of reimbursement years.

The profitability evaluation criteria used in this work are Net Present Value and the profitability index.

Net Present Value (NPV):

This is used to determine the profitability of a project. If the NPV is positive, then the project can be accepted. The NPV is the sum of the net cash flow discounted at a rate of d and is given by the following equation:

$$NPV = \sum_{t=0}^{t=20} \frac{(C_b - C_c)_t}{(1 + d)^t} \quad (5)$$

C_b is Cash benefit of the investment, C_c is Cash cost of the investment, d is the discount rate and $(C_b - C_c)_t$ is the Net cash flow in the year (t).

Probability index (PI):

The profitability index (PI) describes an index that represents the relationship between the costs and benefits of a proposed project. Because it allows to quantify the amount of value generated per unit of investment, it's a great tool for rating initiatives. The profitability index is an investment assessment tool that is derived by dividing the Net Present Value of a project by the project's original investment. If PI greater than 0, the project is considered accepted.

$$PI = \frac{NPV}{INV} \quad (6)$$

3. Results

3.1. Results of energetic analysis

According to the [Table 4](#), the total primary energy required to convert 1000 kg of rattan waste (RWT), coconut shells (CCS), sugarcane bagasse (SGC), and banana peels (BNP) into briquettes is 142.52 kWh,

Table 3
Economic parameters.

| Parameters | Value |
|--|------------------------------------|
| Initial capital cost (INV) | 25 000 € |
| Annual maintenance cost (MC) | 500 € |
| Annual maintenance cost inflation rate (j) | 5% |
| Electricity price (Ep) | 0.12 (€/kWh) |
| Binder price (Bp) | 0.20 (€/kg) |
| Package price (Pack _p) | 0.05 (€/kg of briquettes produced) |
| Gasoil price (Gp) | 0.87 (€/l) |
| Market price of biomass briquettes (Bc) | 0.46 (€/kg) |
| Operator salary (OS) | 0.73 (€/hour) |
| Electricity inflation rate (k) | 0.1 % |
| Market inflation rate (i) | 2.4 % |
| Bank loan interest rate (m) | 7 % |
| Discount rate (d) | 7% |
| Salary inflation rate (n) | 3 % |

Table 4
Mass and Energy balance.

| | Rattan waste | Coconut shells | Sugarcane bagasse | Banana peels |
|---|--------------|----------------|-------------------|--------------|
| Input of raw materials (kg) | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| Moisture content of raw materials (%) | 11.30 | 10.00 | 50.00 | 15.00 |
| Mass of briquettes produced (kg) from 1000 kg of residues | 183.25 | 198.50 | 40 | 20 |
| Total primary energy used (kWh) | 142.52 | 148.86 | 58.38 | 52.18 |
| Total energy contained by briquettes produced (kWh) | 1528.305 | 1770.62 | 287.2 | 93.2 |
| Primary energy used per kg of briquettes produced (kWh/kg) | 0.78 | 0.75 | 1.46 | 2.60 |
| Primary energy used per energy produced (kWh/kWh) | 0.09 | 0.08 | 0.20 | 0.56 |
| Quantity of Gasoil used during the process per kg of briquettes produced (l/kg) | 0.046 | 0.044 | 0.0675 | 0.135 |
| Quantity of Electrical Energy used during the process per kg briquettes produced (kWh/kg) | 0.16 | 0.16 | 0.43 | 0.68 |
| Duration of cycle of production (h) | 17.75 | 17.75 | 12.75 | 12 |
| Output production capacity (kg/h) | 10.32 | 11.18 | 3.13 | 1.66 |

Table 2
Details parameters of briquetting operations.

| Units operations | Description Data | Rattan waste | Coconut shells | Sugarcane Bagasse | Banana peels |
|--|----------------------------------|--------------|----------------|-------------------|--------------|
| Residues Collection | Duration of collection (h) | 2.5 | 2.5 | 1 | 1 |
| Useful energy: mechanical | Quantity of gasoil used (litres) | 5 | 5 | 2 | 2 |
| Residues Drying | Duration of drying (h) | 0.5 | 0.5 | 5 | 5 |
| Useful energy: thermal | Power of resistance (kW) | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Carbonization | Duration of carbonization (h) | 0.75 | 0.75 | 0.5 | 0.25 |
| Useful energy: thermal and mechanical | Electrical Power of motor (kW) | 5 | 5 | 5 | 5 |
| | Quantity of gasoil used (litres) | 2 | 2.5 | 0.5 | 0.5 |
| Crushing | Duration of crushing (h) | 2 | 2 | 0.25 | 0.25 |
| Useful energy: mechanical | Electrical Power of motor (kW) | 3.5 | 3.5 | 3.5 | 3.5 |
| Mixing | Duration of mixing (h) | 2.5 | 2 | 0.5 | 0.5 |
| Useful energy: mechanical | Quantity of gasoil used | 1.5 | 1.2 | 0.2 | 0.2 |
| Briquetting | Duration of briquetting (h) | 2.5 | 3 | 1 | 0.5 |
| Useful energy: mechanical | Electrical power of motor (kW) | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Briquettes Drying | Duration of drying (h) | 6 | 6 | 4 | 4 |
| Useful energy: thermal | Power of resistance (kW) | 1 | 1 | 1 | 1 |

148.86 kWh, 58.38 kWh, and 52.18 kWh, respectively. This equates to 0.78 kWh/kg, 0.75 kWh/kg, 1.46 kWh/kg, and 2.6 kWh/kg of primary energy used in the manufacturing of briquettes RWT, CCS, SGC, and BNP, respectively. It is clear that CCS consumes the least amount of primary energy per kg of the four studied residues, whereas BNP consumes the most. This is probably due to the initial characteristics of the material. Indeed, CCS and RWT are interesting fuels with great Calorific Values (CV) and a low moisture content; their transformation into briquettes just improves the CV and does not need a large amount of energy. In contrast to SGC and BNP, which need significantly more energy during briquettes making. It looks that the greater the amount of energy consumed, the greater the amount of briquettes produced, and the greater the CV of the briquettes. The ratios of the amount of primary energy consumed per energy produced vary in the range 0.08–0.20 kWh/kWh. Although the energy ratio of BNP is large compared to the others, all these values are less than 1. This means that the amount of primary energy used is less than the energy produced. It is therefore energetically interesting to produce briquettes with RWT, CCS, SGC and BNP through the process described in the present work.

A production cycle from 1000 kg of residues allows the manufacturing of briquettes for 17.75 h, 17.75 h, 12.75 h, and 12 h from RWT, CCS, SGC and BNP respectively; from these data, annual briquettes production projection of 29,526.47 kg, 31,983.66 kg, 8,972.54 kg and 4,766.6 kg are computed. Based on the results, the industry may be advised to focus the production of briquettes from CCS because of its greater annual potential than the other three residues. In addition, CCS's briquettes have the highest CV and require less energy for manufacturing.

The output briquette production capacity from any residue is in the range of 1.67–10.32 kg/h, which is relatively low compared to the output capacities reported in the literature for other residues. According to [21], the output capacity for briquetting rubber see husk, palm oil shell is 200 kg/h and [8] reported an output capacity of 500 kg of briquettes per hour using vegetable market waste. However, in these works, the study does not cover all the production stages, but only the compaction phase.

Fig. 3 shows the distribution of primary energy consumption at each stage of production. From an overall view, it can be noticed that the

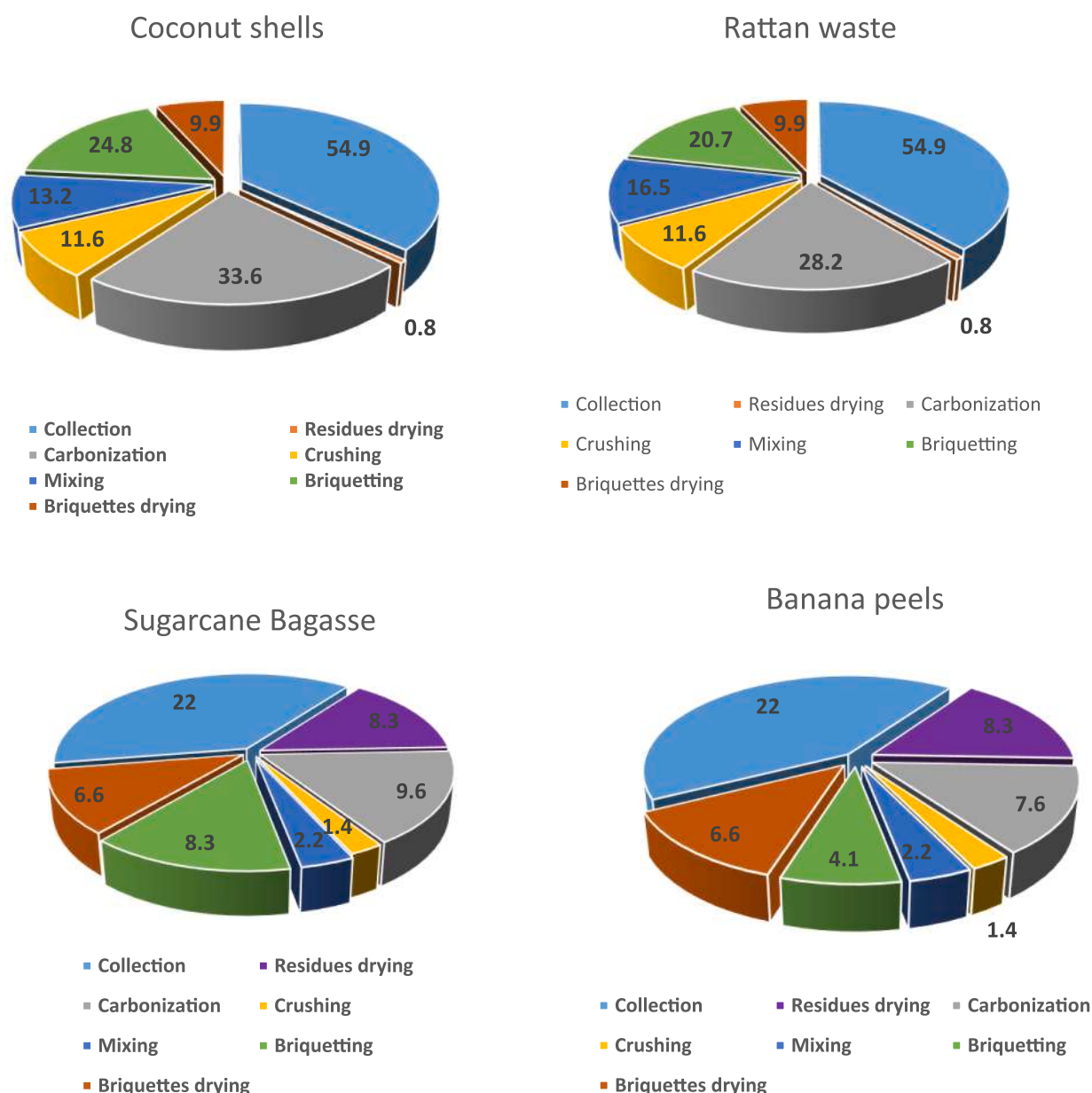


Fig. 3. Repartition of energy used at each step (kWh).

collection of residues is the stage where most of the energy is used. The energy consumed during collection accounts for about 40% of the total primary energy consumed for briquette manufacture. Energy consumption is higher for RWT and CCS and lower for SGC and BNP during this phase of production. This is due to the obvious availability of BNP and SGC in markets, households and other areas of the city. The collection of RWT and CCS requires long distance travel, which involves higher gasoil consumption.

Drying of RWT and CCS requires only 0.8kWh while SGC and BNP require 8.3kWh due to the higher initial moisture content of BNP and SGC residues than RWT and CCS.

The carbonisation of SGC and BNP requires 9.6kWh and 7.6kWh respectively. RWT and CCS require 28.2 and 33.6 kWh respectively because of their resistant structure which requires more energy to carbonise. For the same reason, RWT and CCS carbonised residues require more energy for grinding (11.6 kWh) than BNP and SGC (1.4 kWh).

The energy needed for mixing and drying briquettes from CCS and RWT is higher than for BNP and SGC because of the number of residues remaining at this stage of the manufacturing process; indeed, at the end of the briquetting process 183.25 kg of briquettes made from RWT and 198.5 kg of briquettes made from CCS are dried, compared to 40 kg of briquettes made from SGC and 20 kg of briquettes made from BNP briquettes. The energy used for briquetting is in the range [4.1–24.8] kWh per 1000 kg of initially weighed residue. Given these figures, it is clear that if energy consumption for briquettes making is to be reduced, action should be taken on waste collection and eventual drying. It may be advisable to locate briquette production plants close to sources of waste generation to reduce the distance travelled by motorised collection vehicles. Electric drying can be replaced by solar drying, which is free and clean. However, strategies will need to be developed to optimise solar drying as it could increase production time as solar drying is slower and intermittent.

Fig. 4 shows the distribution of primary energy by origin. It is clearly noticed from this histogram that the primary energy used is mainly derived from gasoil. The primary energy consumption is 104.1 kWh, 107.2 kWh, 36 kWh and 34.6 kWh for RWT, CCS, SGC and BNP respectively. This gasoil consumption is due to the use of motorised vehicles for residues collection and the use of combustion engine for mixing. It is already state that the excessive use of gasoil has negative effects on environment due to the emission of pollutants during combustion.

The installation of a biomass conversion plants close to the sources of

residue generation and the adoption of electric motors for mixing would reduce diesel consumption. The second share of primary energy is provided by hydro-electricity, at 21.1kWh, 23.4kWh, 11.9kWh, 8.6kWh for RWT, CCS, SGC and BNP respectively. This is due to the fact that hydropower is the most developed renewable energy in Cameroon, producing 73% of the electricity consumed in the country [4]. The use of biomass for power generation is not sufficiently developed in Cameroon; this explains the fact that the primary energy from biomass is only 1kWh, 1.1kWh, 0.6kWh, and 0.5 kWh for RWT, CCS, SGC and BNP respectively.

3.2. Results of economic analysis

The economic viability of the briquette production unit from CCS, RWT, SGC, and BNP was assessed. This section is devoted to the presentation of the briquette production costs, the analysis of the economic parameters, and the sensitivity analysis.

3.2.1. Costs of briquettes production

Table 5 shows the costs associated with briquette manufacture. These are the costs of purchasing inputs at each stage of the production process. The most expensive steps of production are included in this table. The raw material collecting phase of RWT's briquette manufacture is the most expensive (0.043 €/kg). The high cost is attributable to the costs of gasoil for the motorized vehicle that was used to gather the raw materials. The least expensive process is packaging. Briquetting, on the other hand, is the costliest part of the CCS's briquette manufacturing

Table 5
Manufacturing costs.

| Description | Unit | Rattan Waste | Coconut Shells | Sugarcane bagasse | Banana peels |
|-------------------|------|--------------|----------------|-------------------|--------------|
| Collection | €/kg | 0.043 | 0.04 | 0.08 | 0.16 |
| Residues drying | €/kg | 0.002 | 0.002 | 0.198 | 0.395 |
| Carbonization | €/kg | 0.021 | 0.021 | 0.037 | 0.048 |
| Crushing | €/kg | 0.021 | 0.02 | 0.012 | 0.025 |
| Mixing | €/kg | 0.042 | 0.035 | 0.028 | 0.042 |
| Briquetting | €/kg | 0.028 | 0.046 | 0.048 | 0.048 |
| Briquettes drying | €/kg | 0.052 | 0.048 | 0.158 | 0.316 |
| Packaging | €/kg | 0.012 | 0.011 | 0.018 | 0.036 |

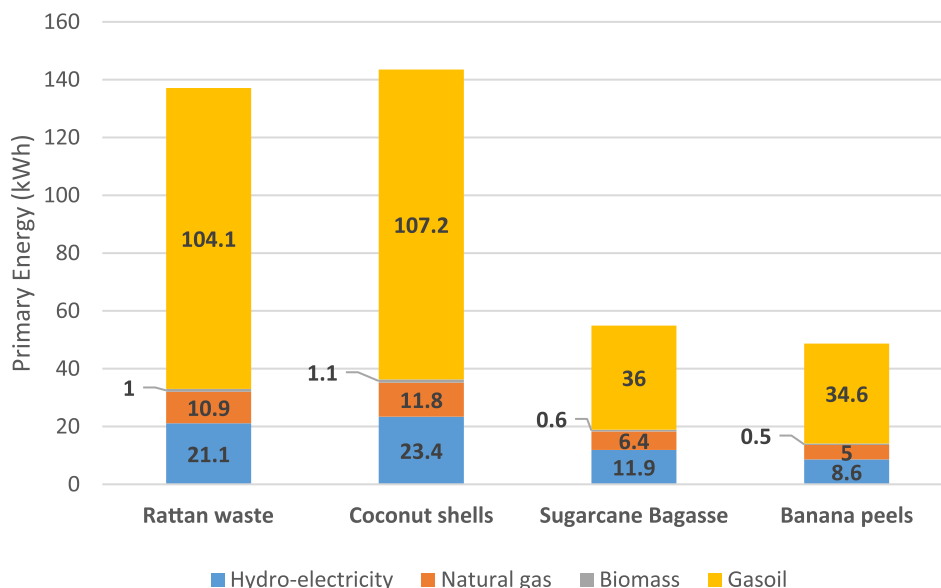


Fig. 4. Distribution of primary energy sources (kWh).

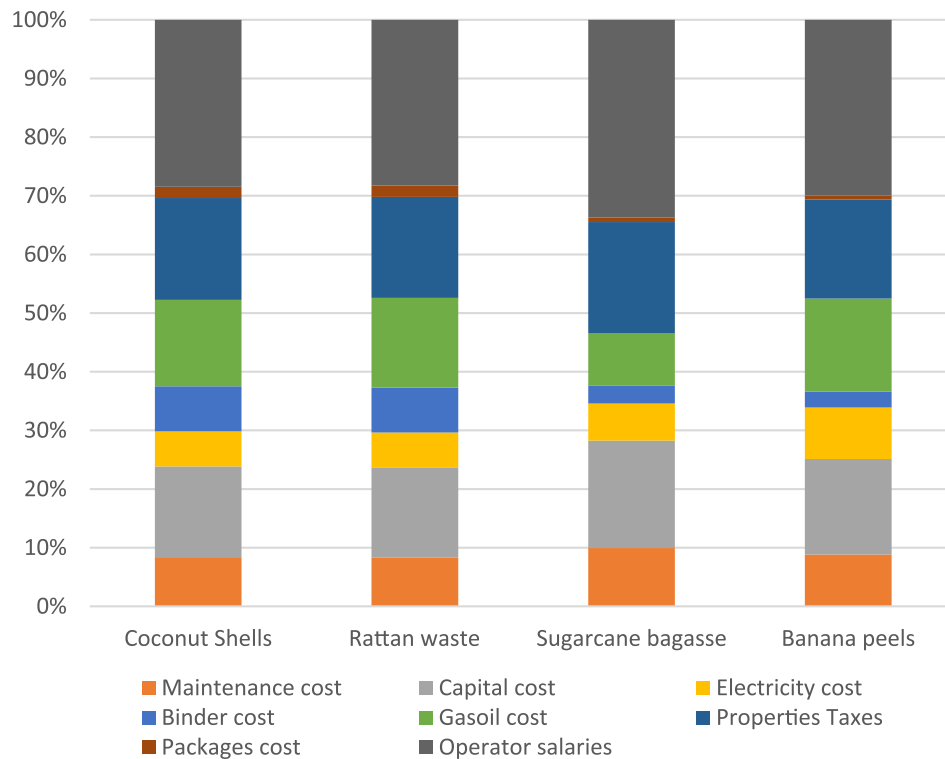


Fig. 5. Contribution of different costs to the total operating costs of the plant.

process. These costs are connected to the electrical energy used by the briquetting machine’s electric motor.

By looking at both RWT and CCS, it is easy to see that the drying phase is the least expensive because of the initial dryness of these residues. In contrast to SGC and BNP, where the costs related to drying are the highest, i.e., 0.198 €/kg and 0.395 €/kg, respectively. The crushing phase is the cheapest for the manufacture of briquettes from BNP and SGC, undoubtedly because of the less solid structure of the BNP and SGC residues, which do not require a large expense related to the payment of the electricity bill.

Fig. 5 shows the distribution of the different costs related to each

production system over 20 years. It appears that the repayment of capital expenditure (bank loan) represents 15–20%, maintenance costs are 8–10%, property taxes are 15–20%, and manufacturing costs represent between 50 and 62% of total expenditure. The manufacturing costs are mainly composed of employees’ salaries, which represent the largest financial burden (about 30% of total expenses), followed by expenses due to the supply of gasoil (10–16% of total expenses). Expenditure on the purchase of packages is the lowest.

Overall, Fig. 5 illustrates the various cost segments and their percentage of total operating costs for the four types of residues throughout the research period. It allows the most crucial elements of these systems

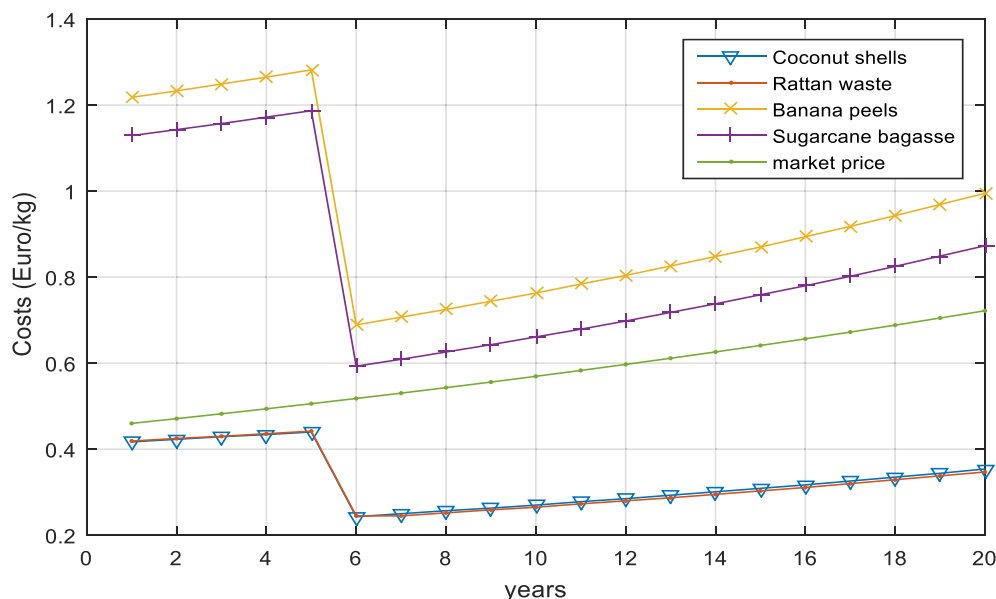


Fig. 6. Evolution of production cost of biomass briquettes.

to be identified for modifications in order to cut manufacturing costs. The specifics and prospects for cost reduction are explored in the part after a sensitivity analysis of the input factors.

Fig. 6 shows the evolution of the unit production cost of briquettes, as well as their market price. The evolution of production costs from CCS and RWT is almost identical. For all four types of briquettes, the production costs increase slightly during the first five years and then drop considerably in the sixth year. This drop in cost is probably due to the repayment of the bank loan, which ends in the fifth year. During the 20 years representing the study period, the unit production costs of briquettes from CCS and RWT remain below the market price, while the unit production costs of briquettes from BNP and SGC remain above the market price. As a consequence, the sale of BNP and SGC's briquettes will not generate a profit for the production unit.

3.2.2. Economic parameters

(Table 6) presents the economic indicators that give a clear indication of the economic viability of the production unit. The NPV of CCS and RWT is 67,189 € and 66,526 € respectively; those of SGC and BNP are -34,317 € and -44,932 € respectively. In the light of these figures, the production of CCS and RWT briquettes is profitable for the company, which is not the case for SGC and BNP. Other studies recorded in the literature mention positive NPVs for briquetting projects from other raw materials. Profitability indexes of CCS and RWT briquette production have values greater than 1, while BNP and SGC PI values are less than 1. These PI values support the conclusions drawn from the cost of production and NPV results that briquette production from CCS and RWT is economically viable, unlike BNP and SGC.

The economic viability of other residues has been demonstrated in the literature, Sengar et al. [22] calculated the NPV of cashew shell, grass, and rice husk briquettes to be \$25,831.88; \$30,117.20, and \$8,434.78, respectively. A research conducted by Hakizimana and Kim [23] yielded a net present value of \$17.2 million and validated the peat briquettes' commercialisation.

3.2.3. Sensitivity analysis

The sensitivity analysis emphasizes the small-scale plant's potential influence on the most crucial factors and points to aspects of business operations with the most ground to make up. The influencing factors in the economic feasibility of the briquette production plant include discount rate, capital cost, biomass briquette market price, and operator's salaries. A sensitivity analysis is used to evaluate the impact of these crucial elements on the Net Present Value of the briquetting systems. As shown Figs. 7-9, each factor is varied from 0 to twice of its initial value while other variables remain fixed. The discount rate is a figure subject to uncertainty; as a result, the discount rate used might have a substantial impact on the economic feasibility of an economic evaluation. As a result, a sensitivity analysis was conducted to see if variation of the discount rate may transform economically uninteresting briquetting systems into a feasible monetary investment, and vice versa.

Fig. 7: Net Present Value as a function of discount rate of the four briquetting systems.

It appears from Fig. 6 that the four production systems are sensitive to the variation of the discount rate, but this sensitivity is observed more significantly in CCS and RWT's briquette production. It can be seen from this figure that the NPV of the CCS and RWT production systems

Table 6
Economic indicators.

| Economic Parameters | Coconut Shells | Rattan Waste | Sugarcane bagasse | Banana peels |
|-----------------------|----------------|--------------|-------------------|--------------|
| Net Present Value (€) | 67,189 | 66,526 | -34,317 | -44,932 |
| Profitability Index | 2.68 | 2.66 | -1.37 | -1.79 |

decreases with an increasing discount rate but remains positive. Therefore, whatever the value of the discount rate, it is not economically viable for the company to supply the briquettes produced by BNP and SGC, because not only initial investment is never paid off, but also operating costs exceed benefits. The economic viability of CCS and RWT briquette production would be greater if the discount rate decreased, but less important if the discount rate increased.

Fig. 8 illustrates the sensitivity of the NPV to the capital cost. In the chosen range of capital cost values, all NPVs except CCS and RWT remain positive, while those of BNP and SGC are negative. The curves have a decreasing trend, and the economic viability of the four systems becomes less appealing as capital costs rise. This is certainly because it would increase the amount of loan payments to be repaid to the bank. A similar scenario was observed by Hu et al. 2014 for briquetting from corn stalks, where sensitivity analysis showed that the NPV would decrease significantly if the capital cost increased [10].

The curves can be seen to grow in Fig. 9. This reflects the fact that all four systems are economically attractive with an increasing briquette market price. The CCS and RWT systems are more susceptible to changes in the briquette market price. Economic viability is effective from a briquette price of 0.27 €/kg for CCS and RWT; a doubling of the current market value would result in a NPV of about 262,000€. While, SGC and BNP's briquette production is only economically viable at minimum selling prices above the current market price, i.e. 0.7 €/kg and 0.81 €/kg. The conclusions derived from this graph are in accordance with those of [9,10], who showed that NPV is very sensitive to market briquette price variation. The Figs. 8 and 9, in the case of SGC and BNP, show that with a government subsidy on the initial investment or/and the briquette price, the system for these two types of briquettes could become economically viable.

4. Discussion

Small-scale briquette production plants should be energy efficient and economically viable; especially in an energy-deficient developing agricultural country like Cameroon. Fuelwood represents 72.61% of total energy consumption in Cameroon, its use increase deforestation rate, climate change, and desertification [24,25]. Biomass briquettes are a prominent choice to replace it, they could be used for cooking, heating drying and others [26]. The production and utilization of briquettes is a tool for energy transition and a way to move towards sustainable development. Therefore, it deserves special attention from governments, investors, and decision makers.

The results of the energy analysis show that briquette production from CCS and RWT consumes less energy than BNP and SGC. But for the same initial amount of waste, RWT and CCS consume more fossil fuel, which has negative environmental effects. It would be eco-friendly for the production unit to adopt the use of renewable energy resources in the conversion process. For instance, the use of solar heat, which is green and free of charge, can be used during the drying phase, this will also reduce production costs. Suopajärvi and Fabritius have established that the production cost of wood charcoal is about 0.28€/kg [27]. The production costs of briquettes are slightly higher than those of charcoal, so it is necessary to explore ways of reducing them.

With limited capital, small-scale production units can only procure low-performance equipment generally manufactured with local materials. Government and investor support would enable the purchase of advanced equipment with low energy consumption in order to strictly adhere to all briquette production conditions as specified by [7]. Investments would also allow the setting up of large-scale plants for industrial production. On the other hand, sophisticated equipment would mean less maintenance and repair costs.

The market price of briquettes is the same regardless of the residues used, this has an impact on the economic profitability of the business as the minimum cost without profit of BNP and SGC briquettes is higher than the current market price and the minimum cost without profit of

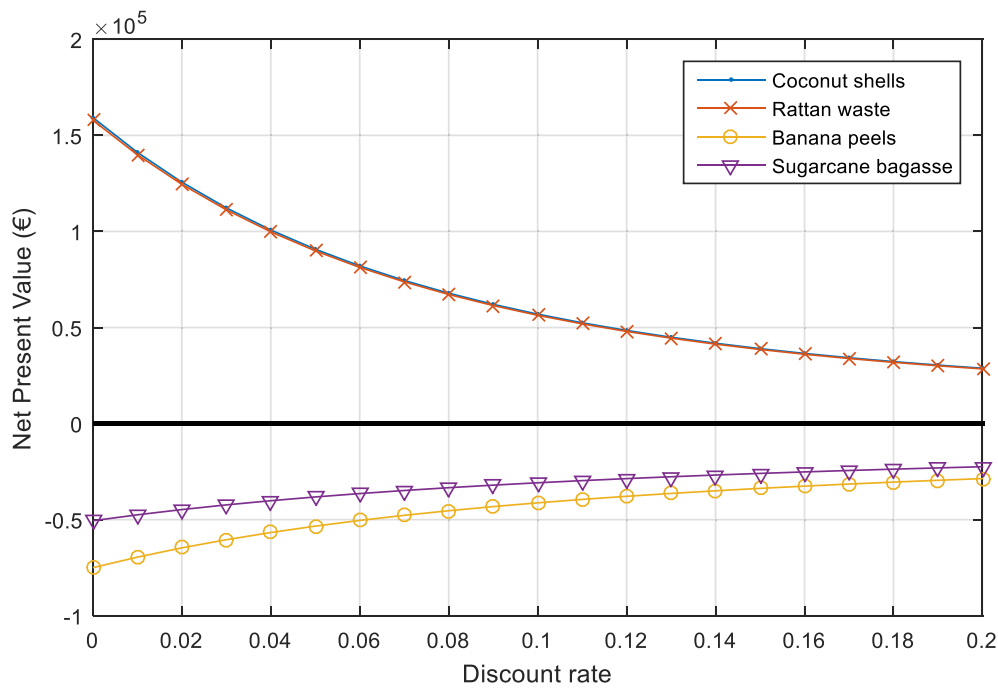


Fig. 7. Net Present Value as a function of discount rate of the four briquetting systems.

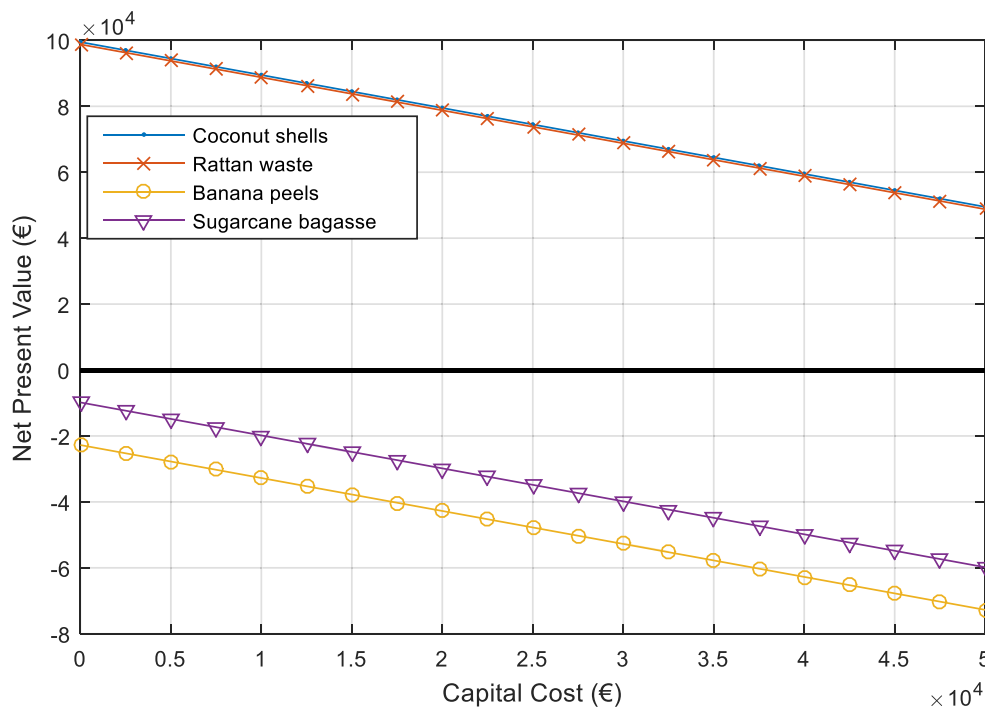


Fig. 8. Net Present Value as a function of capital cost of each briquetting system.

CCS and RWT briquettes is lower than the market price. It would be appropriate to investigate the possibility of preparing briquettes from a mixture of residues at a lower cost that could be sold at the current market price without financial losses for the company.

Since Cameroon is a country with a high agricultural potential, which implies a wide range of agricultural resources, the results of this study lead to further investigation the energy efficiency and economic profitability of producing briquettes with other agricultural residues available in Cameroon, such as palm oil shells, cocoa husk, rice stalks, corn cobs. It would also be interesting to conduct this kind of study in

other sub-Saharan countries where briquetting conversion have already been explored briquetting with residues as cashew residues in Burkina Faso [28], corncob in Nigeria [7], coffee husk and groundnut shells Uganda [29,30].

5. Conclusion

The aim of this study was to analyse the energy consumption, cost production and economic viability of briquetting process from rattan waste, coconut shells, sugar cane bagasse and banana peels in a small-

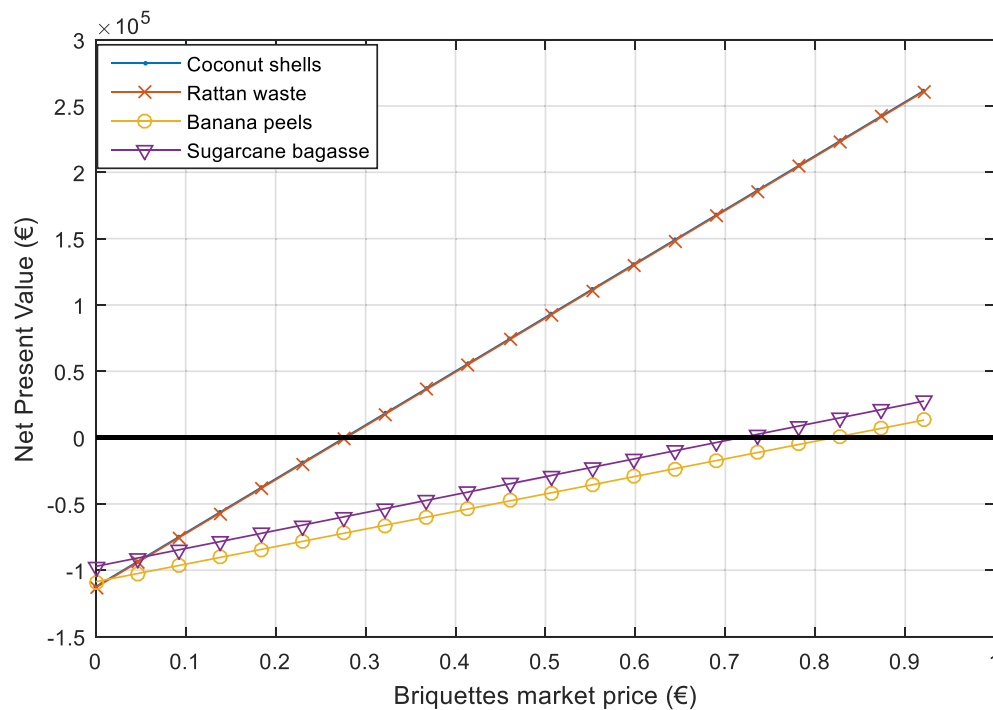


Fig. 9. Net Present Value as a function of briquette market price.

scale briquetting plant. An energy and economic analysis were conducted in a small-scale briquette production company. The results of energetic analysis show that heat and mechanical energy are the useful energy used during the manufacturing. The company used as the case study depends largely on electricity generated by gasoil, hydro, biomass and natural gas as well. The amount of primary energy required per kg of briquettes produced is 0.78 kWh/kg, 0.75 kWh/kg, 1.46 kWh/kg and 2.60 kWh/kg for rattan waste, coconut shells, sugarcane bagasse and banana peels briquettes production, respectively. The cost of briquette production was determined mainly by the reimbursement of loan bank, properties taxes, energy cost and labour cost. The financial indicators estimated are positive for 20 years' timeframe for CCS and RWT's briquettes production and negative for SGC and BNP's briquettes production. Production unit could improve its operating conditions to reduce energy consumption and production costs. The findings of this work provide the critical information to decision-makers, investors and technical operators for a great understanding concerns of biomass briquettes production. Overall, biomass briquettes from agricultural residues could offer benefit in Cameroon as in other similar developing countries.

CRediT authorship contribution statement

Bill Vaneck Bot: Writing – original draft. **Petros J. Axaopoulos:** Methodology, Writing – review & editing, Writing – original draft. **Evangelos I. Sakellariou:** Software, Writing – review & editing, Writing – original draft. **Olivier Thierry Sosso:** Supervision, Project administration. **Jean Gaston Tamba:** Supervision, Project administration.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgment

This work was carried out in the framework of the HIGHER EDUCATION – KA107 INTERNATIONAL MOBILITY project between University of Douala and University of West Attica, Athens - Greece. The authors acknowledge the European Union and the ERASMUS + Program [Agreement No 205] for support. Authors thank department of mechanical engineering of University of West Attica.

Appendix A. Supplementary material

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119430>.

References

- [1] Ezzo LJ, Kehoo Y. Energy consumption, economic growth and carbon emissions: Cointegration and causality evidence from selected African countries. *Energy* 2016; 114:492–7. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.010>.
- [2] Halder PK, Paul N, Beg MRA. Assessment of biomass energy resources and related technologies practice in Bangladesh. *Renew Sustain Energy Rev* 2014;39:444–60. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.071>.
- [3] Wirba, et al. *Renewable energy potentials in Cameroon : Prospects and challenges*. Renewable. Energy 2016.
- [4] Kidmo DK, Deli K, Bogno B. Status of renewable energy in Cameroon. *Renew Energy Environ Sustain* 2021;6:2. <https://doi.org/10.1051/rees/2021001>.
- [5] Ifa La, Yani S, Nurjannah N, Darnengsih D, Rusnaenah A, Mel M, et al. Techno-economic analysis of bio-briquette from cashew nut shell waste. *Heliyon* 2020;6 (9):e05009. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05009>.
- [6] Sharma MK, Priyank G, Sharma N. Biomass Briquette Production: A Propagation of Non-Convention Technology and Future of Pollution Free Thermal Energy Sources. *Am J Eng Res* 2015;04:44–50.
- [7] Kpalo SY, Zainuddin MF, Manaf LA, Roslan AM. A review of technical and economic aspects of biomass briquetting. *Sustain* 2020;12(11):4609. <https://doi.org/10.3390/su12114609>.
- [8] Srivastava NSL, Narnaware SL, Makwana JP, Singh SN, Vahora S. Investigating the energy use of vegetable market waste by briquetting. *Renew Energy* 2014;68: 270–5. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.01.047>.
- [9] Feng C, Yu X, Tan H, Liu T, Hu T, Zhang Z, et al. The economic feasibility of a crop-residue densification plant: A case study for the city of Jinzhou in China. *Renew Sustain Energy Rev* 2013;24:172–80. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.036>.
- [10] Hu J, Lei T, Wang Z, Yan X, Shi X, Li Z, et al. Economic, environmental and social assessment of briquette fuel from agricultural residues in China - A study on flat die

- briquetting using corn stalk. *Energy* 2014;64:557–66. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.10.028>.
- [11] Stolarski MJ, Szczukowski S, Tworkowski J, Krzyzaniak M, Gulczyński P, Mleczek M. Comparison of quality and production cost of briquettes made from agricultural and forest origin biomass. *Renew Energy* 2013;57:20–6. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.01.005>.
- [12] Sahoo K, Bilek E, Bergman R, Mani S. Techno-economic analysis of producing solid biofuels and biochar from forest residues using portable systems. *Appl Energy* 2019;235:578–90. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.10.076>.
- [13] Bot BV, Sosso OT, Tamba JG, Lekane E, Bikai J, Ndame MK. Preparation and characterization of biomass briquettes made from banana peels, sugarcane bagasse, coconut shells and rattan waste. *Biomass Convers Biorefinery* 2021. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01762-w>.
- [14] INS. Agriculture. Annuaire statistique. Chapitre 13. 2017.
- [15] Ferreira da Silva I, Reis Fontinelle Souto L, Collins SRA, Elliston A, de Queiroz JH, Waldron KW. Impact of Hot Water and Alkaline Pre-treatments in Cellulosic Ethanol Production from Banana Pseudostem. *Bioenergy Res* 2020;13(4):1159–70. <https://doi.org/10.1007/s12155-020-10123-w>.
- [16] Bilandzija N, Voca N, Jelcic B, Jurisic V, Matin A, Grubor M, et al. Evaluation of Croatian agricultural solid biomass energy potential. *Renew Sustain Energy Rev* 2018;93:225–30. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.040>.
- [17] Dionísio SR, Santoro DCJ, Bonan CIDG, Soares LB, Biazzi LE, Rabelo SC, et al. Second-generation ethanol process for integral use of hemicellulosic and cellulosic hydrolysates from diluted sulfuric acid pretreatment of sugarcane bagasse. *Fuel* 2021;304:121290. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121290>.
- [18] Omar Z, Fatah FA. Unravelling the factors affecting agriculture profitability enterprise: Evidence from coconut smallholder production. *Accounting* 2020;6: 493–500. <https://doi.org/10.5267/j.ac.2020.4.009>.
- [19] Gupta A, Sharma R, Sharma S. Chapter 21. Almond. 2020.
- [20] Bot BV, Gaston J, Olivier T, Sosso T, Pascal M. Assessment of biomass briquette energy potential from agricultural residues in Cameroon. *Biomass Convers Biorefinery* 2022. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02388-2>.
- [21] Hamid MF, Idroas MY, Ishak MZ, Zainal Alauddin ZA, Miskam MA, Abdullah MK. An experimental study of briquetting process of torrefied rubber seed kernel and palm oil shell. *Biomed Res Int* 2016;2016:3–5. <https://doi.org/10.1155/2016/1679734>.
- [22] Sengar SH, Patil SSA, Chendake D. Economic Feasibility of Briquetted Fuel. *Glob J Res Eng Chem Eng* 2013;13:21–6.
- [23] Hakizimana J de DK, Kim HT. Peat briquette as an alternative to cooking fuel: A techno-economic viability assessment in Rwanda. *Energy* 2016;102:453–64. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.02.073>.
- [24] Tchata G. Cameroun – Contribution à la Préparation du Rapport National pour la Formulation du Livre Blanc Régional sur l'Accès Universel aux Services Énergétiques Intégrant le Développement des Énergies Renouvelables et de l'Efficacité Énergétique. Cameroon 2014:1–245.
- [25] Tamba JG. An analysis of Cameroon ' s energetic system, 2001–2010. *Energy Sources, Part B Econ Planning, Policy* 2017;12(3):216–22. <https://doi.org/10.1080/15567249.2015.1060547>.
- [26] Kumar A, Kumar N, Baredar P, Shukla A. A review on biomass energy resources, potential, conversion and policy in India. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;45: 530–9. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.007>.
- [27] Suopajärvi H, Fabritius T. Towards more sustainable ironmaking-an analysis of energy wood availability in finland and the economics of charcoal production. *Sustain* 2013;5:1188–207. <https://doi.org/10.3390/su5031188>.
- [28] Sawadogo M, Tchini Tanoh S, Sidibé S, Kpai N, Tankoano I. Cleaner production in Burkina Faso: Case study of fuel briquettes made from cashew industry waste. *J Clean Prod* 2018;195:1047–56. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.261>.
- [29] Lubwama M, Yiga VA. Characteristics of briquettes developed from rice and coffee husks for domestic cooking applications in Uganda. *Renew Energy* 2018;118: 43–55.
- [30] Lubwama M, Yiga VA. Development of groundnut shells and bagasse briquettes as sustainable fuel sources for domestic cooking applications in Uganda. *Renew Energy* 2017;111:532–42. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.041>.



Economic analysis of biomass briquettes made from coconut shells, rattan waste, banana peels and sugarcane bagasse in households cooking

Bill Vaneck Bot^{1,2} · Petros J. Axaopoulos² · Olivier Thierry Sosso³ · Evangelos I. Sakellariou² · Jean Gaston Tamba⁴

Received: 15 March 2022 / Accepted: 15 May 2022

© The Author(s), under exclusive licence to Islamic Azad University 2022

Abstract

The aim of this study is to analyse the economic viability of cooking biomass briquettes made from coconut shells, rattan waste, banana peels, and sugarcane bagasse by replacing conventional fuels such as fuelwood, charcoal and Liquefied Petroleum Gas (LPG). The life cycle cost method and the sensitivity analysis based on a 10-year lifetime are applied to a typical Cameroonian household with an annual cooking energy requirement of 950 kWh. According to the results, briquettes made from coconut shells have the lowest life cycle cost (384.6€), while those made from banana peels have the highest cost (729.6€). The fuelwood replacement has the highest present value of net benefit. Among the three conventional fuels investigated, wood charcoal is the cheapest. Changes in the price of conventional fuels and the market discount rate affect the economic feasibility of biomass briquettes. With the exception of the banana peel briquettes, briquettes are more cost-effective than fuelwood, wood charcoal and Liquefied Petroleum Gas. Decision makers should consider ways to include massive household use of biomass briquettes in sustainable development because they could be a leading mover in sustainable development.

Keywords Economic analysis · Biomass briquettes · Conventional fuels · Life Cycle Cost · Sensitivity analysis

List of symbols

| | |
|--------|--------------------------------|
| CCS | Coconut shells |
| PV_T | Present Value at the year T, € |
| RWT | Rattan waste |
| d | Discount rate, % |

| | |
|--------------|---|
| BNP | Banana peels |
| E_d | Energy demand, kWh |
| SGC | Sugarcane bagasse |
| AC_T | Annual cash flow at the year T, € |
| IEA | International Energy Agency |
| FC | Fuel Cost, €/kwh |
| WHO | World Health Organization |
| INV | Initial investment cost, € |
| LPG | Liquefied Petroleum Gas |
| i | Fuel cost inflation rate, % |
| PVNB | Present Value of Net Benefit, € |
| j | Maintenance cost inflation rate, % |
| LCC | Life Cycle Cost, € |
| PV_T | Present Value at the year T, € |
| LCC_{conv} | Life Cycle Cost of conventional fuel, € |
| d | Discount rate, % |
| LCC_{bio} | Life Cycle Cost of biomass briquette, € |
| MC | Maintenance cost, € |
| kWh | Kilowatt-hour |
| kWh_t | Kilowatt-hour thermal |

✉ Bill Vaneck Bot
bbillvaneck@yahoo.fr

Jean Gaston Tamba
tambajea@gmail.com

- ¹ Laboratory of Energy, Materials, Modelling and Methods, Higher National Polytechnic School, University of Douala, PO Box, 2701 Douala, Cameroon
- ² Department of Mechanical Engineering, University of West Attica, Campus II, Thivon 250, 12241 Aegaleo, Athens, Greece
- ³ Laboratory of Thermal and Environment, Advanced Teacher's Training College for Technical Education, University of Douala-Cameroon, PO Box 1872, Douala, Cameroon
- ⁴ Department of Thermal and Energy Engineering, University Institute of Technology, University of Douala, PO Box, 2701 Douala, Cameroon



Introduction

Energy plays a crucial role in a country's quality of life. The energy consumption pattern of any country is an indicator of its socio-economic status [1]. The International Energy Agency (IEA) estimates that the increase in global energy consumption will reach about 34% between 2012 and 2035 [2]. Conventional non-renewable energy (gas, oil, coal) is the main source of energy in the world; it accounts for over 2/3 of the world's energy consumption [1].

Household cooking is one way to use energy in developing countries. This need is usually met by direct burning of wood and its by-products. The use of wood energy (firewood, wood char, sawdust, and wood chips) for cooking and heating contributes to more than 80% of the energy supply in Africa in general [3]. The inappropriate usage of wood fuel has a wide range of negative environmental and health consequences [4, 5]. Forest depletion, environmental damage and health repercussions are just a few of the negative outcomes. According to the World Health Organization (WHO), olfactory ailments, respiratory disorders such as pneumonia, chronic bronchitis and even cancer are caused by women and children inhaling combustion pollution [6, 7]. There is a strong need to look into new affordable and sustainable cooking fuels for households.

Because of its wide availability and huge potential in Cameroon, as in many developing countries, agricultural biomass could be a prominent source of sustainable energy [8]. The conversion of biomass to energy can be conducted in a variety of methods [9], but a lot of findings state that there are many advantages to produce biomass briquettes for household cooking purposes using agricultural crops residues as feedstock [10]–[13]. The process of biomass briquette making goes through several stages, namely: drying, carbonising or slow pyrolysis, grinding, mixing with the addition of a binder, pressing and finally drying of the briquettes [11]. Residues are improved by briquetting, which makes transportation, storage, feeding into furnaces, and burning easier [10]–[15]. Briquettes may be burnt in a clean, smokeless way with no adverse effects on the eyes or lungs. *Guo* et al. established that the combustion of briquettes releases pollutants in small quantities [16]. Previous characterisation studies have shown that briquettes have good energy characteristics comparable to conventional fuels used in households [9, 11]–[13, 17, 18]. Other researchers have found that briquettes can be produced economically depending on the availability of biomass, capital costs, and the briquetting technology used [19]–[21]. As far as the author's knowledge, there is no scientific study documented in the literature dealing with economic analysis of biomass briquettes use in households

for cooking purposes. And yet, the choice of fuel by users depends not only on its energy performance and its environmental friendliness, but also and mainly on its cost and the financial consumer's resources.

Like most sub-Saharan countries, Cameroon is a developing country. According to a survey conducted by the National Institute of Statistics, 7.5 million Cameroonians are living below the poverty line; these are people with less than 1.42€ per day [22]. In this economic background, given that cooking expenses account for a large portion of overall household spending [23]; it is important to investigate new ways in order to limit household expenses while at the same time ensuring a healthier way of the cooking. Energy wood, kerosene, Liquefied Petroleum Gas and electricity are the main sources of energy used in Cameroonian households. Among these energy sources, energy wood accounts for the largest share (fuelwood represents 91%, wood charcoal 2%) of total energy consumption in households, whereas Liquefied Petroleum Gas (LPG), with increasing consumption, is the least important, accounting for only 1.5% of total energy used in households [24].

This paper is a contribution to the study of briquettes, investigating their economic viability. It analyses the benefits of substituting conventional fuels (LPG, fuelwood and wood charcoal) with briquettes made from coconut shells, rattan waste, banana peels and sugarcane bagasse in a typical Cameroonian household. For this analysis, the Life Cycle Cost (LCC) method with sensitivity analysis is applied in order to determine whether using briquettes generated from selected biomass is a cost-effective option for consumers. The sensitivity analysis applied in this research tries to include uncertainty into the economic evaluation by assessing how some fuel operating variables could affect the economic profitability of briquette adoption. Briquettes made from coconut shells, rattan waste, banana peels and sugarcane bagasse were chosen in this study because of the availability of biomass in Cameroon and their recent investigation studies [11, 23].

This research intends to analyse the economic feasibility of the biomass briquette systems, which is a necessary step in implementing the sustainable proposed fuels into the Cameroonian household. The objectives are to assess the Present Values of Net Benefit of replacing household conventional cooking fuel by biomass briquettes and analyse the economic sensibility of the use of these briquettes.

Methodology

The current research was carried out in Douala, Cameroon, on a single family of five people. Cameroon is a central African country situated between 2° and 13° North latitude and between 8° and 16° East longitude at the bottom of the

Gulf of Guinea. The goal of the economic study undertaken in Cameroon is to compare the proposed household cooking biomass briquettes system (coconut shells, rattan waste, banana peels and sugarcane bagasse) to the traditional cooking system (fuelwood, wood charcoal and LPG). Both systems have the same goal: to meet the dwelling’s yearly space cooking requirements.

Household cooking in cameroon

Fuelwood, wood charcoal and LPG are the three cooking fuel mainly used in Cameroon [24] (as illustrated in supplementary materials). Fuelwood is usually burned in a traditional 3-stone fire because of its affordable cooking system in use. There is no need to pay for it; it is constructed up of three similar-sized stones on which a cooking kettle is placed over a fire [25]. The common cook stoves used for charcoal burning cost an average of 10 € in the Cameroonian market. The LPG is burned in a gas-fired cook stove consists a pressurised gas from a gas cylinder passes through the regulator and hosepipe on its way to the command button. The rechargeable gas cylinder is sold on the local market at an approximate price of 35 €, the gas plate at 25 € and a 12.5 kg gas recharge costs about 10 €. Biomass briquettes production in Cameroon is described by [11, 26]. No specific study on the use of briquettes has been carried out in Cameroon, but there are some small private companies that produce briquettes from coconut shells, rattan waste, banana peels and sugarcane bagasse and sell them at 0.46€ per kilogram. It is recommended to use these briquettes with the improved cook stove.

Life cycle cost and sensitivity analysis

The span of the economic analysis is chosen to be 10 years for the period 2020–2030, which is substantial period to present the economics of the systems from the period which this work is carried out and on. This appears enough to offer conclusions for the systems, given that energy policy throughout the world is constantly changing, and the longer term might result in inevitable profound uncertainty and a quarry is developing. The cost of using biomass briquettes generated from coconut shells, banana peels, sugarcane bagasse and rattan waste

in an upgraded furnace was compared to the cost of using conventional cooking systems. The LCC method was used in the economic analysis, and the parameters for the calculation approach may be found in the following section.

The LCC approach was used to compare the systems in terms of cost. The LCC method calculates the present value of the entire cost of the system by factoring in energy, maintenance and capital costs. It was assumed that neither system was financed by a bank loan because of the relatively low cost of the equipment required, and local banks generally only provide loans of 100 € or more. As a result, the system with the lowest LCC is the most effective. So, no probabilistic technique is employed in this work; therefore, no randomness is taken into account, as this is common practice for such evaluations [27, 28].

In order to calculate the LCC of each system, the value of the current Annual Cash flow (AC_T) was estimated first, for each simulation year (T), using equation [27, 28]:

$$AC_T = E_d FC(1 + i)^{T-1} + MC(1 + j)^{T-1} + INV \tag{1}$$

E_d is annual energy household demand for cooking (kWh) the energy requirements for an average household which may be estimated at 950 kWh/year [29], FC is fuel cost per unit (€/kWh), MC is maintenance cost (€), INV is the initial investment cost (€), i is the fuel cost inflation rate, and j is the maintenance cost inflation rate.

The present value PV_T , with a market discount rate of d , at the end of year T is calculated via Eq. 2:

$$PV_T = \frac{AC_T}{(1 + d)^T} \tag{2}$$

The LCC in both cases was estimated by summing the ten Present Values (Eq. 3):

$$LCC = \sum_{T=1}^{T=10} PV_T \tag{3}$$

Finally, $PV_{\text{of Net Benefit}}$ is

$$PV_{\text{of Net Benefit}} = LCC_{\text{conv}} - LCC_{\text{bio}} \tag{4}$$

where LCC_{conv} is the Life Cycle Cost of conventional cooking fuel and LCC_{bio} is the Life Cycle Cost of biomass

Table 1 Calorific value and local market price of fuel investigated [11]

| | Biomass briquettes | | | | Convectional fuels | | |
|--------------------------|--------------------|--------------|--------------|-------------------|--------------------|----------|---------------|
| | Coconut shells | Rattan waste | Banana peels | Sugarcane bagasse | LPG | Fuelwood | Wood charcoal |
| Calorific value (kWh/kg) | 8.34 | 8.92 | 4.67 | 7.19 | 12.64 | 5.08 | 8.33 |
| Price (€/kg) | 0.46 | 0.46 | 0.46 | 0.46 | 0.79 | 0.30 | 0.54 |

briquettes. Table 1 shows the calorific values and local market prices of fuels investigated. Calorific values of biomass briquettes were carried out by Bot et al. [11], and Table 2 illustrates all the parameters used for the economic analysis of the systems.

The sensitivity analysis was conducted in order include uncertainty into the economic assessment by analysing how some input factors could affect the economic viability of biomass briquette cooking use. A simulation of Present Value of Net Benefit was carried out by varying some fuel operating variables such as the discount rate, the cost of fuel and the cost of biomass system, while keeping fixed the remaining system.

Results and Discussion

This section presents the results of the economic analysis, for the replacement of conventional fuels with briquettes made from coconut shells, rattan waste, banana peels and sugarcane bagasse in a typical Cameroonian household with an annual cooking energy demand of 950 kWh_t.

Present value of net benefit analysis

Figure 1 presents life cycle costs for the investigated fuels. It can be observed that fuelwood has the highest LCC among conventional fuels, followed by LPG (566€). Among the biomass briquettes investigated, banana peels had the highest LCC (729.6€), followed by sugarcane bagasse (480.2€). This means that households using fuelwood spend more money compared to other investigated fuels and would make a lot of profit by adopting briquettes made from coconut shells briquettes.

Table 2 Parameters of economic analysis [29]–[31]

| Parameters | Values |
|--|--------|
| Cost of briquettes from Rattan waste (€/kWh) | 0.055 |
| Cost of briquettes from banana peels (€/kWh) | 0.098 |
| Cost of briquettes from sugarcane bagasse (€/kWh) | 0.064 |
| Cost of briquettes from coconut shells (€/kWh) | 0.051 |
| Cost of LPG (€/kWh) | 0.063 |
| Cost of fuelwood (€/kWh) | 0.12 |
| Cost of wood charcoal (€/kWh) | 0.065 |
| Annual energy demand for cooking (kWh _t) | 950 |
| Cook stove cost for wood charcoal (€) | 10 |
| Cook stove cost for biomass briquettes (€) | 10 |
| LPG cylinder and cook stove cost (€) | 60 |
| Maintenance cost of LPG cook stove (€) | 5 |
| Inflation rate of maintenance cost (%) | 5 |
| Inflation rate of fuel cost (%) | 2.4 |

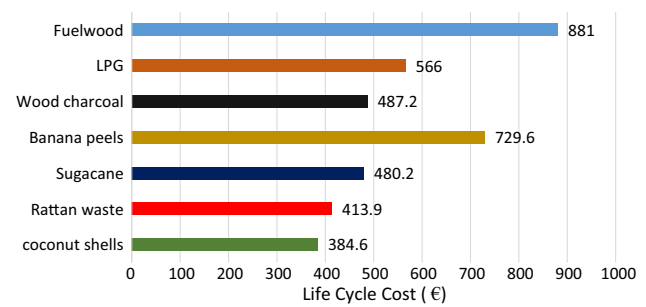


Fig. 1 Life Cycle Cost of fuels

Table 3 shows the PVNB (Present Values of Net Benefit) of briquettes from the four types of residues for the replacement of three conventional cooking systems. It is clear that the use of biomass briquettes is economically superior to the three conventional fuels, with the exception of the banana peels briquettes which is not cost-effective compared to wood charcoal and LPG. It appears there are two negatives PVNB, -242.4 € and -198.6 €; these are the PVNB for the replacement of wood charcoal and LPG by briquettes made from banana peels, respectively. This means that it is not economically viable for a household using wood charcoal or LPG to replace it with banana peels briquettes. Although banana peels briquettes offer economic viability as a replacement for fuelwood, they have the lowest PVNB of the other three biomass fuels. This is probably due to its high cost (0.098€/kWh) compared to the other biomass briquettes (Table 2).

Also, the fuelwood replacement offers the highest PVNB, which is explained by its high cost (0.12€/kWh). The economic profitability of fuelwood replacement is in addition to the energy, environmental and health disadvantages of its use. The integration of briquettes made from coconuts shells offers the highest PVNB especially for fuelwood. This is due to its low price (0.051€/kWh). Among the three conventional fuels, LPG is the cheapest market price, but it has less economic advantages than wood charcoal because of the costs of purchasing and maintaining the LPG cook stove. Although the use of fuelwood does not require a special cook stove, the biggest economic benefit is the use of briquettes against fuel wood. This is caused by its high unit cost of all the fuels on which the study is based. Fuelwood is the most

Table 3 PV of Net Benefit Value (€)

| | Wood charcoal | LPG | Fuelwood |
|-------------------|---------------|--------|----------|
| Banana peels | -242.4 | -198.6 | 151.4 |
| Sugarcane bagasse | 7 | 50.8 | 400.8 |
| Rattan waste | 73.3 | 117.1 | 467.1 |
| Coconut shells | 102.6 | 146.4 | 496.4 |



expensive (more than double the cost of RWT and CCS). Overall, it is cost-effective for a household to replace its conventional cooking systems with biomass systems. These economic benefits are in addition to the energy and environmental benefits of reducing the use of these conventional fuels, which have previously been demonstrated [12, 13]. As said earlier, fuelwood represents 91% of the household cooking energy used in Cameroon. The findings of the present study show that households would benefit from substituting fuelwood with briquettes. The biggest economic benefit is the use of briquettes against fuel wood. This economic disadvantage of using fuelwood in households is besides the environmental inconvenience (deforestation, emission of pollutants) and health inconvenience (development of respiratory and lung diseases caused by inhalation of gases from burning fuelwood) [16, 17].

Sensitivity analysis

For each cooking fuel examined, a sensitivity analysis is presented to show the effect of discount rate, conventional

fuel cost and capital cost on the Present Value of Net Benefit for the biomass briquettes. Figure 2 (a–d) shows the PVNB of CCS, RWT, BNP and SGC briquettes, respectively, at discount rates ranging from 0 to 20%. The highlighted line of 0 means that the biomass briquettes and conventional fuel are equal, the values above the line 0 mean the use of biomass briquettes is economic, and the negatives value mean the use of conventional fuels for household cooking is economic. This range is large enough to include the most commonly used discount rate. The figure illustrates that briquettes made using CCS are the most cost-effective of the four investigated; the PVNB values are about 300 €, 100 € and 70 € for fuelwood, LPG and wood charcoal, respectively, when the discount rate is assumed to be at a maximum of 20%. From these diagrams, it is clear that the briquettes of studied biomass, except that of BNP, are improved economies for the whole range of discount rate values. BNP is economically superior only to fuel wood (Fig. 2c). This is certainly because, among the selected briquettes, those made from BNP have the highest cost (0.098 €/kWh); and fuelwood is more expensive than BNP. Also, from Fig. 2d, it appears

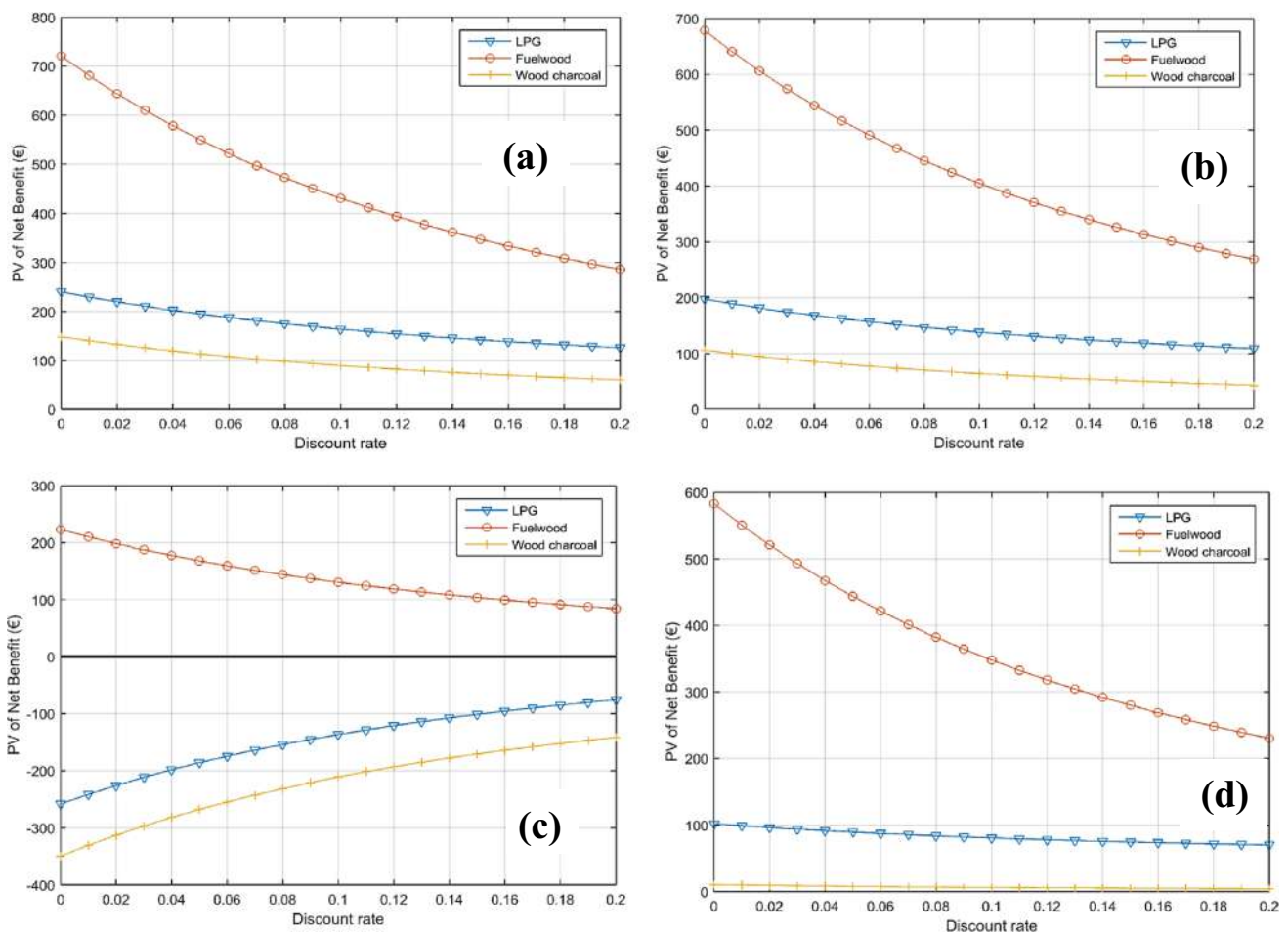


Fig. 2 PVNB for CCS (a) RWT (b) PBN (c) SGC (d) briquettes replacing conventional fuel as a function of discount rate

that the economic advantage of SGC over wood charcoal is marginal. This is mainly due to the fact that not only the cost of briquettes made from SGC and wood charcoal are very close (0.064 €/kWh and 0.065 €/kWh respectively), but also the use of both fuels requires cook stoves of the same cost.

Figure 3 (a–d) shows the economic viability of CCS, RWT, PBN and SGC briquettes at various initial investment costs, up to twice their current cost. As can be seen from these diagrams, the change in the values of the investment cost does not significantly affect the economy of the biomass briquettes. The reason for this is that the cook stoves used for burning briquettes are cheap, do not require special maintenance, and therefore represent only a very small portion of the expenses associated with the annual cost of the purchase of briquettes. BNP is also presented here (Fig. 3c), as economically disadvantaged compared to LPG and wood charcoal, due to the high cost of the briquette made from banana. The economy of wood charcoal versus SGC (Fig. 3d), appears to be marginal when the values of

the initial investment are about to double. The reason is that its slightly lower price (0.064 €/kWh) than wood charcoal (0.065 €/kWh) allows it to be marginally superior, even after doubling its initial investment cost.

Because of their high costs and the expense of their cook stoves, green fuels are rarely employed in Sub-Saharan Africa. Many households are unwilling to adopt the right cook stove to use green fuel. The main reason for the hesitance to adopt new stoves is the large investment required [32]. However, some households cooking with wood charcoal already use the improved cook stove recommended for briquettes. Substituting wood charcoal with briquettes will not require the purchase of an additional cook stove. In any case, because of the relatively low cost of the biomass briquettes cook stove, the economic profitability of using briquettes does not depend on the cost of this cook stove.

It is useful to study the economic viability of the biomass briquettes at different conventional fuel prices. From Figs. 4, 5 and 6, it can be seen that the economic viability

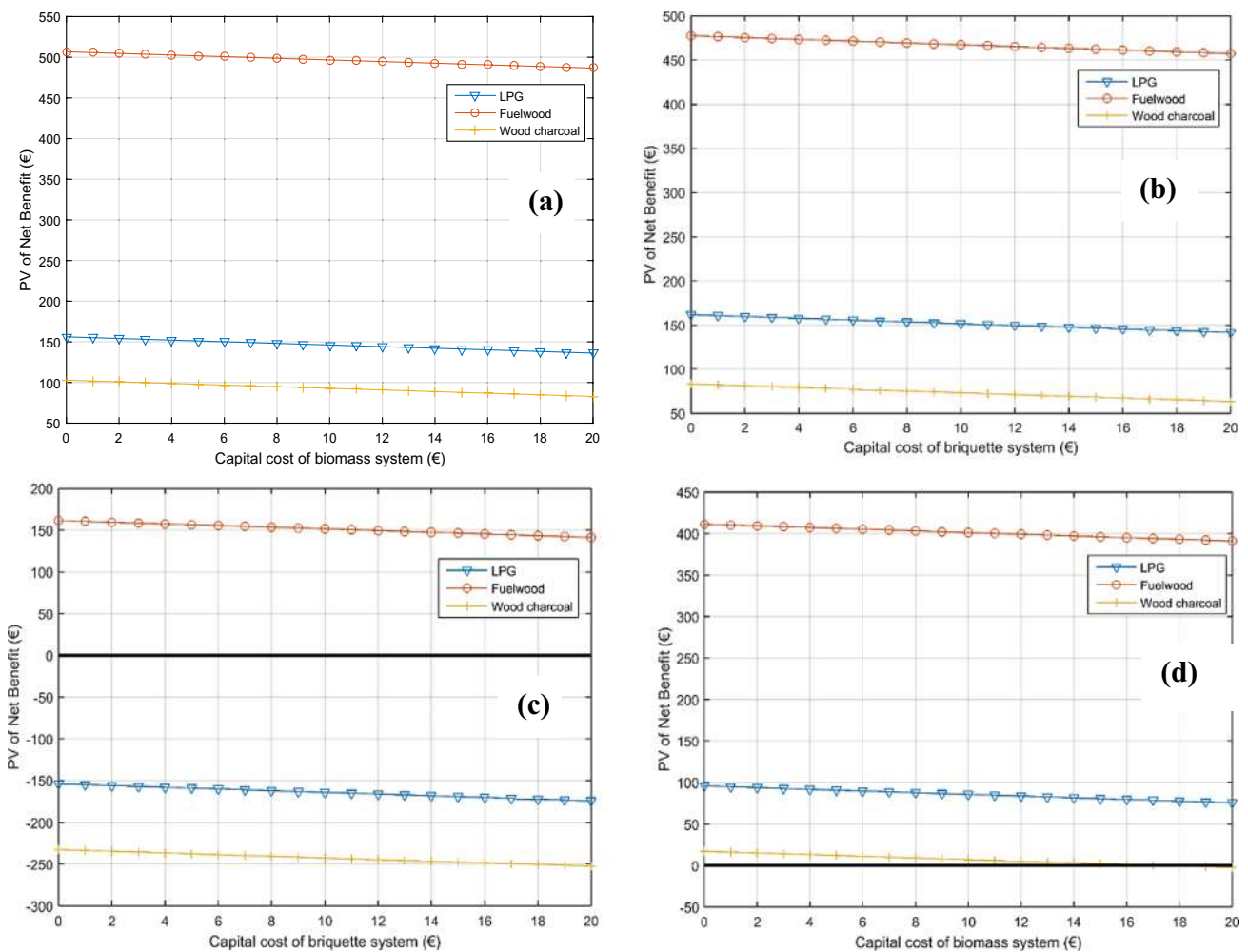


Fig. 3 PVNB for CCS (a) RWT (b) PBN (c) SGC (d) briquettes replacing conventional fuel as a function of briquettes system cost

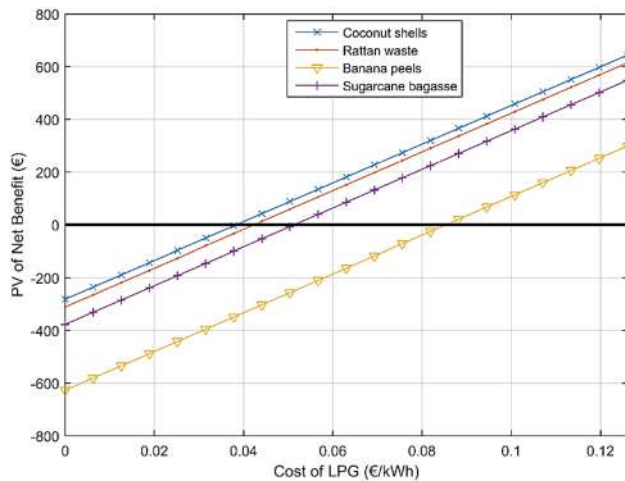


Fig. 4 PVNB for LPG replacing as a function of LPG cost

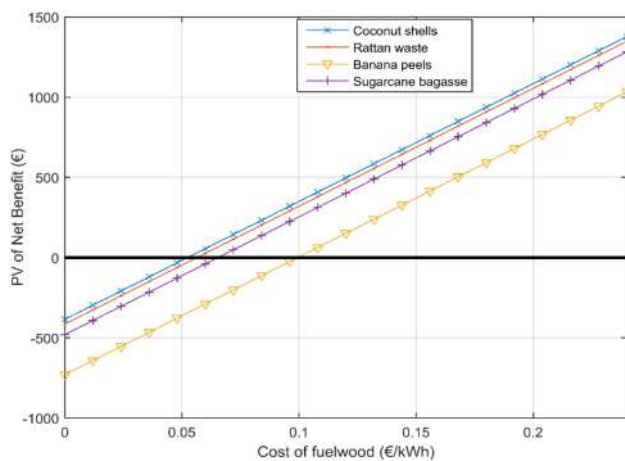


Fig. 5 PVNB for fuelwood replacing as a function of fuelwood cost

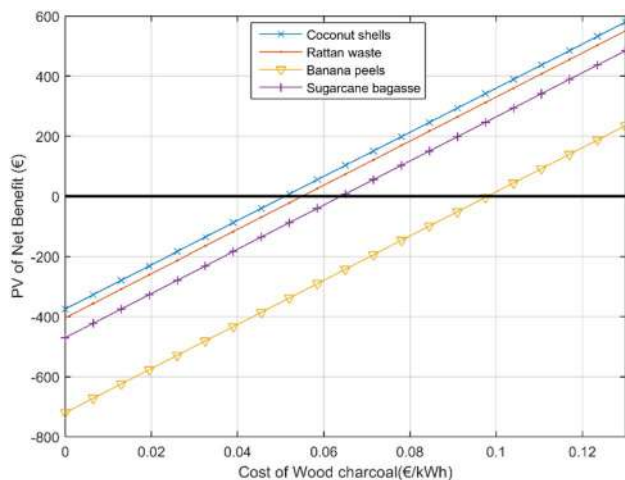


Fig. 6 PVNB for wood charcoal replacing as a function of wood charcoal cost

of biomass briquettes is sensitive to changes in the prices of conventional fuels, and in fact, these systems appear to be uneconomic at very low conventional fuels prices. These diagrams also show that at current conventional fuel prices, biomass briquettes appear to be economically viable, other than that of BNB. Indeed, with current LPG (Fig. 4) and wood charcoal prices, BNP is not economical. It is also interesting to see that in Fig. 6, the current value of the charcoal intersects the SGC line, at a point just above the horizontal axis (PVNB = 0). This means that the economy of SGC is marginal. Bananas are one of the main agricultural products in the world, particularly in Cameroon [33], and their consumption generates waste, including peels.

Poor information or lack of knowledge by consumers could complicate the adoption of biomass briquettes in sub-Saharan Africa. To increase the use of briquettes, it is necessary to raise awareness of their existence and interest in their use. If a large part of the population adopts this fuel, even in urban areas, the Cameroonian government will make savings associated with the importation of LPG.

Figures 4 and 6 show that with a governmental subsidy for the production of briquettes from banana peels, it could become economically viable compared to LPG and wood charcoal. There may be a need to improve the current practice of combusting biomass briquettes by introducing locally designed and built cook stoves. By doing so, the efficiency of combustion can be improved significantly, and fewer bio-fuels will be required for cooking. Any solution to the household's energy issue in Sub-Saharan Africa would necessitate the direct participation and efforts of national governments, non-governmental organisations and other organisations. Many other sub-Saharan governments could investigate ways of integrating biomass briquettes into their policies. According to a household survey in Tanzania, the dominant fuel for cooking is wood charcoal. Given to this survey, some households do not use some cooking fuels because of their high cost and the poor quality of the smoke produced during combustion [34]. In Ghana, a study showed that the use of fuelwood is associated with problems such as bad odour, smoke and slow cooking [35]. According to *Adama Sana et al.*, in Ouagadougou-Burkina Faso, the choice of fuel is influenced by the socio-economic status of the family, and the most predominant fuel is wood [36]. In South Africa, *Uhunamure et al.*, concluded that consumer income plays a major role in fuel choice [37]. Based on the findings of these previous studies, the adoption of biomass briquettes may be a promising choice for households. The results of this study should challenge decision makers and the government to invest in briquette production so that production is higher and briquettes are widely available and sold at a lower price. As a result, if the government and decision makers invest in the manufacture of eco-friendly briquettes, it will have further environmental, economic and social benefits,

namely: (1) limitation of deforestation due to fuelwood use, (2) reduction in pollutant emissions due to fuelwood burning, (3) preservation of the health of fuelwood users, (4) the technology of briquette production will be improved and the briquettes will have a better energy performance, (5) briquettes will be marketed at a lower price, due to their mass production, (6) socially, a significant number of new jobs will be created in this sector and (7) the government will reduce its imports of LPG since household cooking energy required purpose can be supplied locally.

Conclusion

This paper examined the economic viability of adopting briquettes made from CCS, RWT, BNP and SGC instead of fuelwood, wood charcoal and LPG traditionally used in Cameroonian households. Among conventional fuels, fuel wood has the highest LCC (881€); on the other hand, BNP briquettes has the highest LCC (729.6 €). BNP briquettes are the least cost-effective because of the negative PVNB—242.4 € and—198.6 € for replacing wood charcoal and LPG, respectively. From the findings of the analysis performed by the LCC method and sensitivity analysis, it is concluded that briquettes are cost-effective for the replacement of conventional fuels, particularly fuelwood. Using briquettes can also be beneficial to the Cameroonian government, as well as to any developing country with large agricultural potential. Further work could focus on economic analysis of the briquettes made from other raw materials or a survey of Cameroonian households to obtain their views on the use of briquettes.

Acknowledgements This work was carried out in the framework of the HIGHER EDUCATION—KA107 INTERNATIONAL MOBILITY project between University of Douala and University of West Attica, Athens, Greece. The authors acknowledge the European Union and the ERASMUS + Program [Agreement No 205] for support. Authors thank department of mechanical engineering of University of West Attica.

Author contributions BVB involved in conceptualisation and writing original draft; PJA involved in methodology and review and editing original draft; OTS involved in software and visualisation; EIS involved in review and editing original draft; and JGT involved in supervision and project administration.

Declarations

Conflict of interest The authors declare no competing interests.

References

- Halder, P.K., Paul, N., Beg, M.R.A.: Assessment of biomass energy resources and related technologies practice in Bangladesh. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **39**, 444–460 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.071>
- Wirba et al. “Renewable energy potentials in Cameroon : Prospects and challenges .,” *Renwable Energy*, 2016.
- E. Atyi et al., “Étude de l’importance économique et sociale du secteur forestier et faunique au Cameroun: Rapport final,” 2013.
- WHO, “Indoor Air Pollution: Multiple Links between Household Energy and the MDGs,” 2011.
- Kpalo, S.Y., Zainuddin, M.F., Manaf, L.A., Roslan, A.M.: A review of technical and economic aspects of biomass briquetting. *Sustain* **12**, 11 (2020). <https://doi.org/10.3390/su12114609>
- Mboumboue, E., Njomo, D.: Potential contribution of renewables to the improvement of living conditions of poor rural households in developing countries : Cameroon ’ s case study. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **61**, 266–279 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.003>
- OMS, “la pollution de l’air à l’intérieur des habitations et la santé,” 2007.
- Bot, B.V., Gaston, J., Olivier, T., Sosso, T., Pascal, M.: Assessment of biomass briquette energy potential from agricultural residues in Cameroon. *Biomass Convers Biorefinery* (2022). <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02388-2>
- McKendry, P.: Energy production from biomass (part 1): Overview of biomass. *Bioresour. Technol.* **83**(1), 37–46 (2002). [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00118-3](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00118-3)
- Ngusale, G.K., Luo, Y., Kiplagat, J.K.: Briquette making in Kenya: Nairobi and peri-urban areas. *Renew. Sustain. energy Rev.* **40**, 749–759 (2014)
- Bot, B.V., Sosso, O.T., Tamba, J.G., Lekane, E., Bikai, J., Ndame, M.K.: Preparation and characterization of biomass briquettes made from banana peels, sugarcane bagasse, coconut shells and rattan waste. *Biomass Convers Biorefinery* (2021). <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01762-w>
- Lubwama, M., Yiga, V.A.: Development of groundnut shells and bagasse briquettes as sustainable fuel sources for domestic cooking applications in Uganda. *Renew. Energy* **111**, 532–542 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.041>
- Sawadogo, M., Tanoh, S.T., Sidibé, S., Kpai, N., Tankoano, I.: Cleaner production in burkina faso: Case study of fuel briquettes made from cashew industry waste. *J. Clean. Prod.* **195**, 1047–1056 (2018)
- Kauter, D., Lewandowski, I., Claupein, W.: Quantity and quality of harvestable biomass from *Populus* short rotation coppice for solid fuel use—a review of the physiological basis and management influences”. *Biomass Bioengerg.* **24**, 411–427 (2003)
- Njenga, M., et al.: Additional cooking fuel supply and reduced global warming potential from recycling charcoal dust into charcoal briquette in Kenya. *J. Clean. Prod.* **81**, 81–88 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.002>
- Guo, Z., et al.: Characteristics of biomass charcoal briquettes and pollutant emission reduction for sulfur and nitrogen during combustion. *Fuel* **272**, 117632 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117632>
- Lubwama, M., Yiga, V.A.: Characteristics of briquettes developed from rice and coffee husks for domestic cooking applications in Uganda. *Renew. energy* **118**, 43–55 (2018)
- De Oliveira Maia, B.G., Souza, O., Marangoni, C., Hotza, D., De Oliveira, A.P.N., Sellin, N.: Production and characterization of fuel briquettes from banana leaves waste. *Chem. Eng. Trans.* **37**, 439–444 (2014). <https://doi.org/10.3303/CET1437074>
- Gill, N., Dogra, R., Dogra, B.: Influence of moisture content, particle size, and binder ratio on quality and economics of rice straw briquettes. *Bioenergy Res.* **11**(1), 54–68 (2018). <https://doi.org/10.1007/s12155-017-9877-9>
- Srivastava, N.S.L., Narnaware, S.L., Makwana, J.P., Singh, S.N., Vahora, S.: (2019) Investigating the energy use of vegetable



- market waste by briquetting. *Renew. Energy* **68**, 270–275 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.01.047>
21. Stolarski, M.J., Szczukowski, S., Tworkowski, J., Krzyzaniak, M., Gulczyński, P., Mleczek, M.: Comparison of quality and production cost of briquettes made from agricultural and forest origin biomass. *Renew. Energy* **57**, 20–26 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.01.005>
 22. Investir au Cameroun, “Business in Cameroon,” www.investirau.cameroun.com, 2021.
 23. Ishengoma, E.K., Igangula, N.H.: Determinants of household choice of cooking energy-mix in a peri-urban setting in Tanzania. *Energy Sustain. Dev.* **65**, 25–35 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.esd.2021.09.004>
 24. Tamba, J.G.: LPG consumption and economic growth, 1975–2016: evidence from Cameroon. *Int. J. Energy Sect. Manag.* **15**(1), 195–208 (2021). <https://doi.org/10.1108/IJESM-01-2020-0005>
 25. Obi, O.F., Ezema, J.C., Okonkwo, W.I.: Energy performance of biomass cookstoves using fuel briquettes. *Biofuels* **11**(4), 467–478 (2020). <https://doi.org/10.1080/17597269.2017.1374769>
 26. Kapen, P.T., Tenkeu, M.N., Yadjie, E., Tchuen, G.: Production and characterization of environmentally friendly charcoal briquettes obtained from agriculture waste: case of Cameroon”. *Int. J. Environ. Sci. Technol* (2021). <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03497-7>
 27. Sakellariou, E.I., Axaopoulos, P.J., Wright, A.J.: Energy and economic evaluation of a solar assisted ground source heat pump system for a north mediterranean city. *Energy Build.* **231**, 110640 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110640>
 28. Sakellariou, E.I., Wright, A.J., Axaopoulos, P.J.: Energy, economic and emission assessment of a solar assisted shallow earth borehole field heat pump system for domestic space heating in a north European climate. *Geothermics* **95**, 102159 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102159>
 29. G. Tchatat, “Cameroun – Contribution a La Preparation Du Rapport National Pour La Formulation Du Livre Blanc Regional Sur L’Acces Universel Aux Services Energetiques Integrant Le Developpement Des Energies Renouvelables Et De L’Efficacite Energetique,” *Cameroon*, pp. 1–245, 2014, [Online]. Available: http://www.se4all.org/sites/default/files/Cameroon_RAGA_FR_Released.pdf.
 30. INS, “Annuaire statistique du Cameroun, Institut National de la Statistique,” 2008.
 31. INS, “Annuaire statistique du Cameroun, Institut National de la Statistique,” 2013.
 32. N. Schlag and F. Zuzarte, “Market Barriers to Clean Cooking Fuels in Sub-Saharan Africa: A Review of Literature,” *Fuel*, no. April, pp. 1–21, 2008, [Online]. Available: http://sci-international.org/mediamanager/documents/Publications/Climate/market_barriers_clean_cooking_fuels_21april.pdf.
 33. INS, “Agriculture. Annuaire statistique. Chapitre 13,” 2017.
 34. Doggart, N., et al.: The influence of energy policy on charcoal consumption in urban households in Tanzania. *Energy Sustain. Dev.* **57**, 200–213 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.esd.2020.06.002>
 35. Wiafe, E.D.: Fuel-wood usage assessment among rural households in Ghana. *Spanish J. Rural Dev* (2013). <https://doi.org/10.5261/2013.gen1.04>
 36. Sana, A., Kafando, B., Dramaix, M., Meda, N., Bouland, C.: Household energy choice for domestic cooking: distribution and factors influencing cooking fuel preference in Ouagadougou. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **27**(15), 18902–18910 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08427-7>
 37. Uhunamure, S.E., Nethengwe, N.S., Musyoki, A.: Driving forces for fuelwood use in households in the thulamela municipality, South Africa. *J. Energy South. Africa* **28**(1), 25–34 (2017). <https://doi.org/10.17159/2413-3051/2017/v28i1a1635>

Publisher's Note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.





Assessment of biomass briquette energy potential from agricultural residues in Cameroon

Bill Vaneck Bot^{1,2} · Jean Gaston Tamba³ · Olivier Thierry Sosso²

Received: 12 November 2021 / Revised: 18 January 2022 / Accepted: 21 January 2022
© The Author(s), under exclusive licence to Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2022

Abstract

Biomass briquettes made from agricultural residues should be strongly recommended for household cooking in countries with high agricultural potential like Cameroon. This paper aims to evaluate the energy recoverable from crop residues by briquette manufacturing and to analyze the benefits and barriers of briquetting conversion of these residues in the country. Agricultural residues considered in this investigation are generated by rice, banana/plantain, maize, groundnut, cotton, coconut, sugarcane, palm oil, coffee, and cocoa. The residues generated by these crops are husks, shells, bagasse, leaves, peels, stalks, straw, and stems. The estimation was done using the Residues-to-Product Ratio method, and the results show that the annual crop residues production is 46,236,156 tons. The briquetting conversion of these residues could produce 7,706,260 tons of biomass briquettes with an annual energy potential of around 106 PJ year⁻¹. It is concluded that the availability of agricultural residues in that country provides an important potential for briquette production.

Keywords Biomass briquettes · Agricultural residues · Energy potential · Briquetting conversion

Nomenclature

Acronyms

| | |
|-----------------|--|
| MSW | Municipal solid waste |
| LHV | Low Heating Value (MJ kg ⁻¹) |
| SND | Stratégie Nationale de Développement |
| LPG | Liquefied petroleum gas |
| WHO | World Health Organization |
| IEA | International Energy Agency |
| GHG | Greenhouse gas |
| CO ₂ | Carbon dioxide |
| CH ₄ | Methane |

| | |
|-----------------------|---|
| BAD | African Development Bank |
| ONACC | Observatoire National de Changements Climatiques |
| MINEE | Ministry of Energy and Water Resources |
| MINEPDED | Ministry of Environment, Protection of Nature and Sustainable Development |
| MINRESI | Ministry of Scientific Research and Innovation |
| MINFI | Ministry of Finance |
| MINEPAT | Ministry of Economy, Planning, and Regional Development |
| SOSUCAM | Société SUcrière du CAMeroun |
| SODECOTON | Société de DEveloppement de COton |
| MAISCAM | MAIS du CAMeroun |
| MPa | Mega Pascal |
| TJ year ⁻¹ | Tera joules per year |

Symbols

| | |
|-----|---|
| RPR | Residues-to-Product Ratio |
| CR | Amount of crop residues (ktons) |
| EnR | Energy potential (TJ year ⁻¹) |
| MR | Mass ratio |

Subscripts

| | |
|----------|-----------------------|
| <i>i</i> | For each crop residue |
|----------|-----------------------|

✉ Bill Vaneck Bot
bbillvaneck@yahoo.fr

✉ Jean Gaston Tamba
tambajea@gmail.com

¹ Laboratory of Energy, Materials, Modelling and Methods, Higher National Polytechnic School, University of Douala, PO Box 2701, Douala, Cameroon

² Laboratory of Thermal and Environment, Advanced Teacher's Training College for Technical Education, University of Douala-Cameroon, PO Box 1872, Douala, Cameroon

³ Department of Thermal and Energy Engineering, University Institute of Technology, University of Douala, PO Box 2701, Douala, Cameroon

1 Introduction

Energy plays a crucial role in the sustainable development and quality of life in countries. Urbanization and industrialization of the modern city are linked to high energy demand [1]. The energy consumption pattern of any country is an indicator of its socio-economic status [2]. The International Energy Agency (IEA) estimates that the increase in global energy consumption will reach about 34% between 2012 and 2035 [3]. Conventional non-renewable energy (gas, oil, coal) is the main source of energy in the world; it accounts for over 2/3 of the world's energy consumption, with 34% oil, 27% coal, and 24% natural gas, followed by hydro at 7%, nuclear at 4%, and renewables (solar, wind, geothermal, biomass, etc.) at 4% [4]. Fossil resources are rapidly depleting and have an impact on the environment, human well-being, and even the future generation. The focus has therefore been on exploiting renewable energies as a substitute for the depleting fossil energy sources.

Recent key statistics in Cameroon indicate that access to modern energy is still very low, with a national average rate of 18% for domestic gas [5], while fuelwood is the main source of household cooking and represents 72.61% of total energy use [6, 7]. As well as in many other developing countries, biomass could be a prominent source of renewable energy. Replacing fossil fuels with biomass will offer many benefits, such as reducing greenhouse gas (GHGs) emissions, providing sustainable options for meeting global energy demand, and improving the quality of life of people [8].

Cameroon is an agriculture base country because its agricultural sector is essential to the country's economy; the major part of its biomass potential comes from the agro-industry [9]. Agricultural residues such as staws, husks, stalks, shells, and stem have high energetic potential and are defined as a biomass by-product from the agricultural systems [10]. A minor part of these residues is used as fertilizer in the fields, to limit soil erosion or as litter in poultry houses, but the most important part of these residues is neither treated nor recycled effectively [11]. Some rural households and industries rely on agricultural residues for cooking, heating purposes, etc. The direct combustion of these biomass residues is poorly efficient, highly depletes the environment [8]. According to *Sampathkumar Velusamy et al.*, inefficient direct combustion of biomass waste can also have negative effects on public health [12]. The conversion of biomass into energy can be achieved in a number of ways [13], but biomass briquettes might be used to substitute coal, wood, or other fuels in various operations, reducing pollutant emissions and fossil fuel use [14]. Other findings stated that there are

many advantages to producing fuel briquettes for household cooking purposes using agricultural crop residues as feedstock [15–19]. The process of briquette making goes through several stages, namely drying, carbonizing or slow pyrolysis, grinding, mixing with the addition of a binder, pressing, and finally drying of the briquettes [20]. Briquetting improves the characteristics of these residues and facilitates transportation, storage, feeding into furnaces, and combustion [21, 22]. The quality of the fuel briquettes produced is influenced by the agricultural biomass selected and the choice of residues for the briquette making depends on its characteristics (low moisture, low ash content, great calorific value, high density, and medium fixed carbon) [23] and its availability in the region. A geographical distribution and energy potential assessment are critical in determining the viability of a country's recovery plan or policy.

Many countries are interested in taking advantage of agricultural biomass. For instance, in Italy, a method for assessing the energy potential of residual agro-industrial biomass for use in the production of electricity, methanol, biodiesel, and methane has been proposed [24]. In Croatia, *N. Bilandzija et al.* proposed introducing agricultural biomass into the “Croatian green energy production” in order to ensure energy consumption and reduce energy imports [25]. In Turkey, the energy potential of agricultural biomass residues has been explored and it appears that agricultural residues are sufficiently diverse and varied to ensure Turkey's economic and environmental sustainability [26]. A global view of sub-Saharan countries revealed that this area of the world has great potential due to the expansion of agriculture [27]. Looking specifically at some developing countries like Uganda, the total biomass potential is 260 PJ year⁻¹ [28]. In Zimbabwe, this energy potential is 413.2 PJ year⁻¹ [29]. In Ghana, biomass residues are diversified with a potential of 1718.7 MJ year⁻¹; this biomass can be used to produce biogas and first-generation liquid biofuels [30–32]. Especially in Cameroon, there is significant renewable energy source potential even though the energy demand is important [3, 33]. *Inna Samnoussa et al.* stated that the energy potential of waste derived from some food products in the Northern part of Cameroon is 11.5 TJ year⁻¹ [34]. In 2018, after investigations on Cameroonian biomass, *Mboumboue et al.* showed that the four main biomass (forest residues, agricultural residues, animal residues, and municipal solid wastes) constitute a great energy potential that can be valorized by thermochemical and biochemical conversion [5]. According to the literature available, no scientific studies have been recorded in the literature focussing on the evaluation of the energy potential of biomass briquettes from agricultural biomass, although, as said before, agricultural residues are good feedstock for briquette production.

This study provides a theoretical potential assessment of the amount of energy that can be recovered by briquetting suitable agricultural biomass residues available in Cameroon. The aim is to take stock of the national annual agricultural production, identify suitable residues available, and evaluate the energy potential of all agricultural residues with satisfactory properties that have already been used for briquette production. This work provides information and data for decision-makers on benefits, barriers, and opportunities for using crop residues for briquetting in Cameroon. Data was collected from all regions of the country in statistical reports. The Residues-to-Product Ratio (RPR) method was used to calculate the amount of residues generated. RPR values, Low Heating Values (LHV), of briquettes were obtained from the literature.

2 Materials and methods

This section aims to provide a general approach used to evaluate the biomass briquette energy potential made from agricultural residues investigated in this study. For the assessment of the theoretical current energy potential, annual agricultural production data were collected from the statistical manual of the National Institute of Statistics of Cameroon 2017 edition [9]. Data collected from the 2008 and 2013 editions of the statistical manuals were used to analyze the evolution of the energy potential [35, 36].

2.1 Location of the study area

Cameroon is a sub-Saharan African country located at the bottom of the Gulf of Guinea between 2 and 13° latitude North and 8 and 16° longitude East as shown in Fig. 1. It is bordered by six countries, i.e. Nigeria, Chad, Central African Republic, Congo, Gabon, and Equatorial Guinea. With a population of 23,739,218 inhabitants, Cameroon is the most populated country in Central Africa. Over 60% of the active population is employed in agriculture; the agricultural sector is essential to the country’s economy [37]. Major crop products are coffee, cotton, maize, oil palm, sugarcane, and banana/plantain [7].

2.2 Choice of biomass materials

Biomass residues usually considered for briquette manufacturing are crop-based waste residues that are unsuitable materials after the harvesting of useful crops. The selected raw materials for briquetting should have some specific characteristics because of their effects on the quality of the briquettes produced. *Bernice Asamoah et al.* reported key characteristics of biomass suitable for briquette making. [38]. According to this report, residues selected for briquette preparation should have a great calorific value; this high value leads to complete combustion when burning the obtained fuel briquettes. It is also important to have a high bulk density which influences the durability of briquettes.

It is essential to have high fixed carbon, low volatile matter, optimum ash content, and the low moisture content

Fig. 1 Location of the study area [4]

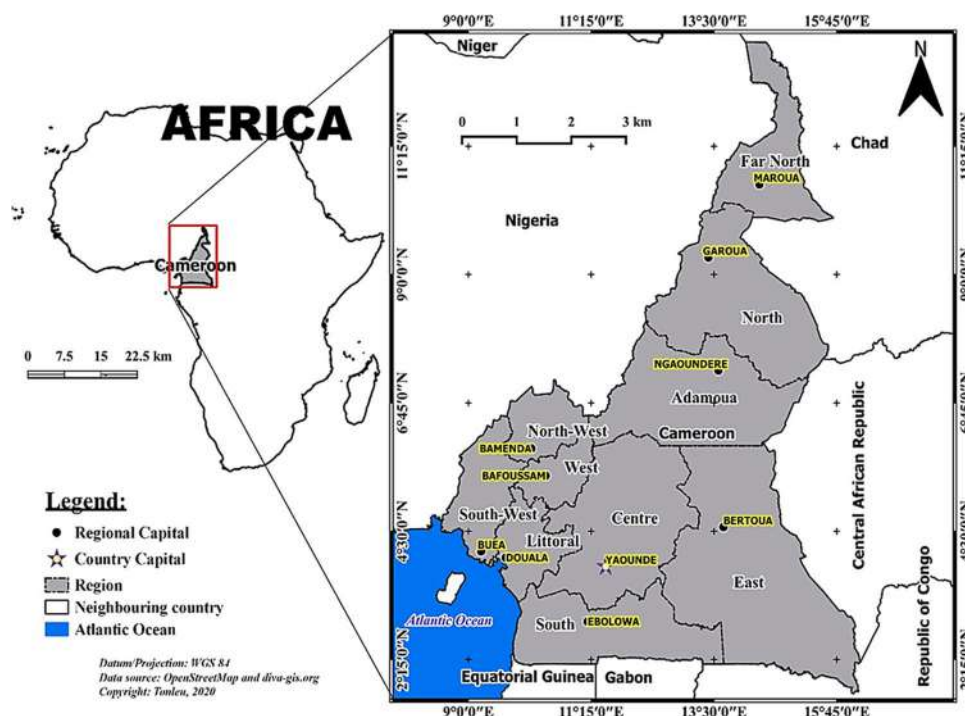


Table 1 Crops and residues available in Cameroon

| Crops | Annual production (kt) [5, 9] | Residues type | RPR [5, 34] | Moisture content (%) | Ash content (%) | Low Heat Value (MJ kg ⁻¹) | Sources |
|-----------------|-------------------------------|---------------|-------------|----------------------|-----------------|---------------------------------------|---------|
| Rice | 359.32 | Husk | 0.2 | 2.37 | 19.5 | 19.33 | [5, 39] |
| | | Straw | 1.75 | 12.71 | 18.1 | 18.1 | [5, 39] |
| Banana/plantain | 6020.26 | Peels | 0.25 | 15.0 | 6.26 | 17.00 | [5, 40] |
| | | Leaves | 0.35 | 40.0 | N/A | 11.37 | [5, 41] |
| | | Stem | 5.6 | 40.0 | N/A | 11.66 | [5, 42] |
| Maize | 2164 | Husk | 0.2 | 11.11 | 1.2 | 15.56 | [5] |
| | | Stalk | 2.0 | 20.0 | 10.0 | 13.79 | [5, 43] |
| | | Cob | 0.27 | 7.53 | 8.1 | 16.30 | [5, 44] |
| Groundnut | 747.67 | Husk | 0.47 | 8.20 | 8.56 | 15.66 | [5, 17] |
| Cotton | 289.99 | Husk | 0.5 | 9.0 | 6.0 | 16.57 | [5, 45] |
| | | Stalk | 3.74 | 12.0 | 9.4 | 13.07 | [5, 46] |
| Coconut | 5 | Husk | 1.03 | 10.30 | 0.5–0.59 | 18.60 | [5, 47] |
| | | Shells | 0.6 | 10.0 | 1.0 | 10.61 | [5, 48] |
| | | Coir dust | 0.62 | 15.0 | NA | 13.40 | [5, 49] |
| Sugarcane | 1450 | Bagasse | 0.29 | 50.0 | 6.0 | 17.54 | [5, 17] |
| | | Leaves | 0.30 | 10.0 | 1.2 | 15.81 | [5, 50] |
| Palm oil | 419.97 | Shell | 0.05 | 13.0 | 4.0 | 17.00 | [5, 51] |
| Coffee | 33.59 | Husk | 2.1 | 15.0 | NA | 12.56 | [5, 16] |
| Cocoa | 308.75 | Husk | 1.0 | 15.0 | NA | 17.85 | [52] |

in order to decrease production costs. Table 1 presents the annual production of the food crops considered in Cameroon as well as the types and characteristics of the residues produced during farming from each crop. The residue sources selected are rice, banana/plantain, maize, groundnut, cotton, coconut, sugarcane, palm oil, coffee, and cocoa. The manufacturing of these crops generates residues including shells, husk, stalks, leaves, fibre, or straw. All the crop residues have great characteristics as recommended by Bernice Asamoah et al. and have already been used for briquetting in Cameroon or in other countries. Table 1 also provides the Residue-to-Product Ratio (RPR) for each residue, which represents the mass of residue produced per unit of crop harvested.

2.3 Biomass briquette production from crop residues

Briquetting is an ancient concept that was first introduced in 1864 in the USA [2]. The conventional briquetting process described in this section was reported by Bot et al. and Kapen et al. [20, 53] (presented in Fig. 2), allows to prepare solid compact biomass briquettes (as shown in Fig. 3).

2.3.1 Drying of crop residues collected

The aim is to remove the water from the waste to make the next step, pyrolysis, more efficient. This can be done at ambient temperature (31–34 °C) for 3 days or in an oven at 60 °C for 8 h.

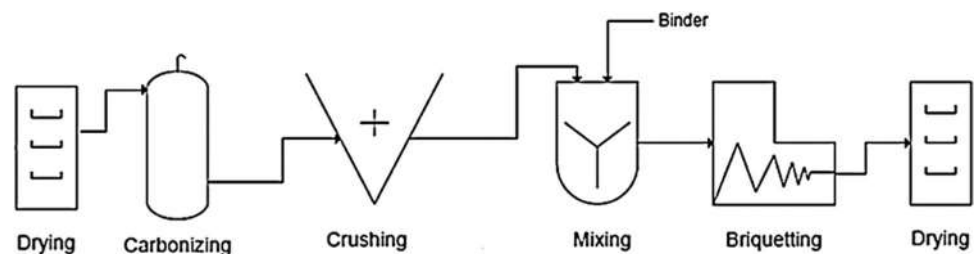
Fig. 2 Briquetting process [20]



Fig. 3 Biomass briquettes

2.3.2 Carbonizing or slow pyrolysis

This is a crucial step in the manufacture of fuel briquettes; the aim here is to induce the chemical decomposition of the raw material by the action of heat in order to obtain a product composed mainly of carbon. The equipment usually used is a metal drum of 200 l surmounted by a chimney (100 cm in length and 10 cm in diameter). During the pyrolysis process, small openings are made at the bottom of the pyrolyser until the fire is self-sustaining, then they are closed to limit the entry of oxygen inside to create a favourable environment for pyrolysis. Biomass materials are carbonized out at a temperature in the range of 300–400 °C; the time of carbonization depends on raw biomass materials chosen and varies between 15 and 45 min.

2.3.3 Crushing

The carbonized materials are crushed in fine particle size of less than 5 microns in order to achieve good-quality mixing and compaction.

2.3.4 Mixing

The mixing of crushed materials is done by the addition of a binder which leads to facilitating briquetting. The equipment usually used is a mixer powered by an engine making a rotating movement for twenty or so minutes from which we could be sure that the material is homogeneous. A lot of binders could be used such as asphalt, starch, microalgae, sewage

sludge, okra stem gum, molasses, cow dung, waste paper pulp, sulfonate salts, clay, wood ash, rice dust, sawdust, paper pulp, and cassava starch. The binder should be chosen in function of its physicochemical characteristics, its availability in the local market, and its low price. The mass ratio of carbonized waste to binder is about 90:10 for optimum mixing.

2.3.5 Briquetting

The binder-mixed carbonized materials are pressed in a manual, hydraulic, or electrical briquetting press. The compaction pressure used to produce briquettes should be in the range of 5–7 MPa for 20 s or so.

2.3.6 Drying of briquettes produced

The moulded briquettes are finally dried in order to produce them in a dehydrated form. They are usually then dried in the sun at an ambient temperature of 30 °C for 3 days.

2.4 Assessment of energy potential

The annual gross energy potential is estimated by using the Residues-to-Product Ratio (RPR) method as proposed by Okello et al. [28]. The energy potential of biomass briquettes made from each residue (i) is calculated based on the following equations:

$$(CR)_i = (RPR)_i \times (P_rC)_i \quad (1)$$

$$(EnR)_i = (CR)_i \times (LHV)_i \times (MR)_i \quad (2)$$

$$EnR_t = \sum (EnR)_i \quad (3)$$

where $(CR)_i$ is the amount of each agricultural biomass residue, $(RPR)_i$ the Residue-to-Product Ratio of each residue, $(P_rC)_i$ is the annual amount of each crop production, $(LHV)_i$ is the Low Heat Value of biomass briquettes, $(MR)_i$ is the mass ratio of briquettes produced to briquetting residues, EnR_i is the biomass briquette energy potential from each residue, and EnR_t is the total gross energy potential. The $(RPR)_i$ values of all the residues and the Low Heat Value of biomass briquettes from each residue were carried out by several studies and reported in the literature; $(MR)_i$ was estimated at a mean value of 1/6 after discussions and interviews of some briquetting manufacturers in the Littoral, East, and Northern region's Cameroon.

Table 2 Estimated amount of biomass briquettes derived from agricultural residues and energy potential

| Crops | Annual production (kt) | Residues type | RPR | Amount of residues (kt) | Amount of briquettes (kt) | LHV briquettes (MJ kg ⁻¹) | Energy potential (TJ) |
|-----------------|------------------------|---------------|------|-------------------------|---------------------------|---------------------------------------|-----------------------|
| Rice | 359.32 | Husk | 0.2 | 71,864 | 119.77 | 17.04 | 204.09 |
| | | Straw | 1.75 | 631,325.24 | 105.22 | 17.98 | 1891.87 |
| Banana/plantain | 6020.26 | Peels | 0.25 | 1,505,066 | 250.84 | 21.41 | 4215.69 |
| | | Leaves | 0.35 | 2,107,092.4 | 351.18 | 17.7 | 6215.92 |
| | | Stem | 5.6 | 33,713,478.4 | 5618.91 | 12.13 | 68,157.41 |
| Maize | 2164 | Husk | 0.2 | 432,800.6 | 72.13 | 16.8 | 1211.84 |
| | | Stalk | 2.0 | 4,328,006 | 721.33 | 17.8 | 12,839.75 |
| | | Cob | 0.27 | 590,772.8 | 98.46 | 20.89 | 2056.87 |
| Groundnut | 747.67 | Husk | 0.47 | 356,641.9 | 59.44 | 22.0 | 1307.68 |
| Cotton | 289.99 | Husk | 0.5 | 144,997 | 24.16 | 16.83 | 406.71 |
| | | Stalk | 3.74 | 1,084,577.5 | 180.76 | 17.51 | 3165.15 |
| Coconut | 5 | Husk | 1.03 | 5150 | 0.85 | 17.71 | 15.20 |
| | | Shells | 0.6 | 3000 | 0.500 | 18.6 | 9.30 |
| | | Coir dust | 0.62 | 3100 | 0.516 | 31.97 | 16.51 |
| Sugarcane | 1450 | Bagasse | 0.29 | 420,500 | 70.083 | 22.0 | 1541.83 |
| | | Leaves | 0.30 | 437,900 | 72.983 | 19.11 | 1394.71 |
| Palm oil | 419.97 | Shell | 0.05 | 20,578.5 | 3.429 | 14.25 | 48.87 |
| Coffee | 33.59 | Husk | 2.1 | 70,555.8 | 11.759 | 23.0 | 270.46 |
| Cocoa | 308.75 | Husk | 1 | 308,753 | 51.458 | 17.31 | 890.75 |
| Total | | | | 46,236.16 | 7706.03 | | 106,139.65 |

3 Results and discussion

3.1 Energy potential of biomass briquettes from agricultural residues

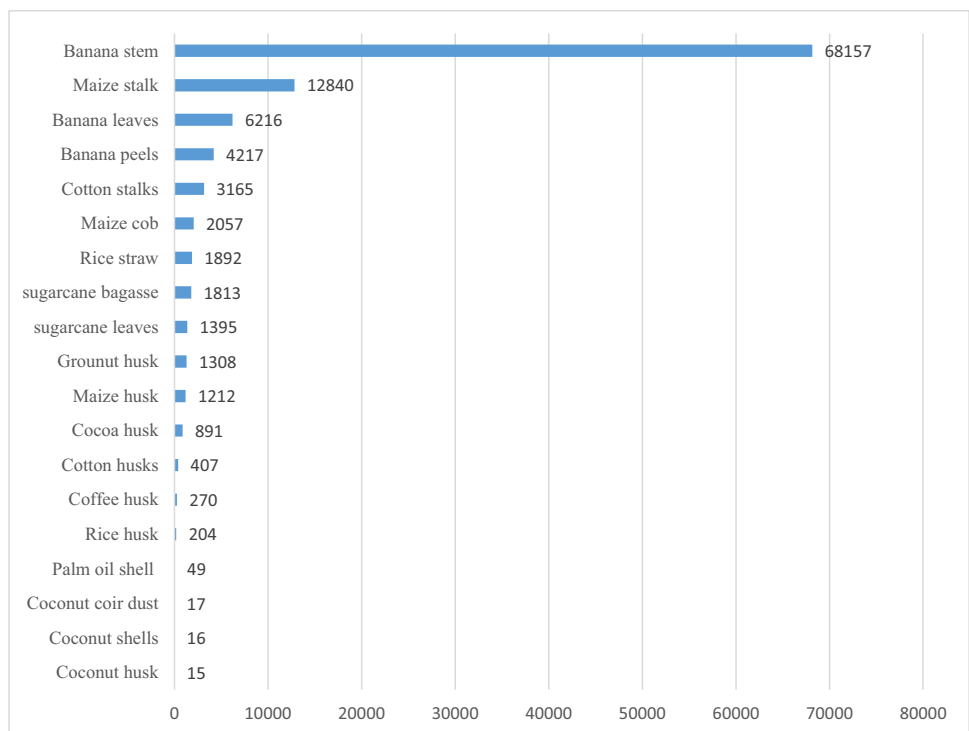
Table 2 presents a summary of the estimated annual amount of biomass briquettes derived from agricultural residues investigated as well as the energy potential. The results show that the annual crop residues production is 46,236,156 tons and the briquetting conversion of these residues could produce 7,706,260 tons of biomass briquettes. The total biomass briquette energy potential from the residues chosen is 106,139.65 TJ year⁻¹. Among the investigated residues, banana/plantain residues are likely to produce briquette with the highest energy potential of 79,743.91 TJ year⁻¹ maining 75.1% of national energy potential, followed by maize and cotton residues with 16,204.31 TJ yr⁻¹ and 3571.87 TJ year⁻¹ respectively. This is due to the highest annual production of banana/plantain (more than 6 million tons) and the high value of stem RPR. Figures 4 and 5 show the energy potential of briquettes from each residue, the energy potential per region, and the spatial distribution of the energy potential from agricultural biomass in Cameroon, respectively.

There is a regional variation in the energy potential of crop residues; the Central, Eastern, and Southern regions

have the highest potential values of 29,976 TJ year⁻¹, 21,166 TJ year⁻¹, and 18,000 TJ year⁻¹ respectively. This can be explained by the kind of vegetation in these areas. These three regions occupy the forest zone of the country and are the most agricultural. In the East, 8 agricultural products are cultivated; in the Centre and South regions, all the crops are available except cotton. In addition, some crops generate residues for the production of briquettes with a high LHV. The North, North-West, South-West, Littoral, and West regions have intermediate energy potential values of 5909.59 TJ year⁻¹; 6711.70 TJ year⁻¹; 6593.50 TJ year⁻¹; 5727.16 TJ year⁻¹; 6472.97 TJ year⁻¹ respectively. Among these five regions, the Littoral region has the greatest diversity of agricultural products. While the northern region has only maize, rice, banana/plantain, cotton, and groundnuts, its potential is mainly due to the massive cultivation of cotton by the national cotton company (SODECOTON).

The North-West, South-West, Littoral, and West regions have an average of 6–7 crops available for cultivation. The Far North region has a relatively low potential value (3295.39 TJ year⁻¹). The potential residues are generated by rice, maize, groundnuts, and cotton; this potential is dominated by maize. The Adamawa region has the lowest potential with a value 2279.98 TJ year⁻¹; there are only four crops potentially usable for producing residues for charcoal briquette production. Maize residues account for more than

Fig. 4 Estimated energy potential of briquettes from each residue (TJ year⁻¹)



half of the Adamawa region's potential, which is explained by the operation of MAISCAM company, the national maize growing, and processing company.

The energy potential is huge but unevenly distributed over the territory. This potential is subject to the annual agricultural production and the type of exploitable residues available in each region. Despite this irregular distribution of the potential, it is exploitable. In order to set up infrastructures for the briquetting of agricultural residues, the type of residues should be taken into account in order to adapt the strategy to be put in place. Biomass mixtures can be considered in seasons when some biomass sources are not available in large quantity. As in many developing countries, the use of agricultural biomass for the production of eco-friendly charcoal briquettes would have many advantages for Cameroonian sustainable development. The total energy potential of agricultural residues was estimated by Mboumboue and Djomo to be 289.4 TJ year⁻¹; this figure is considerably higher than the one estimated in this study. But, all the agricultural residues studied in Mboumboue's study were not taken into account in the current study because their properties are not suitable for briquetting such as wheat straw, sweet potato peelings, and beans straw; so they can still undergo gasification, fermentation, or anaerobic digestion. The value of the energy potential found in all three regions of the northern part of the country (North, Extreme-North, Adamaoua) is equivalent to that found by Inna Samoussa (11.5 TJ year⁻¹) who concentrated her evaluation only in this area of the country. However, in this study, as

in that of Mboumboue, the evaluation of the potential is linked solely to the characteristics of the biomass and does not consider a particular mode of conversion. The results of the assessment show that the potential for briquette production is considerable in Cameroon. Unfortunately, it is under-exploited in spite of the many benefits of its exploitation, certainly because of some constraints. The following two sections discuss the benefits and barriers to the production of briquettes from agricultural residues in order to propose ways of optimal recoverability of the residues through this biomass conversion.

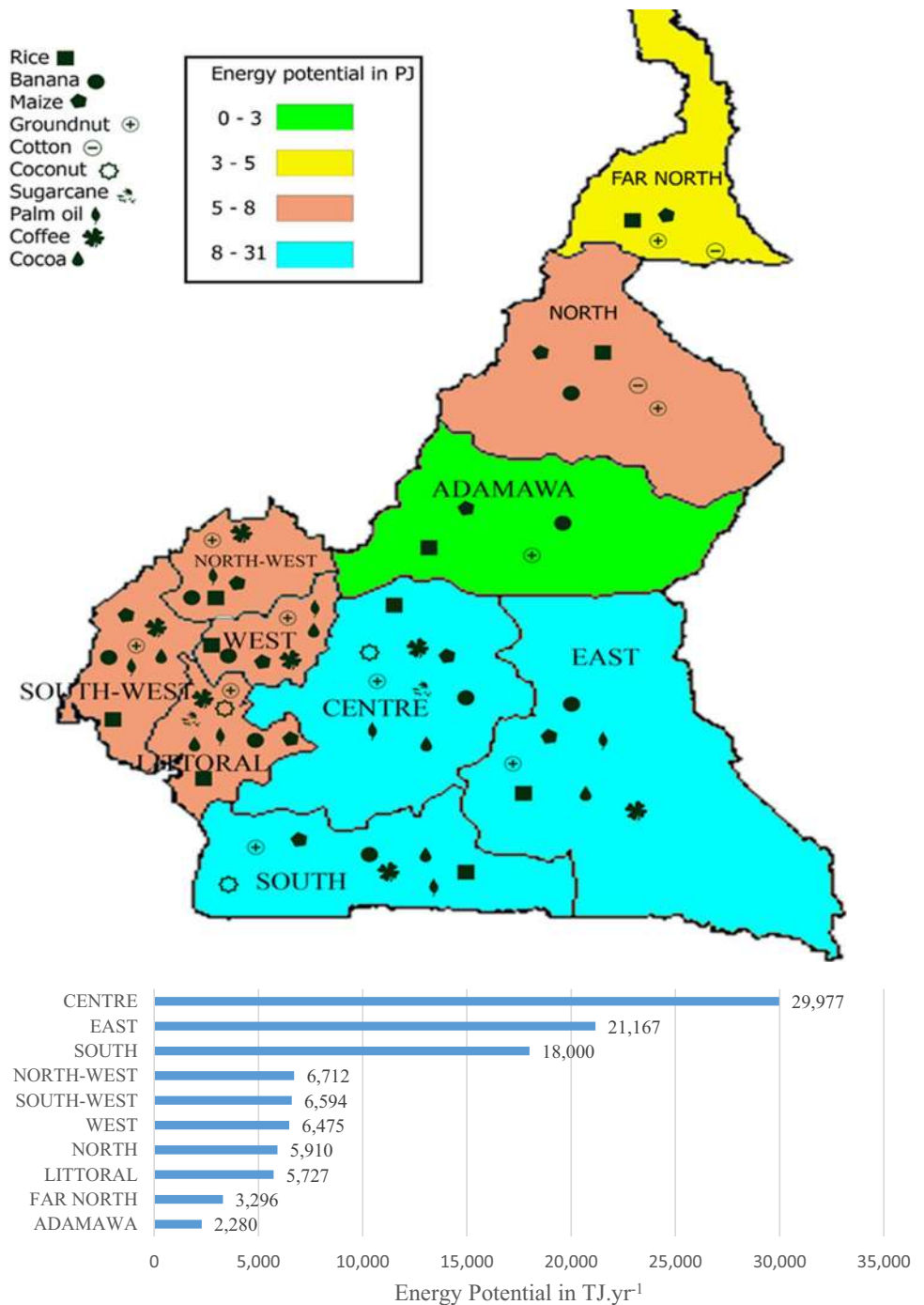
3.2 Benefits of briquetting industry development in Cameroon

The recoverability of Cameroonian agricultural biomass for industrial briquette making will have many environmental, energy, economic, and health benefits.

3.2.1 Environment preservation

For household cooking, 18.3% of Cameroonians use LPG/biogas, 3.8% use kerosene/oil, 70.5% use wood, 2.4% use charcoal, 0.6% use agricultural residues, and 4.4% use other sources [54]. Among these energy sources, LPG is the cleanest. Unfortunately, it is unable to meet the energy needs of remote areas of the country due to high prices and limited supply. The majority of the energy is derived from fuelwood (wood, charcoal, and wood residues), which

Fig. 5 Spatial repartition of estimated energy potential per region and residues available per region

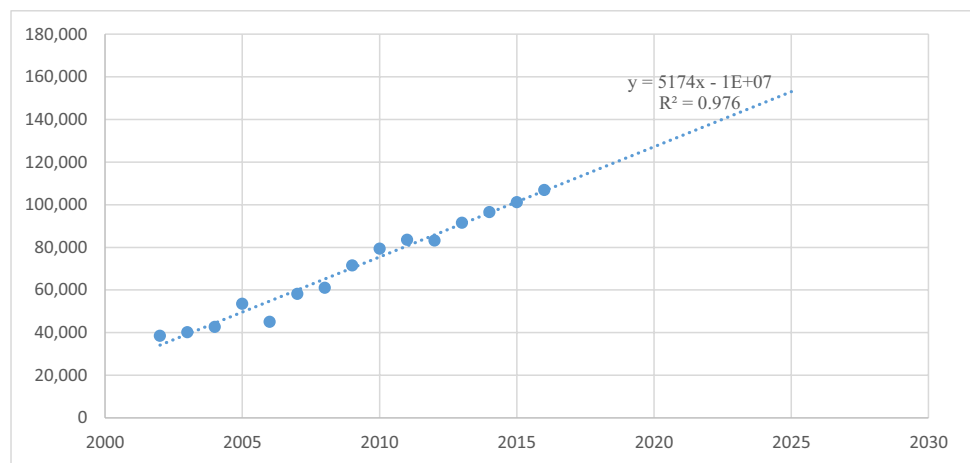


contributes to environmental issues such as deforestation. Using briquettes as a substitute for fuelwood allows the limitation of GHGs, especially carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄). Some studies on briquettes have shown that they release a small amount of sulphur and nitrogen during combustion [55]. The valorization of this important Cameroonian potential will help to preserve air quality. In addition, the activities of valorization of these residues

would contribute to environmental sanitation. Finally, the use of briquettes will prevent the deterioration of forests.

3.2.2 Energy supply

As Fig. 6 shows, this energy potential is growing significantly, certainly because of high agricultural growth rates. An increasing population could trigger the cultivation of

Fig. 6 Evolution of annual energy potential

high-yielding crop varieties and the utilization of modern cultivation practices [56]. Government policy intends to significantly boost this agricultural production with the mechanization of crops, especially food crops such as rice groundnuts, maize, banana/plantain. This will increase the availability of agricultural residues. The additional energy could be used in industry, for hot water or to generate electricity. The use of briquettes from agricultural biomass would contribute to Cameroon's energy transition as it is environmentally sustainable, socially equitable, and economically viable as recommended by Mboumboue [57, 58].

3.2.3 Socio-economic aspect

Biomass briquettes could be produced at a local level. This provides an advantage to local communities and farmers by allowing them to develop additional and economically profitable commercial activities. Poverty and rural-to-urban migration might also be reduced in rural areas. Indeed, the implementation of briquette production companies in rural areas will also create jobs, and villagers will not move to the city in search of better living conditions. In addition, this technological sector would attract many investors, which would improve the quality of the infrastructure.

3.2.4 Health and safety

According to the World Health Organization (WHO), the inhalation of combustion pollutants by women and children causes olfactory diseases, respiratory disorders such as pneumonia, chronic bronchitis, or even cancer [57, 59]. Some women have even been victims of assault and rape while collecting firewood in the forest. Using charcoal briquettes could be a solution to this issue.

3.3 Barriers and solution in briquetting industry development in Cameroon

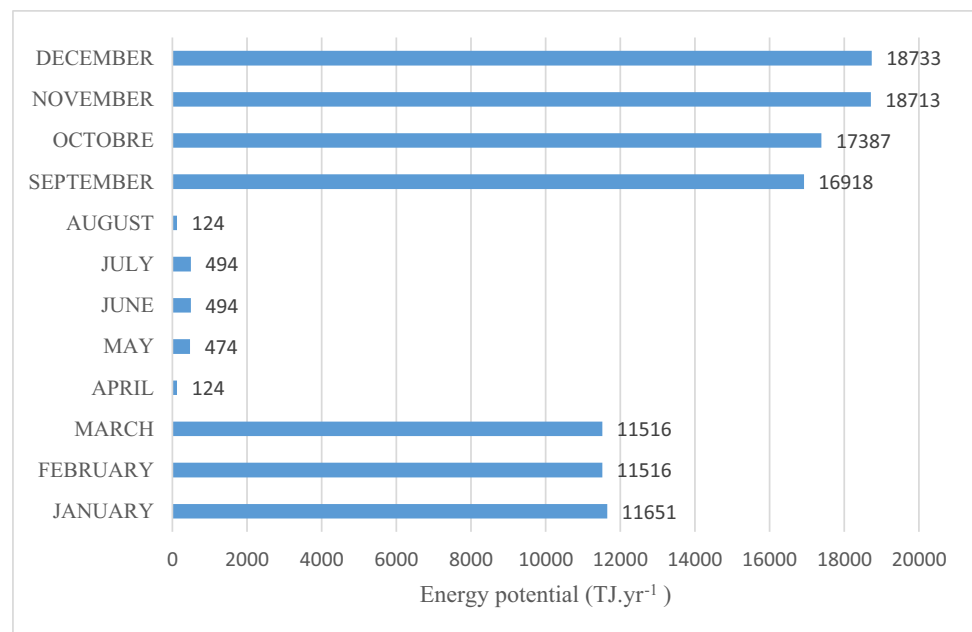
Despite the richness and diversity of agricultural biomass energy, activities related to its recoverability do not seem to be developed and widespread on the national territory. This is probably linked to several political, logistics, and seasonal availability difficulties.

3.3.1 Policy and decision-makers

Until the signing of the Strategie Nationale de Développement (SND) report in 2020 [60], there were no guidelines for renewable energy in Cameroon, let alone for the management and use of biomass as an energy source, but laws are being prepared in this sector. According to this report, Cameroon intends to prioritize the cotton, cocoa, coffee, palm oil, sugar, rice, maize, and banana/plantain sectors in the coming years; to develop alternative energies to better meet specific needs such as cooking; and to strengthen actions relating to the sustainable management of natural resources and the mitigation of climate change.

All the government institutions are in place and their responsibilities are clearly defined. The Ministry of Energy and Water Resources (MINEE) handles the implementation and coordination of activities related to the energy sector. The Ministry of Environment, Protection of Nature and Sustainable Development (MINEPDED) should promote sustainable development. The Ministry of Scientific Research and Innovation (MINRESI) should coordinate research in clean and renewable energy. The Ministry of Finance (MINFI) should offer financial support to project developers and reduce taxes, and the Ministry of Economy, Planning, and Regional Development (MINEPAT) should accompany and encourage local communities in entrepreneurship. It would be interesting for all these institutions to consider the availability and variety of this important

Fig. 7 Energy potential per month



potential when deciding and defining clear policies and laws on renewable energy, in this case on biomass. The African Development Bank (BAD) should also support the biomass energy sector in order to attract investment as is done in the power sector. The World Bank, through the Rural Energy Fund, has planned to significantly increase the use of bioenergy in rural areas in Cameroon and to implement pilot energy-poverty micro-projects. Part of the funds can be allocated to finance projects related to briquette production.

3.3.2 Technology and human aspects

No specific study has been carried out in Cameroon focusing on the state of briquette producers, but we can already count a few microstructures having been set up in the economic capital and having shown that it is possible to produce quality briquettes at competitive prices. Hopefully, the support of this kind of initiative would increase the exploitation of the energy potential and would flood the market with good-quality briquettes at low prices. It should also provide awareness-raising and information on the possibility of using agricultural waste and on the technology. Farmers and local communities do not seem to be aware of the importance of this waste, which is often dumped in nature for some and burnt for others. The advanced technology used for the production of briquettes is nearly expensive, but local equipment can be used that is relatively easy to install, as it has been done in some developing countries such as Burkina Faso, Senegal, Kenya, and Uganda [16, 17, 61, 62].

3.3.3 Costs and logistics

The dispersion of crop residues on the national territory poses a supply chain problem for their collection for energy conversion. The cost of logistical operations for briquetting agricultural biomass residues constitutes a major bottleneck for their use. This is due to the complexity of the supply chains that need to be implemented [63]. The costs of collection, transport, storage, and briquetting of residues form the basis of the economic aspects. These costs are influenced by site-specific conditions, the availability of biomass, and the design of the processing chain [64]. The logistics of using biomass residues can be influenced by the distribution density of the biomass, the scale and window of operation, the relative distance to the supply location, and the characteristics of the energy conversion technology used. Other factors that can affect the economics of the system include the availability of infrastructure, the geographical location of the area, the regulatory environment, and competition with other fuels. However, despite these difficulties, energy recovery from residues of agricultural biomass can be achieved without financial loss if the logistics are well planned and the energy technology well is established [65].

3.3.4 Seasons' availability

The timing of the seasons should be taken into account when recoverability agricultural residues as it has an impact on the availability of biomass. According to the report of the Observatoire National de Changements Climatiques (ONACC) about agricultural activities in Cameroon, rice, banana/plantain, maize, groundnut, cotton,

palm oil, coffee, and cocoa are seasonal crops [66]. Maize and groundnuts are harvested during the months of June, July, and December, palm oil is harvested in the period from October to December; and coffee in the period from November to December. Banana/plantain is harvested from September to March, cotton from November to January, and rice from May to July. The sources of residues are not evenly distributed throughout the year, which influences the energy potential. Figure 7 shows the energy potential on the national territory per month. December has the highest potential, which can be explained by the fact that all crops are harvested during this month. November and January follow with potentials of 13,430 TJ and 12,706 TJ respectively. In August and April, the energy potential is the lowest (124.27TJ). Since no seasonal crops are harvested during these 2 months, these months are usually reserved for plant protection or land preparation for sowing. If an adequate program of exploitation of agricultural residues for briquetting is not adopted, this can lead to a waste of resources during feedstock deficit periods, especially during August, April, and May. To solve this issue, some conservation techniques such as drying should be applied so that surplus residues generated during the period from September to March are still available in April–May.

4 Conclusion

Biomass is an important source of Cameroon's primary energy supply. Biomass briquettes are good household cooking fuel because of their fuel properties and reduced pollution emissions. This work focused on the assessment of the capacity of Cameroonian agricultural biomass to produce biofuel briquettes as well as their energy potential. The results show that the annual energy potential is 106,139.65 TJ year⁻¹ and that this potential is increasing over the years. Banana/plantain, maize, cotton, and rice generate the most important residues. According to the geographical distribution, each region has at least four crops from which processing generates the residues that make up the raw material for briquette production. The energy potential of the regions ranges from 3 to 30 PJ year⁻¹. The residues are available, the potential is huge, and guidelines should be integrated into the energy policy in order to supply household cooking fuel. Soon, studies could focus on (i) the state of play of the production of ecological charcoal briquettes in Cameroon in order to identify the real problems that slow down this sector of activity, (ii) the supply chain of residues from the production area to the valorization area, and (iii) the techniques of conservation of residues so that there is no break in the year.

Author contribution Bill Vaneck Bot: conceptualization, methodology, and writing original draft, Jean Gaston Tamba: supervision and project administration, Olivier Thierry Sosso Mayi: writing, review, and editing.

Data availability The datasets used in this investigation are accessible in the National Institute of Statistics of Cameroon's repository and can be obtained by contacting infos@ins-cameroun.cm or the corresponding author with a reasonable request.

Declarations

Conflict of interest The authors declare no competing interests.

References

1. De Conti A, Nakashima GT, Paulo M, Granado P, Ricardo E, Padilla D (2021) Binderless briquetting of mixed cassava rhizome, sugarcane bagasse, and sugarcane straw for producing solid biofuel with high durability. *BioEnergy Res*. <https://doi.org/10.1007/s12155-021-10300-5.pdf>
2. Halder PK, Paul N, Beg MRA (2014) Assessment of biomass energy resources and related technologies practice in Bangladesh. *Renew Sustain Energy Rev* 39:444–460. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.071>
3. Wirba et al (2016) Renewable energy potentials in Cameroon : prospects and challenges. *Renew Energy* 76:560–565
4. Kidmo DK, Deli K, Bogno B (2021) Status of renewable energy in Cameroon. *Renew Energy Environ Sustain* 6:2. <https://doi.org/10.1051/rees/2021001>
5. Mboumboue E, Njomo D (2018) Biomass resources assessment and bioenergy generation for a clean and sustainable development in Cameroon. *Biomass Bioenerg* 118:16–23. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.08.002>
6. Tamba JG (2017) An analysis of Cameroon ' s energetic system, 2001–2010. *Energy Sources Part B Econ Plan Policy* 12(3):216–222. <https://doi.org/10.1080/15567249.2015.1060547>
7. Tchatat G (2014) Cameroun – Contribution a La Preparation Du Rapport National Pour La Formulation Du Livre Blanc Regional Sur L'Acces Universel Aux Services Energetiques Integrant Le Developpement Des Energies Renouvelables Et De L'Efficacite Energetique. Cameroon, pp. 1–245. [Online]. Available: http://www.se4all.org/sites/default/files/Cameroon_RAGA_FR_Released.pdf.
8. Rahman MA, Møller HB, Alam MM (2018) Assessing the energy potential of agricultural residues and an approach to meet the rural energy demand: the Bangladesh perspective. *Biomass Convers Biorefinery* 8(4):925–934. <https://doi.org/10.1007/s13399-018-0343-5>
9. INS (2017) Agriculture. *Annuaire statistique*. Chapitre 13
10. Akdeniz RC, Acaroğlu M, Hepbasli A (2004) Cotton stalk as a potential energy source. *Energy Sources* 26(1):65–75. <https://doi.org/10.1080/00908310490251873>
11. Xie G, Kong X, Kang J, Su N, Fei J, Luo G (2021) Fungal community succession contributes to product maturity during the co-composting of chicken manure and crop residues. *Bioresour Technol* 328:124845. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124845>
12. Velusamy S, Subbaiyan A, Kandasamy S, Shanmugamoorthi M, Thirumoorthy P (2021) Combustion characteristics of biomass fuel briquettes from onion peels and tamarind shells. *Arch Environ Occup Heal* 2021:1–12. <https://doi.org/10.1080/19338244.2021.1936437>

13. McKendry P (2002) Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresour Technol* 83(1):37–46. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00118-3](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00118-3)
14. Velusamy S, Subbaiyan A, Thangam RS (2021) Combustion characteristics of briquette fuels from sorghum panicle–pearl millets using cassava starch binder. *Environ Sci Pollut Res* 28(17):21471–21485. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11790-0>
15. Sawadogo M, Tanoh ST, Sidibé S, Kpai N, Tankoano I (2018) Cleaner production in Burkina Faso: case study of fuel briquettes made from cashew industry waste. *J Clean Prod* 195:1047–1056
16. Lubwama M, Yiga VA (2018) Characteristics of briquettes developed from rice and coffee husks for domestic cooking applications in Uganda. *Renew Energy* 118:43–55
17. Lubwama M, Yiga VA (2017) Development of groundnut shells and bagasse briquettes as sustainable fuel sources for domestic cooking applications in Uganda. *Renew Energy* 111:532–542. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.041>
18. De Oliveira Maia BG, Souza O, Marangoni C, Hotza D, De Oliveira APN, Sellin N (2014) Production and characterization of fuel briquettes from banana leaves waste. *Chem Eng Trans* 37:439–444. <https://doi.org/10.3303/CET1437074>
19. Seco A (2020) Characterization of biomass briquettes from spent coffee grounds and xanthan gum using low pressure and temperature. *Bioenerg Res* 13:369–377
20. Bot BV, Sosso OT, Tamba JG, Lekane E, Bikai J, Ndam MK (2021) Preparation and characterization of biomass briquettes made from banana peels, sugarcane bagasse, coconut shells and rattan waste. *Biomass Convers Biorefin* 2021:0123456789. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01762-w>
21. Ngusale GK, Luo Y, Kiplagat JK (2014) Briquette making in Kenya: Nairobi and peri-urban areas. *Renew Sustain Energy Rev* 40:749–759. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.206>
22. Kauter D, Lewandowski I, Claupein W (2003) Quantity and quality of harvestable biomass from *Populus* short rotation coppice for solid fuel use—a review of the physiological basis and management influences. *Biomass Bioenerg* 24:411–427
23. Njenga M, Gitau JK, Iiyama M, Jamnadassa R, Mahmoud Y, Karanja N (2019) Innovative biomass cooking approaches for sub-Saharan Africa. *Afr J Food Agric Nutr Dev* 19(1):14066–14087. <https://doi.org/10.18697/AJFAND.84.BLFB1031>
24. Di Fraia S, Fabozzi S, Macaluso A, Vanoli L (2020) Energy potential of residual biomass from agro-industry in a Mediterranean region of southern Italy (Campania). *J Clean Prod* 277:124085. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124085>
25. Bilandzija N et al (2018) Evaluation of Croatian agricultural solid biomass energy potential. *Renew Sustain Energy Rev* 93:225–230. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.040>
26. Avcioglu AO, Dayioglu MA, Türker U (2019) Assessment of the energy potential of agricultural biomass residues in Turkey. *Renew Energy* 138:610–619
27. Silveira SDC (2019) The resource. *Environmentalist* 3:9–18. [https://doi.org/10.1016/s0251-1088\(83\)90310-8](https://doi.org/10.1016/s0251-1088(83)90310-8)
28. Okello C, Pindozi S, Faugno S, Boccia L (2013) Bioenergy potential of agricultural and forest residues in Uganda. *Biomass Bioenerg* 56:515–525. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.06.003>
29. Shonhiwa C (2013) An assessment of biomass residue sustainably available for thermochemical conversion to energy in Zimbabwe. *Biomass Bioenerg* 52:131–138. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.02.024>
30. Ayamga EA, Kemausuor F, Addo A (2015) Technical analysis of crop residue biomass energy in an agricultural region of Ghana. *Resour Conserv Recycl* 96:51–60. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.01.007>
31. Kemausuor F, Kamp A, Thomsen ST, Bensah EC, Stergård H (2014) Assessment of biomass residue availability and bioenergy yields in Ghana. *Resour Conserv Recycl* 86:28–37. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.01.007>
32. Mohammed YS, Mokhtar AS, Bashir N, Saidur R (2013) An overview of agricultural biomass for decentralized rural energy in Ghana. *Renew Sustain Energy Rev* 20:15–25. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.047>
33. Muh E, Amara S, Tabet F (2018) Sustainable energy policies in Cameroon: a holistic overview. *Renew Sustain Energy Rev* 82:3420–3429. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.049>
34. Inna S et al (2015) Energy potential of waste derived from some food crop products in the northern part of Cameroon. *Int J Energy Power Eng* 4(6):342. <https://doi.org/10.11648/j.ijep.20150406.13>
35. INS (2008) *Annuaire statistique du Cameroun*, Institut National de la Statistique
36. INS (2013) *Annuaire statistique du Cameroun*, Institut National de la Statistique
37. MINADER (2012) *Annuaire des Statistiques du Secteur Agricole Campagnes 2009 et 2010. Dir. des Enquêtes des Stat. Agric.*
38. Bernice Asamoah EO, Nikiema J, Gebrezgabher S, Njenga M (2016) A review on production, marketing and use of fuel briquettes. Colombo, Sri Lanka.
39. Brand MA, Jacinto RC, Antunes R, da Cunha AB (2017) Production of briquettes as a tool to optimize the use of waste from rice cultivation and industrial processing. *Renew Energy* 111:116–123. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.03.084>
40. Mopoung S, Udeye V (2017) Characterization and evaluation of charcoal briquettes using banana peel and banana bunch waste for household heating. *Am. J. Eng. Appl. Sci.* 10(2):353–365. <https://doi.org/10.3844/ajeassp.2017.353.365>
41. de Oliveira Maia BG, Souza O, Marangoni C, Hotza D, de Oliveira APN, Sellin N (2014) Production and characterization of fuel briquettes from banana leaves waste. *Chem. Eng.* 37:439–444
42. Ku Ahmad K, Sazali K, Kamarolzaman AA (2018) Characterization of fuel briquettes from banana tree waste. *Mater Today Proc* 5(10):21744–21752. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.07.027>
43. Ojediran JO, Adebeyejo K, Adewumi AD, Okonkwo CE (2020) Evaluation of briquettes produced from maize cob and stalk. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci* 445:012052. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/445/1/012052>
44. Oladeji JT (2010) Fuel characterization of briquettes produced from corncob and rice husk residues. *Pacific J Sci Technol* 11(1):101–106
45. da Silva JE et al (2019) Energetic characterization and evaluation of briquettes produced from naturally colored cotton waste. *Environ Sci Pollut Res* 26:14259–14265. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04777-z>
46. Song X, Zhang S, Wu Y, Cao Z (2020) Investigation on the properties of the bio-briquette fuel prepared from hydrothermal pretreated cotton stalk and wood sawdust. *Renew Energy* 151:184–191
47. Torres Gadelha AM, Lima Almeida FD, Silva RA, Malveira JQ, Sanders Lopes AA, De Sousa Rios MA (2019) Cashew nut husk and babassu coconut husk residues: evaluation of their energetic properties. *Energy Sourc A Recov Util Environ Eff* 2019:1–9. <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1692976>
48. Tanko Jamilu, Ahmadu Umaru, Sadiq Umar, Muazu Alhassan (2020) Characterization of rice husk and coconut shell briquette as an alternative solid fuel. *Adv Energy Convers Mater* 2(1):1–12. <https://doi.org/10.37256/aecm.212021608>
49. Noah AS, Okon-Akan OA, Abiola JK (2019) Energy characterisation of briquettes produced from admixture of *Arundo donax* L. and coconut coir. *Am Sci Res J Eng Technol Sci* 56(1):136–151
50. Shuma R, Madyira DM (2017) Production of loose biomass briquettes from agricultural and forestry residues. *Procedia Manuf* 7:98–105. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.12.026>

51. Olugbade TO, Mohammed TI (2015) Fuel developed from rice bran briquettes and palm kernel shells. *Int J Energy Eng* 5:9–15. <https://doi.org/10.5963/ijee0501002>
52. Ramlah S (2013) Pemanfaatan Kulit Buah Kakao Untuk Briket Arang. *J Biopropal Ind* 4(2):65–72
53. Kapen PT, Tenkeu MN, Yadjie E, Tchuen G (2021) Production and characterization of environmentally friendly charcoal briquettes obtained from agriculture waste: case of Cameroon. *Int J Environ Sci Technol* 2021:0123456789. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03497-7>
54. Tatsinkou C (2016) Cameroon's programme on energy statistics. Mainstreaming Energy Sustainable Development Goals (SDGs), Targets and Indicators into Statistical Programmes. pp 1–16
55. Guo Z et al (2020) Characteristics of biomass charcoal briquettes and pollutant emission reduction for sulfur and nitrogen during combustion. *Fuel* 272(March):117632. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117632>
56. Prasad S, Singh A, Korres NE, Rathore D, Sevda S, Pant D (2020) Sustainable utilization of crop residues for energy generation: a life cycle assessment (LCA) perspective, (2020). *Bioresour Technol* 303:122964. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122964>
57. Mboumboue E, Njomo D (2016) Potential contribution of renewables to the improvement of living conditions of poor rural households in developing countries : Cameroon ' s case study. *Renew Sustain Energy Rev* 61:266–279. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.003>
58. Tchouate Heteu P (2003) Contribution des énergies renouvelables au développement durable du secteur électrique: le cas du Cameroun. Université Catholique de Louvain, Thèse de Doctorat
59. OMS (2007) la pollution de l'air à l'intérieur des habitations et la santé
60. MINEPAT (2020) Stratégie nationale de Développement 2020–2030
61. Sawadogo M, Tchini Tanoh S, Sidibé S, Kpai N, Tankoano I (2018) Cleaner production in Burkina Faso: case study of fuel briquettes made from cashew industry waste. *J Clean Prod* 195:1047–1056. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.261>
62. Njenga M et al (2014) Additional cooking fuel supply and reduced global warming potential from recycling charcoal dust into charcoal briquette in Kenya. *J Clean Prod* 81:81–88. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.002>
63. Iakovou E, Karagiannidis A, Vlachos D, Toka A (2010) Waste biomass-to-bioenergy supply chain management: a critical analysis. *Waste Manag* 30(10):1960–1970
64. Batidzirai B, Faaij APC (2006) Biomass and bioenergy supply for Mozambique. *Energy Sust Dev* 10(1):54–81
65. Skoulou V, Zabaniotou AA (2007) Investigation of agricultural and animal wastes in Greece and their allocation to potential application for energy production. *Renew Sustain Energy Rev* 11:1698–1719. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.12.011>
66. ONACC (2020) Calendrier agricole pour la campagne 2020 pour les cinq zones agro-écologiques du Cameroun. p 18

Publisher's Note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Preparation and characterization of biomass briquettes made from banana peels, sugarcane bagasse, coconut shells and rattan waste

Bill Vaneck Bot^{1,2} · Olivier Thierry Sosso² · Jean Gaston Tamba³ · Eugénie Lekane² · Jacques Bikai⁴ · Max Keller Ndamé³

Received: 12 April 2021 / Revised: 7 July 2021 / Accepted: 10 July 2021
© The Author(s), under exclusive licence to Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2021

Abstract

Biofuel briquettes were prepared using banana peels, rattan waste, coconut shells and sugarcane bagasse through a conventional method that involved drying, carbonizing, crushing, mixing with cassava starch as binder, compacting and drying. Briquettes produced were evaluated by proximate analysis using American Society for Testing and Materials (ASTM) standard and European Committee for Standardization (CEN) standard. Results of mass reduction study show that the losses are more important for banana peels (97.98%) and sugarcane bagasse (96%). Bulk density of briquettes produced is in the range 0.470–0.851 cm³/g; results of proximate analysis show that high calorific values of briquettes produced are 16.98, 30.07, 32.16 and 25.93 MJ/kg for banana peels, rattan waste, coconut shells and sugarcane bagasse respectively; of the four different residues used, volatile matters are slowly lower to the recommendation of literature, ash content has values in the range 7.44–11.95%, and moisture content is relatively higher than other agricultural residues especially banana peels and sugarcane bagasse.

Keywords Biomass briquettes · Proximate analysis of briquettes · Higher heating value · Fuel properties · Bulk density

Highlights

- Briquettes from banana peels, sugarcane bagasse, coconut shells and rattan waste
- Proximate analysis by ASTM and CEN Standards
- Mass reduction of raw materials during briquetting process
- Thermo-chemical characteristics of briquettes

✉ Bill Vaneck Bot
bbillvaneck@yahoo.fr

¹ Laboratory of Energy, Materials, Modelling and Methods, Higher National Polytechnic School, University of Douala, PO Box 2701, Douala, Cameroon

² Laboratory of Thermal and Environment, Advanced Teacher's Training College for Technical Education, University of Douala-Cameroon, PO Box 1872, Douala, Cameroon

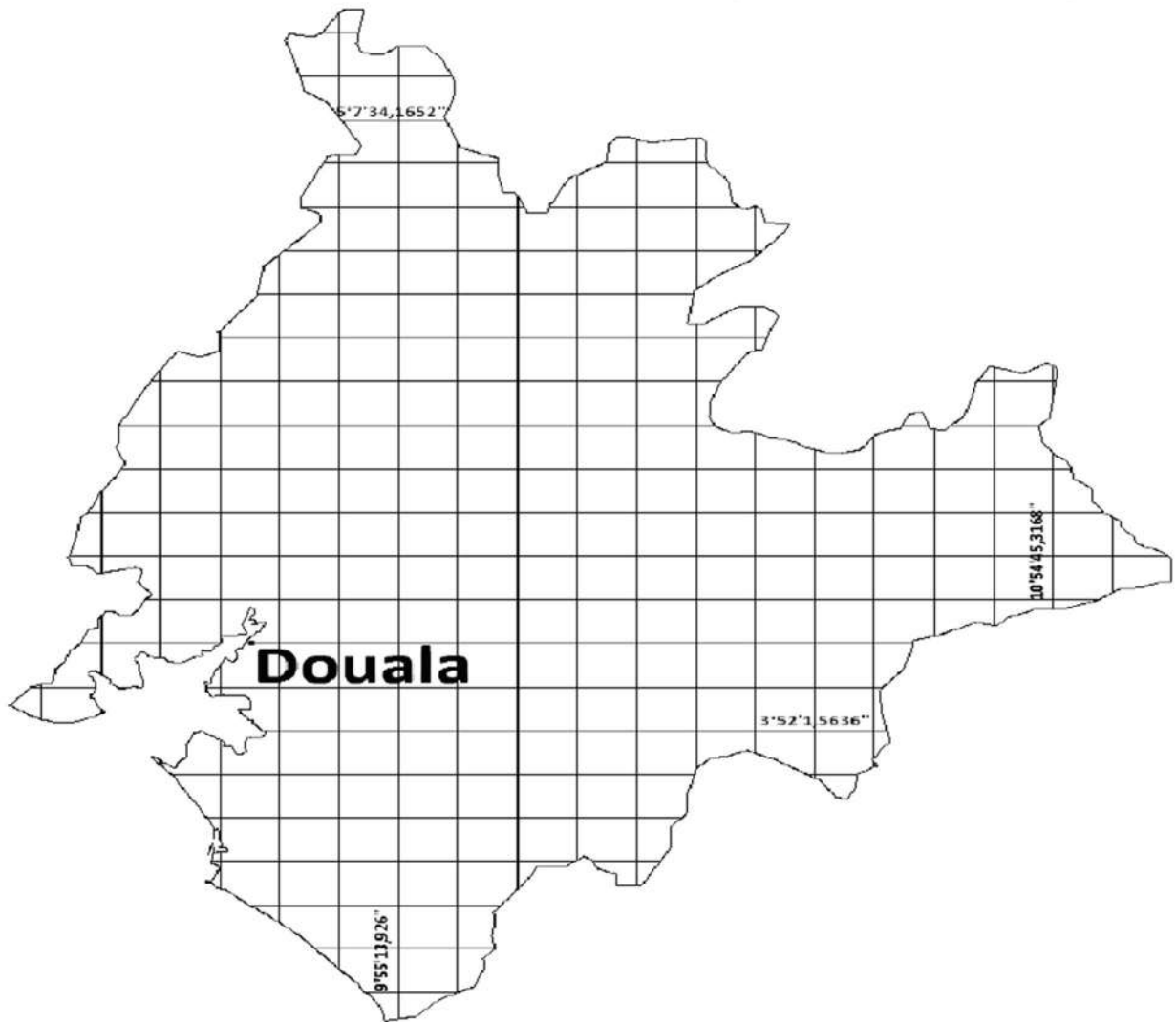
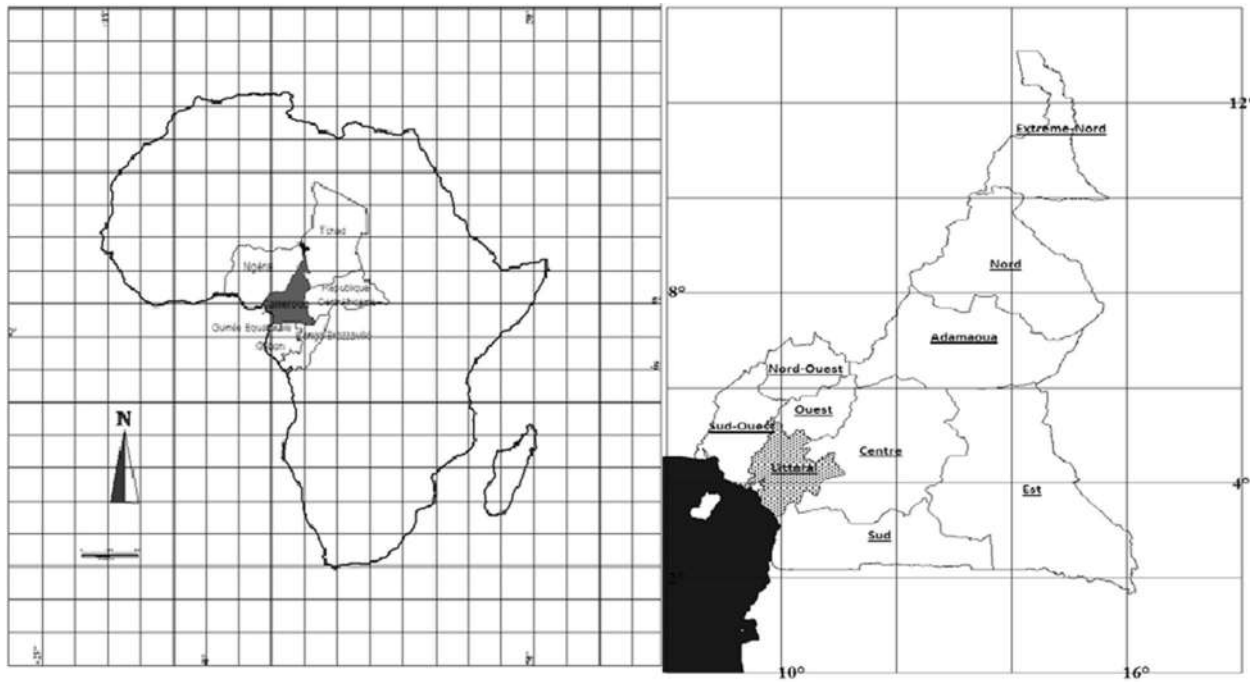
³ Department of Thermal and Energy Engineering, University Institute of Technology, University of Douala, PO Box 2701 Douala, Cameroon

⁴ Department of Thermal and Energy Engineering, University Institute of Technology, University of Ngaoundere, PO Box 455 Ngaoundere, Cameroon

1 Introduction

Fuelwood is the main source of cooking and represents 72.61% of total energy consumption in Cameroon [1, 2]. The use of fuelwood is a cause of increasing deforestation rate, which leads to a serious ecological problem such as climate change, increased drought and desertification. Energy is crucial for fulfilling household needs and allowing industry and commercial trade [3], but access to modern energy is still low in Cameroon [1]; an alternative form of energy needs to be sourced and developed effectively. Biomass presents a good potential for the future because it is eco-friendly in contrast to fossil fuel. Biomass which is the third global primary energy source in the world refers to biodegradable organic materials from plant, animal, residues from agricultural and forestry activities, non-fossil municipal and industrial wastes [4, 5].

The use of biomass for energy production is one way to ensure energy supply; agricultural biomass residues become a promising choice. Even if the exact quantity of waste generated in developing countries is difficult to determine, and some studies stated that numerous agricultural residues and



◀**Fig. 1** Location of study area

wastes are generated but are poorly used and badly managed, since most of these wastes are left to decompose or burnt in the field resulting in environmental pollution and degradation [6]. However, scientific studies have concluded that these residues have a lot of potential energy and can partially help to reduce fossil fuel demand [7, 8]. According to recent studies in Cameroon, the national average production rate of solid domestic waste is 0.6 kg per person and per day with a percentage of 51 to 77.4% of organic materials [9]. Looking more specifically, large municipalities such as Douala and Yaoundé generate a lot of raw biomass materials more than other town [10, 11]. These so-called wastes generally end up being dumped in waterways, in ditches, in the yard, buried in the ground or cremated.

Among the organic waste, several have interesting characteristics for the production of eco-friendly fuel briquettes. The choice of raw materials used for the preparation of ecological charcoal is therefore guided initially by the energy potential of the waste selected and also by availability. For these reasons, the residues of banana peels, sugar cane bagasse, coconut husks and rattan have been chosen as feedstock for the manufacture of ecological briquettes charcoal in this work. Indeed, these residues have significant energy potential such as coconut shells [12]; moreover, they are available in Cameroonian territory such as banana peels and sugarcane bagasse [13]. The process of manufacturing bio-fuel briquettes goes through several stages, namely drying, carbonizing, crushing, mixing with the addition of a binder, briquetting and finally drying of the briquettes.

Cameroon is a sub-Saharan African country, located in Central African region with a total surface area covert estimated at 475,440 km² located in the Gulf of Guinea (3° 40'–4° 11' North and 9° 16'–9° 52' East). As illustrated in Fig. 1, Douala located in Littoral region is recognized as the economic capital of Cameroon and the main business centre and the most industrialized city in central Africa. The climate is of the particular equatorial type called “Cameroonian” marked by a lengthy rainy season (at least 9 months), abundant rainfall (about 4000 mm per annum) and high and stable average annual temperatures (26.7 °C) [14].

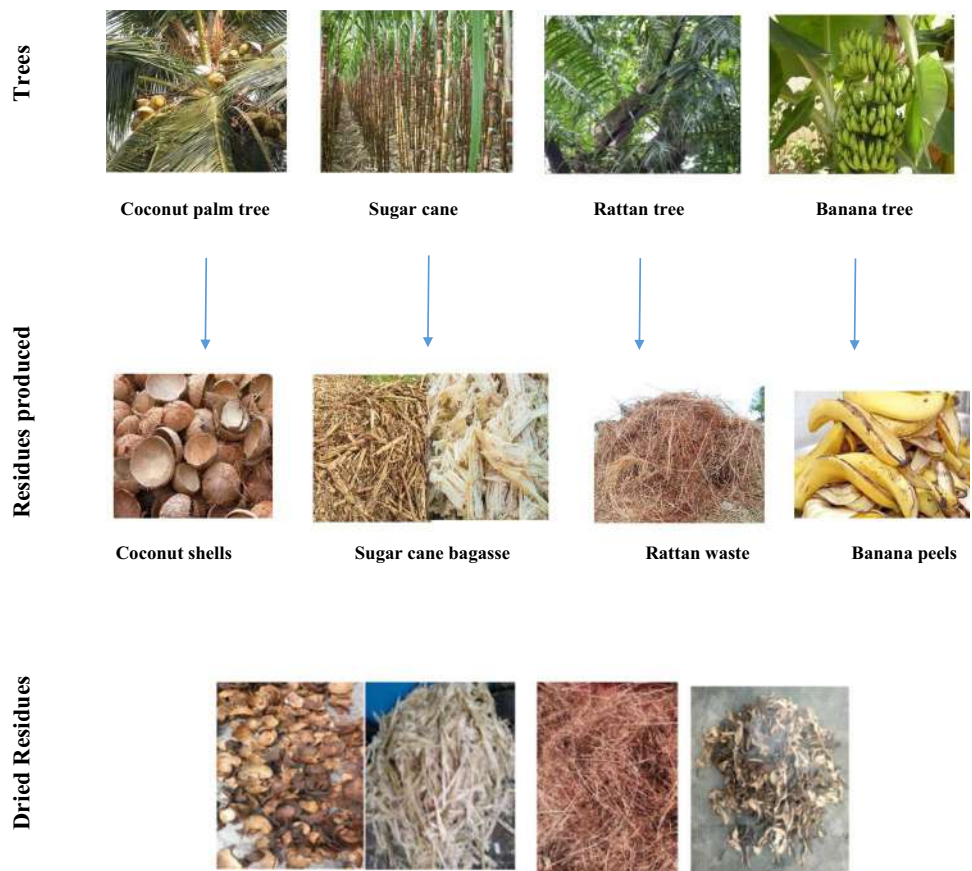
The production of the agricultural sector has registered an increasingly important growth rate for a decade. Government policy intends to significantly boost this agricultural production with the mechanization of crops, especially food crops. Major agricultural produce in the country include *banana*, *sugarcane*, *coconut* and others [13, 15]. Banana/plantain is one of the most important food crops in the country. Cameroon is only 17th in production in Africa, but the annual coconut's production of 5.22 kton is quite high and shell production ratio is 60 per cent [16]. Annual production of sugar

cane in Cameroon is 1450 kton, and total annual amount bagasse derived is 343.5 kton [16]. In Cameroon, rattan is the predominant material in the art and crafts of basketry. Even if there is no data at all for Cameroon, it is known that there are thousands of rattan operators in the south part of Cameroon. Obviously, during the basketry process, waste is produced. Figure 2 illustrates the presentation of coconut, rattan, banana and sugar cane trees, their edible parts and the residues exploited for the manufacture of briquettes.

Although some small companies produce briquettes with the limited resources available from banana peels, coconut shells, sugarcane bagasse and others, no scientific studies have been recorded in Cameroon about the briquetting of agricultural biomass; characterization of briquettes produced is needed. Climatic and hydrogeological conditions vary from a region to another and influence the properties of agricultural waste [17, 18]. As a result, there will be a variation in the properties of the briquettes produced.

In other developing countries, various types of waste have been used in order to develop biomass briquettes such as wheat straw [19], rice straw and husk [20], waste paper and admixture of coconut husk [21] and maize cob [22]. Other materials can be used like banana leaves [23, 24], rice straw and rice ban [25], coffee residues and eucalyptus leaves [26]. Other appreciable works about valorisation of agro-waste have been done by Lubwama and Yiga who demonstrated the use of groundnut shell and bagasse briquettes for cooking purposes [27]. Jamradloedluk and Sawadogo proposed development of biomass briquette from rice straw, rice husk and bagasse cashew nut in developing countries [28, 29]. More recently, Guo and Chungcharoen studied characteristics of charcoal briquettes made from wheat straw, maize straw and rice straw [30], cashew nut shells and areca nut shells [31]. In some developing countries, researches have been done on the briquetting of banana peels, coconut shells and sugarcane bagasse. In Thailand, Wilaipon studied the briquetting pressure of banana peels using molasses as binder [32], Mopoung studied the effect of clay on properties of briquette made from banana peels [33]. Thulu investigated on combustion characteristics of fuel briquette from banana peels mixed with sawdust [34]. Dzedzic evaluated the impact of grinding coconut shells and agglomeration pressure on characteristics of fuel briquettes made from coconut shells in Poland [35]; Jamilu investigated on the properties of briquettes made from coconut shells [36] in Nigeria. Teixeira demonstrated that sugarcane bagasse fly ash can be used to produce briquettes with average properties [37], Smith evaluated briquettes from urban pruning residue and sugarcane bagasse [38], and Setter concluded that sugarcane bagasse presents average adequate properties for energy goals [39]. Some studies have shown that the quality and burning performance of briquettes also depend on the binders chosen to facilitate particle cohesion during

Fig. 2 Agricultural residues formation from rattan, coconut, sugarcane and banana



Agricultural residues obtained after sorting, reduction of size and drying

compaction [17]. Briquette binder plays an important role in the briquetting process; a lot of binders have been tested such as asphalt, starch, microalgae, sewage sludge, okra stem gum, molasses, cow dung, waste paper pulp, sulfonate salts, clay, wood ash, rice dust, sawdust, soybean residue and paper pulp [15, 17, 18, 40]. Guojie Zang et al. concluded that organic binders have many excellent advantages [41]. It has been widely reported that cassava starch is an effective binder material; Lubwama and Sawadogo have produced briquettes with satisfying properties using this binder [28, 42].

This work is part of the ongoing efforts applied to the geo-specific characterization of briquettes for sustainable energy development. Also, no real study has been undertaken and documented in the literature on characterization of briquettes made from rattan waste, but since they are plant bark residues, they could be used to produce good-quality briquettes. Furthermore, this study recommends the production of briquettes using cassava starch as binder in contrast to previous studies on the same residues which used clay, molasses or cassava husks. This study also offers the particularity to evaluate the mass of briquettes that can be produced depending on the quantity and type of agricultural residues used.

This paper aims to present a conventional process of preparation of briquette biofuel from four types of agricultural residues, coconut shell, sugar cane bagasse, banana peels and rattan waste used separately and assess on mass rate losses and some physical properties such as calorific values, humidity, ash content, volatile matter content, moisture content and percentage content of fixed carbon of the briquettes produced in Douala-Cameroon.

2 Materials and methods

2.1 Briquettes preparation

2.1.1 Raw materials

Coconut shell, sugar cane bagasse, banana peels and rattan waste were collected from areas in Douala, Littoral Region's Cameroon from January to February 2020; 100 kg of each agricultural residue was collected. The last two rows of Fig. 2 present a sample of raw materials.

2.1.2 Preparation process

Figure 3 presents briquetting process. Before carbonization, raw materials underwent a pre-treatment consisting of sorting and size reduction and then sun-drying for 4 days in an ambient atmosphere (32–34 °C). The raw material biomass was carbonized using the conventional drum method. Carbonisation or slow pyrolysis is carried out at a temperature of 400 °C.

The ameliorated carbonizer’s design proposed by [4] is a simple cylindrical design made to provide a means of creating low oxygen environment. At the start of the carbonization process, the lid was left open for approximately 15 min for the volatile gases to escape. The lid was then closed, thereafter properly sealed to prevent air from entering. The biomass material was left to carbonize during 45 min for coconut shell, 35 min for sugar cane bagasse, 15 min for banana skin and 40 min for rattan waste. The fully carbonized material was collected for further step which is crushing. The carbonised material is then ground to a particle size of less than 5 microns in order to achieve good-quality mixing and compaction.

The process of mixing therefore requires the binder to be mixed with the charcoal fines. The mixing was done with a mixer powered by an engine making a rotating movement for 20 min from which we could be sure that the material is homogeneous. The resulting powdered charcoal is mixed with water and a binder in clearly defined proportions (10%

of binder-water and 90% for raw materials) according to [27]. The binder used here is cassava starch because of its physicochemical characteristics, its availability in the local market and its low price [43]. The starch-mixed carbonized material was pressed in a manual paralepipedal moulds with a pressure of 6 MPa for 10 s; the moulded briquettes were placed on clean aluminium trays and were sun dried for 3 days at ambient atmosphere (32–34 °C) in order to produce it in dried form. During the briquetting process, a weighing of materials is carried out at the end of each process step using a digital scale. Figure 4 shows a sample of the dried briquettes.

2.2 Determination of physical and combustion characteristics

Density is an important property of the solid fuel. High-density products are desirable in terms of transportation, storage and handling. The bulk density of briquettes was determined from calculating the ratio of the mass to the volume of briquette in accordance with the method used. The mass was obtained by using a digital weighing scale model EK5150, with a maximum capacity of 5 kg, dimensions of 20×16×7 cm and accuracy of 1 g/0.1 oz. The volume was calculated by taking the linear dimensions (length, breadth and thickness) of the briquette by means of a digital caliper with a measuring range from 0 to 150 mm and a resolution

Fig. 3 Briquetting process [4]

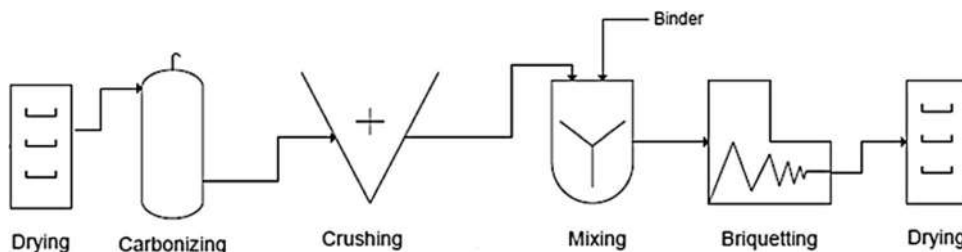


Fig. 4 Sample dried biomass briquettes developed



value of 0.01 mm. Three samples were tested for each experiment, and the average density was reported.

The calorific value of briquette determines the amount of heat energy present in the material. The calorific value was determined using a bomb calorimeter model GDY-1A + of temperature resolution 0.001 K, pressure endure 20 MPa and repeatability error less than 0.2% in accordance with American Society for Testing and Materials Standard [44]. About 0.4 g of each sample was burnt in the bomb calorimeter until complete combustion was obtained.

The percentage volatile matter (PMV) was determined using the European Committee for Standardization method [45] CEN/TS 15,148 by pulverising 2 g of the briquette sample in a crucible and placing it in an oven until a constant weight was obtained. The briquettes were then kept in a furnace at a temperature of 550 °C for 10 min and weighed after cooling in a desiccator.

The percentage ash content (PAC) was also determined in accordance to standard [46] CEN/TS 14,775 by heating 2 g of the briquette sample in the furnace at a temperature of 550 °C for 1 h and weighed after cooling in a desiccator to obtain the weight of ash.

The percentage moisture content (PMC) was found using standard CEN/TS 14,774 [47], by weighing 3 g of the briquette sample and oven drying it at 105 °C until the mass of the sample was constant. The change in weight after 16–24 h was then used to determine the sample's PMC.

The percentage fixed carbon of the briquette is a main parameter which represents the percentage of carbon available for char combustion after volatile matter is distilled off and indicates rapid combustion of the fuel briquette. It differs from total carbon which is the sum of the fixed carbon and the carbon contained in the volatilized part. The

percentage fixed carbon (PFC) was computed by subtracting the sum of PVM, PAC and PMC from 100 [48].

Bulk density and combustion characteristic experiments were repeated at triplicate, and the data were analysed using computer software program Statistical Package for Social Sciences (SPSS) version 20.0. The statistical analysis was performed using an analysis of variance with a significance level of 0.05.

3 Results and discussion

This section presents results of the mass reduction of the biomass materials during the briquetting process; results of the physical characterisation and proximate analysis of briquettes are also presented.

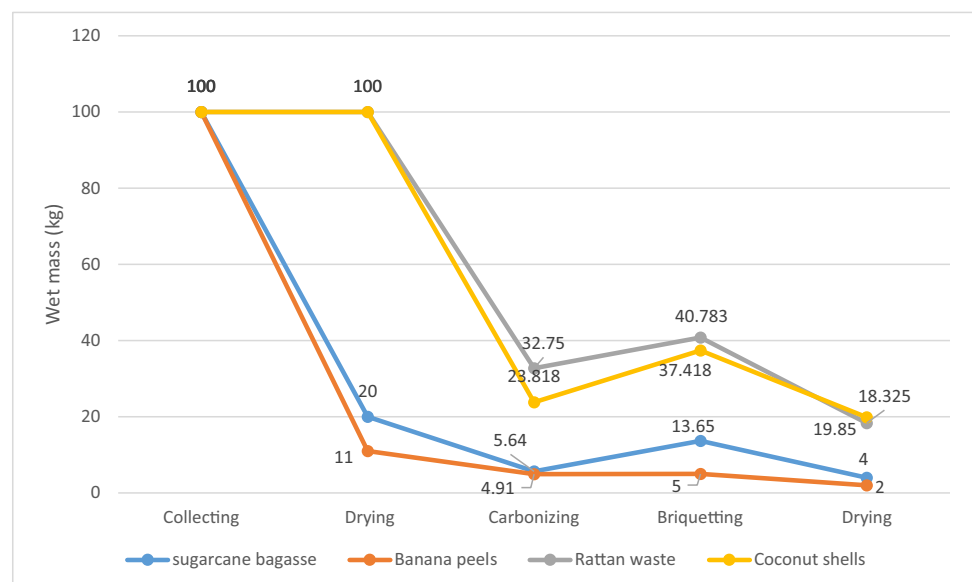
3.1 Wet mass reduction

Figure 5 shows the reduction of wet mass of rattan waste, coconut shells, sugarcane bagasse and banana peels during the preparation process. The mass of biomass was weight at each step of process.

Rattan waste and coconut curves show that the final mass of briquettes made from rattan waste is 18.32 kg, while the initial mass of residues was 100 kg, i.e. a total loss of 81.67% while the rate of loss in mass of coconut shells is 80.15%.

The mass evolution of these two raw materials is quite similar; at the end of drying, the mass of the residues remained almost the same. This is due to the fact that the said waste is naturally dry and contains very little humidity. At the end of the carbonization, the residues undergo the greatest loss of mass of the whole preparation process;

Fig. 5 Mass reduction of the four raw materials during preparation process



the rates of loss in mass are 76.18% and 67.25% for the coconut shells and waste from rattan respectively. At the end of this second step, the mass of charred coconut shell residue is slightly less than the charred rattan waste product. This is undoubtedly due to the high hydrogen, oxygen and nitrogen content in coconut shells which are removed during charring. The carbon content in rattan waste is higher because it is residue from branches that have absorbed carbon during photosynthesis. At the end of the briquetting, it can be seen that the mass of the wet briquettes has almost increased by 50%; this is due to the addition of the binder during mixing. During the last step of drying, the briquettes produced, and approximately half of their weight is lost.

The mass evolution curves of banana peels and sugar cane bagasse are quite similar; during drying, the banana peels lost 89% of their mass, and the sugarcane bagasse lost 80%; this is the stage during which the residues undergo the greatest loss of mass of the entire manufacturing process. This is due to the natural level of moisture in these residues. At the end of the carbonization, it is observed that the mass of the carbonized residues represents about a quarter of the mass of the residues introduced into the carbonizer, i.e. 5.64 kg for the banana peels and 4.91 kg for the sugar cane bagasse. This may be because the two wastes have almost the same levels of hydrogen, oxygen and nitrogen removed during this step. At the end of briquetting, it can be seen that the mass of the wet briquettes made from banana peels has increased slightly while those of sugar cane bagasse have doubled due to the addition of the binder during kneading. During the last step, which consists in drying the briquettes produced; the briquettes of banana peels lost 59.11% of their initial mass while that of sugar cane bagasse is 70.6%.

3.2 Physical and combustion characteristics

Table 1 presents the results of bulk density and proximate analysis of fuel briquette produced in our study and some literature results.

Table 1 Result of bulk density and combustion characteristics

| Raw materials | Bulk density (g/cm ³) | Moisture content (%) | HCV (MJ/kg) | LCV (MJ/kg) | Ash content (%) | Volatile matter (%) | Fixed carbon (%) |
|--------------------|-----------------------------------|----------------------|------------------------|-------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| Banana peels | 0.678 | 7.64 ~ 15 [32] | 16.983 ~ 24.64 [32] | 16.813 | 11.95 35.52 [33] | 60.92 ~ 26 [33] | 19.49 ~ 37 [33] |
| Rattan waste | 0.793 | 5.57 | 30.077 | 30.031 | 7.44 | 68.12 | 18.87 |
| Coconut shells | 0.851 1.12 [37] | 4.33 | 32.169 | 32.1 | 10.02 26 [37] | 70.50 | 15.15 |
| Sugar cane bagasse | 0.470 0.845 [38] | 5.97 10.8 [38] | 25.938 25.551 [37] | 25.872 | 11.511 | 63.54 | 18.98 |

3.2.1 Bulk density

In view of results given in Table 1 in the first column, comparison between these briquette's densities indicated that coconuts shells had the higher density (0.851 g/cm³) followed by rattan waste with 0.793 g/cm³. Then, briquettes made from banana peels had a density of 0.678 g/cm³ and density of those made by sugar cane bagasse which was 0.470 g/cm³. In general, charcoal produced from agricultural waste biomass has low density (0.76–1.80 g/cm³) [49], and the results of our bulk density of rattan and coconut shells fall within the range recommended. Banana peels and sugarcane bagasse have low bulk density due to the nature of residues. Indeed, it has been stated that density of biomass briquettes depends on density of the original biomass materials; these results agree with literature which stated that the density of biomass briquettes depends on the density of the original biomass [50].

3.2.2 Moisture content

In view of these results, it appears that charcoal briquettes made from banana peels contain more water (7.64%) than others. This may be due to the presence of excess fat and collagen substances in the skin, then come those made from coconut shells (4.33%) then those of sugar cane (5.97%) and finally those of rattan (5.57%). These values are good for storability, and combustibility of briquette according to [51] agrees well with literature [52] which recommends of 5–10% moisture content for good-quality briquettes made from agricultural waste. These results obtained are also corroborated by [48] who reported that a lower moisture content implies a higher calorific value. Briquettes from banana peels and sugarcane bagasse developed in this study have greater moisture content than those prepared by Wilaipon (15%) and Smith (10.8) respectively [32, 38].

3.2.3 Volatile matter

Results reported that the least volatile matter content (60.92%) was obtained from banana peel briquettes whereas

the highest volatile matter content (70.50%) was obtained from the coconut shells; this implies more energy will be required to burn off the volatile matter before the release of heat energy of coconut shells. High volatile matter content is an indication of the readiness of fuel samples to ignite. In terms of quality of the briquette, the high volatile matter implied that the briquette would readily ignite with a high proportionate flame during combustion [53]. This high value of volatile matter is corroborated by [48] who reported that biomass generally has high volatile matter around 70–86%.

3.2.4 Fixed carbon

Generally, it was observed that the lower the fixed carbon content, the briquettes tend to be harder, heavier and ignites much easier. Banana peels and sugarcane bagasse have the highest percentage fix carbon of 19.49% and 18.98% respectively. The lowest carbon content was observed in rattan waste and coconut shells as 18.87% and 15.15% respectively. The fixed carbon of briquettes produced was in the range of 15.15–19.49%; these values are similar to that of cashew nut shells and areca nut shells 17.23–20.62%, [31] and sawdust charcoal briquette (20%) [48].

3.2.5 Ash content

As reported, the results of ash content of briquette made from rattan waste are the lowest, and the ash content of banana peels is the highest. Even if tolerance level of ash content for fuel is below 4% [54], it is reported that charcoal produced from agricultural waste biomass has high ash content (9.4–22.1%) [49], and the results of ash content of briquette made from coconut shells and sugarcane bagasse fall within the range recommended.

3.2.6 Calorific values

It is immediately observed that energy values released by coconuts are higher than the others, which implies that its heat of combustion is high compared to others; however, access to coconut waste is not at all obvious; on the other hand, those of banana peels are weak. Usually, the biomass materials used in the briquetting process have low calorific values [55]. The calorific value of briquette made by sugarcane bagasse produced here is corroborated by [29] and [37] who stated that CV of briquette made by sugarcane bagasse is in the range within 22.6 MJ/kg–29.08 and 25.551 respectively. Calorific values of coconut shells, rattan waste and sugarcane bagasse are greater than other biomass raw materials such as cashew nut shells (20.18 MJ/kg) and areca nut shells (16.17 MJ/kg). The calorific value of briquette made from banana peels is less interesting than those produced by Wilaipon [32].

Because of their chemical properties, initial density and natural moisture content, sugarcane bagasse and banana peels are not suitable for producing large quantities of eco-friendly charcoal briquettes. As a large part of their mass is volatilized during the manufacturing process, the briquettes produced from these two types of agricultural residues need a good amount of energy to ignite, and they will not deploy a large amount of calorific energy during combustion because of their high ash content and low calorific value. In view of all this, it does not seem interesting to valorise these residues. Statistics figures demonstrate the large amount of agricultural residues available and should encourage the use of these wastes for briquetting [13, 16, 56], at least in the production areas where there is a shortage of cooking fuel. However, the difficulties of optimising the quantity of briquettes produced and acquiring the most suitable briquetting equipment should be overcome. On the other hand, coconuts shells offer a better rate in terms of quantity of briquettes produced due to the fact that the said waste is naturally dry and contains very little humidity. Moreover, these residues allow the production of briquettes with good storability, good combustibility and high heat of combustion better than the other three. The annual quantity of coconut shells produced in Cameroon is 3.13 kton [16]; this quantity is not negligible, but the installation of a briquetting industry based only on the exploitation of coconuts shells could cause a shortage of raw materials. The solution would be to mix with another residue such as banana peels. The results of the analysis of briquettes made from rattan waste confirm the hypothesis that this agricultural waste is a good candidate for briquetting. Its physicochemical properties are interesting, and the rate of mass loss is relatively low. It remains to be seen whether this tree is available in quantity and quality in Cameroon and in other countries.

4 Conclusion

The objective of this study was to produce briquettes from banana peels, coconut shells, rattan waste and sugarcane bagasse, assesses mass reduction and determines bulk density and proximate characteristics of biofuel briquette in Douala-Cameroon. The results of mass change assessment of raw materials show that the weight of briquettes obtained represents 2.02% of initial residues for banana peels and 4% for sugarcane bagasse, while coconut shells and rattan waste lost 81.67% and 80.15% of their weight during briquetting process respectively. Results of characterization show that bulk density of briquettes made is in the range 0.470–0.851 cm³/g; calorific values are respectively 16.98, 30.07, 32.16 and 25.93 MJ/kg for banana peels, rattan waste, coconut shells and sugarcane bagasse; volatile matter values are in range 60.92–70.50%, and the values of ash and

moisture content corroborate those of the literature. Physical and proximate analysis results show that it is possible to produce briquettes with satisfactory physicochemical parameters using feed-stock chosen. Given the mass change results and statistics figures in Cameroon, banana peels and sugarcane bagasse are more available but have higher mass losses, whereas coconut husks are less available and have low mass losses and better combustion characteristics, so mixing the raw materials can be recommended in order to balance and ensure continuous production. Further work could focus on ultimate analysis and determination of the physico-mechanical characteristics of briquettes produced from feed-stock chosen or on the valorization of other agricultural residues available in the study area.

Acknowledgements The authors thank the Kemit Ecology technical team which offered material support for the preparation of fuel briquettes, more especially Muller NANDOU and Joseph DASSI for their training during the work. The authors are grateful to the Chemical Engineering Laboratory of University of Ngaoundere which allowed to make a part of the analysis.

Declarations

Conflict of interest The authors declare no competing interests.

References

- Tamba JG (2017) An analysis of Cameroon ' s energetic system, 2001–2010, Energy Sources, Part B Econ. Planning, Policy 12(3):216–222. <https://doi.org/10.1080/15567249.2015.1060547>
- Tchatat G (2014) Cameroun – Contribution a La Preparation Du Rapport National Pour La Formulation Du Livre Blanc Regional Sur L'Acces Universel Aux Services Energetiques Integrant Le Developpement Des Energies Renouvelables Et De L'Efficacite Energetique. Cameroon 1–245, http://www.se4all.org/sites/default/files/Cameroon_RAGA_FR_Released.pdf. Accessed 18 Feb 2021
- Pratiwi S, Juerges N (2020) Review of the impact of renewable energy development on the environment and nature conservation in Southeast Asia, *Energy. Ecol Environ* 5(4):221–239. <https://doi.org/10.1007/s40974-020-00166-2>
- Zubairu A, Gana SA (2014) (2014) Production and characterization of briquette charcoal by carbonization of agro-waste. *Energy and Power* 4(2):41–47. <https://doi.org/10.5923/j.ep.20140402.03>
- Demirbaş A, Şahin-Demirbaş A, Hilal Demirbaş A (2004) Briquetting properties of biomass waste materials. *Energy Sources* 26(1):83–91. <https://doi.org/10.1080/00908310490251918>
- Jekayinfa SO, Omisakin OS (2005) The energy potentials of some agricultural wastes as local fuel materials in Nigeria
- Fapetu OP (2000) Management of energy from biomass. *Niger J Eng Manag* 1(1):14–19
- Karimibavani B, Sengul AB, Asmatulu E (2020) Converting briquettes of orange and banana peels into carbonaceous materials for activated sustainable carbon and fuel sources. *Energy Ecol Environ* 5(3):161–170. <https://doi.org/10.1007/s40974-020-00148-4>
- Sotamenou J (2010) Le compostage: une alternative soutenable de gestion publique des déchets solides au Cameroun, Thèse de Doctorat Université de Yaoundé
- Mbue IN et al (2015) Municipal solid waste generation, composition, and management in the Douala municipality, Cameroon
- Ngnikam E, Naquin P, Oumbe R, Djietcheu KB (2017) Evolution des caractéristiques des déchets solides ménagers dans la ville de Yaoundé au Cameroun (1995–2015). *Rev Sci Tech Forêt Environ Du Bassin Du Congo* 8:45–56
- Bridgeman TG, Jones JM, Williams A (2010) Overview of solid fuels, characteristics and origin. *Handbook of Combustion* 4:1–30
- I. N. de la statistique INS, (2017) Chapitre 13 : AGRICULTURE. 184–207
- Din N, Priso RJ, Kenne M, Ngollo DE, Blasco F (2002) Early growth stages and natural regeneration of *Avicennia germinans* (L.). Stearn in the Wouri estuarine mangroves (Douala-Cameroon). *Wetl Ecol Manag* 10(6):461–472. <https://doi.org/10.1023/A:1021351707822>
- Barrimi M et al (2013) Biosolids and microalgae as alternative binders for biomass fuel briquetting. *Encephale* 53(1):59–65. <https://doi.org/10.1016/j.encep.2012.03.001>
- Mboumboue E, Njomo D (2017) (2018) Biomass resources assessment and bioenergy generation for a clean and sustainable development in Cameroon. *Biomass Bioenerg* 118(August):16–23. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.08.002>
- Olugbade T, Ojo O, Mohammed T (2019) Influence of binders on combustion properties of biomass briquettes: a recent review. *Bioenergy Res* 241–259. <https://doi.org/10.1007/s12155-019-09973-w>
- Kiran EU et al (2014) Bioconversion of food waste to energy: a review Esra Uckun Kiran. *Fuel* 134:1–22
- Demibras A (1999) Physical properties of briquetting from wheat straw mixture . *Energy Convers Manag* 40:437–445
- Pathak and Singh (2000) Husk utilized as fuels, AMA, Japan 19. 65 – 70.
- Olorunnisola AO (2007) Production of fuel briquettes from waste paper and coconut husk admixtures. *Agric Eng Int CIGR Ejournal Manuscript EE 06 006*. 9 1–11
- Wilaipon P et al (2007) Physical characteristics of maize cob briquette under moderate die pressure. *Am J Appl Sci* 4(12):995–998
- Wilaipon P et al (2008) Density equation of bio-coal briquettes and quantity of maize cob in Phitsanulok Thailand. *Am J Appl Sci* 5(12):1808–1811
- De Oliveira Maia B, Souza O, Marangoni C, Hotza D, De Oliveira A, Sellin N (2014) Production and characterization of fuel briquettes from banana leaves waste. *Chem Eng Trans* 37:439–444. <https://doi.org/10.3303/CET1437074>
- Chou C-S, Lin S-H, Lu W-C (2009) Preparation and characterization of solid biomass fuel made from rice straw and rice bran. *Fuel Process Technol* 90(7–8):980–987
- Shiferaw Y et al (2018) Conversion of coffee residue waste and Eucalyptus globulus leaf extract into an alternative solid fuel, *Energy Sources. Part A Recover Util Environ Eff* 40(7):780–786. <https://doi.org/10.1080/15567036.2018.1463309>
- Lubwama M, Yiga VA (2018) (2018) Characteristics of briquettes developed from rice and coffee husks for domestic cooking applications in Uganda. *Renew Energy* 118:43–55. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.003>
- Sawadogo M, Tanoh ST, Sidibé S, Kpai N, Tankoano I (2018) Cleaner production in Burkina Faso: case study of fuel briquettes made from cashew industry waste. *J Clean Prod* 195:1047–1056
- Jamradloedluk J, Wiriyampaiwong S (2007) Production and characterization of rice husk based charcoal briquettes. *Eng Appl Sci Res* 34(4):391–398

30. Guo Z et al (2020) Characteristics of biomass charcoal briquettes and pollutant emission reduction for sulfur and nitrogen during combustion. *Fuel* 272 (March) 117632. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117632>
31. Chungcharoen T, Srisang N (2020) Preparation and characterization of fuel briquettes made from dual agricultural waste: cashew nut shells and areca nuts. *J Clean Prod* 256:120434. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120434>
32. Wilaipon P (2009) The effects of briquetting pressure on banana-peel briquette and the banana waste in northern Thailand. *Am J Appl Sci* 6(1):167–171. <https://doi.org/10.3844/ajas.2009.167.171>
33. Mopoung S, Udeye V (2017) (2017) Characterization and evaluation of charcoal briquettes using banana peel and banana bunch waste for household heating. *Am J Eng Appl Sci* 10(2):353–365. <https://doi.org/10.3844/ajeassp.2017.353.365>
34. Thulu F, Kachaje O, Mlowa T (2016) A study of combustion characteristics of fuel briquettes from a blend of banana peelings and saw dust in Malawi, vol. 4, no. 3, pp. 135–158
35. Dziedzic K, Mudryk K, Hutsol T, Dziedzic B (2018) Impact of grinding coconut shell and agglomeration pressure on quality parameters of briquette. *Eng Rural Dev* 17:1884–1889. <https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N461>
36. Tanko J, Ahmadu U, Sadiq U, Muazu A (2020) Characterization of rice husk and coconut shell briquette as an alternative solid fuel. *Adv Energy Convers Mater* 2(1):1–12. <https://doi.org/10.37256/aecm.212021608>
37. Teixeira S, Pena A, Miguel A (2010) Briquetting of charcoal from sugar-cane bagasse fly ash (scbfa) as an alternative fuel. *Waste Manag* 30(5):804–807. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.01.018>
38. Smith AK, Alesi LS, Varanda LD, D. d. Silva, L. Santos, and F. Yamaji, (2019) Production and evaluation of briquettes from urban pruning residue and sugarcane bagasse. *Rev Bras Eng Agric e Ambient* 23(2):138–143. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n2p138-143>
39. Setter C, Sanchez Costa K, Pires de Oliveira T, Farinassi Mendes R (2020) The effects of kraft lignin on the physicochemical quality of briquettes produced with sugarcane bagasse and on the characteristics of the bio-oil obtained via slow pyrolysis. *Fuel Process Technol* vol. 210, no. August, p. 106561. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106561>
40. Yank A, Ngadi M, Kok R (2016) Physical properties of rice husk and bran briquettes under low pressure densification for rural applications. *Biomass Bioenerg* 84:22–30. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.09.015>
41. Zhang G, Sun Y, Xu Y (2017) (2018) Review of briquette binders and briquetting mechanism. *Renew Sustain Energy Rev* 82(January):477–487. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.072>
42. Lubwama M, Yiga VA (2018) Characteristics of briquettes developed from rice and coffee husks for domestic cooking applications in Uganda. *Renew energy* 118:43–55
43. Sawadogo M, Tchini Tanoh S, Sidibé S, Kpai N, Tankoano I (2018) Cleaner production in Burkina Faso: case study of fuel briquettes made from cashew industry waste. *J Clean Prod* 195:1047–1056. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.261>
44. ASTM (2012) Standard test method for gross calorific value of refuse-derived fuel by the bomb calorimeter. ASTM Standard E711–87, <http://ia600806.us.archive.org/23/items/gov.law.astm.e711.1987/astm.%0Ae711.1987.pdf>. Accessed 2 Dec 2020
45. CEN (2009) Solid biofuels - method for the determination of the content of volatile matter, CEN/TS 151
46. CEN (2009) Solid biofuels - Determination of ash content
47. CEN (2005) Solid biofuels - methods for the determination of moisture content - oven dry method - part 2: total moisture - simplified method
48. Akowuah JO, Kemausuor F, Mitchual SJ (2012) Physico-chemical characteristics and market potential of sawdust charcoal briquette. *Int J Energy Environ Eng* 3(1):20
49. Zandersons J, Kokorevics J, Gravitis A (1999) Studies of bagasse charcoal briquetting, reduction of the ash content in charcoal, and preliminary material and energy estimations for the design of a pilot plant of bagasse charcoal. *UNU/IAS Work Pap No. 58, Latv State Inst Wood Chem* 18 1– 33
50. Demirbaş A, Şahin A (1998) Evaluation of biomass residue 1. Briquetting waste paper and wheat straw mixtures. *Fuel Process Technol* 55(2):175–183. [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(98\)00041-1](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(98)00041-1)
51. Wamukonya B, Jenkins L (1995) Durability and relaxation of sawdust and wheat-straw briquettes as possible fuels for Kenya. *Biomass Bioenergy* 8(3):175–179
52. Pallavi A, Srikantaswamy S, Kiran V (2013) Briquetting agricultural waste as an energy source. *J Environ Sci Comput Sci Eng Technol* 2:160–172
53. Ajimotokan H, Ehindero A, Ajao K, Adeleke A, Ikubanni P, Shuaib-Babata Y (2019) Combustion characteristics of fuel briquettes made from charcoal particles and sawdust agglomerates. *Sci African* 6 <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2019.e00202>
54. Grover PD, Mishra SK (1996) Biomass briquetting: technology and practices. Regional wood energy development programme in Asia GCP/RAS/154/NET, Field document No. 46. *Reg Wood Energy Dev Program Asia*, no. 46, pp. 1–48, doi: Field Document No.46
55. Rieschel H (1977) Various types of briquetting presses and their applications. *Inst Briquet Agglom Montr* 1977
56. MINADER (2012) *Annuaire des Statistiques du Secteur Agricole Campagnes 2009 et 2010. Dir des Enquêtes des Stat Agric*

Publisher's note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.