UNIVERSITÉ DU BURUNDI
GRENIER DU SAVOIR DU BURUNDI
Dépôt institutionnel officiel
https://repository.ub.edu.bi

Contribution à l'étude du potentiel de la valorisation des cendres de briquettes de biomasse dans la fertilisation des sols

Itangivyiza, Yves; Sous la direction de : Prof. David Nahimana

2024
UB, FS
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/1671

Document téléchargé depuis le **Grenier du Savoir du Burundi** — https://repository.ub.edu.bi

UNIVERSITÉ DU BURUNDI

FACULTE DES SCIENCES

MASTER EN SCIENCES ET GESTION INTEGREE DE L'ENVIRONNEMENT

_____

« Contribution à l'étude du potentiel de la valorisation des cendres de briquettes de biomasse dans la fertilisation des sols. »

Par Yves ITANGIVYIZA

MÉMOIRE

Présenté et défendu en vue d'obtention du

Diplôme de Master en Sciences et Gestion Intégrée de l'Environnement.

Spécialité : Eau et Assainissement

_____

Sous la direction de : **Prof. David NAHIMANA**

Bujumbura, Décembre, 2024

LES MEMBRES DU JURY

Président : Dr. NTAKIYIRUTA Pierre

Secrétaire : Prof. BIGUMANDONDERA Patrice

Membre : Dr. RUCAKUMUGUFI Daniel

Directeur de mémoire : Prof. NAHIMANA David

DEDICACES

A mon épouse,

A mes chers parents,

A mes frères et sœurs,

A tous ceux qui m'ont soutenu,

Je dédie ce mémoire.

REMERCIEMENTS

À l'issue de ce travail de recherche, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon Directeur de mémoire, Professeur David NAHIMANA, pour son accompagnement constant, sa rigueur scientifique et ses précieux conseils. Ses orientations éclairées et sa disponibilité ont été essentielles à la réussite de ce travail. Merci de m'avoir guidé avec bienveillance et exigence tout au long de ce travail.

Je tiens à exprimer mes remerciements aux professeurs qui m'ont enseigné et à tout le personnel académique de l'Université du Burundi qui ont contribué de manière significative à mon parcours de Master. Par leur engagement et leur expertise, ils m'ont offert un encadrement de grande qualité, favorisant mon épanouissement intellectuel et professionnel.

Je remercie également le laboratoire de l'ISABU pour sa contribution inestimable dans le travail d'analyse des briquettes et des cendres de biomasse. Son expertise a été d'une grande aide pour les résultats de cette recherche.

Mes sincères remerciements s'adressent aussi aux différentes institutions étatiques, entreprises privées et organisations qui ont accepté de participer aux enquêtes et aux entretiens visant à dresser l'état des lieux de l'utilisation des briquettes de biomasse au Burundi. Leur collaboration et leurs partages d'informations ont été d'une grande valeur pour l'avancée de cette étude.

À toutes ces personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'aboutissement de cette recherche, je leur exprime ma plus sincère reconnaissance.

RESUME

Cette étude examine le potentiel des cendres des briquettes de biomasse comme amendement minéral pour la fertilisation des sols agricoles au Burundi. Avec l'augmentation de l'utilisation des briquettes de biomasse, l'intérêt pour leurs résidus, les cendres, a crû. L'objectif est de dresser un état des lieux de leur utilisation, de déterminer le taux de cendres et d'analyser leurs caractéristiques physico-chimiques.

Des formulaires d'enquêtes et des fiches d'entretient ont permis de collecter des informations sur l'état des lieux de l'utilisation des briquettes au Burundi auprès des différents acteurs. La détermination du taux de cendres a été effectuée selon le protocole de la norme ISO 18122. Les analyses physico-chimiques pour les différents paramètres ont été réalisées au laboratoire.

Les résultats montrent que l'utilisation des briquettes au Burundi prend de l'ampleur et montrent un taux de cendres élevé de 39,4 %, confirmant leur potentiel de valorisation. Les analyses révèlent que ces cendres contiennent des nutriments essentiels, notamment du potassium (1,59%), du phosphore (0,765 %) et du calcium (0,489 %), avec un pH alcalin de 10,1, ce qui pourrait corriger l'acidité des sols, un problème courant au Burundi.

Cependant, leur faible teneur en carbone organique (0,45%) et en azote (0,115%) limite leur capacité à enrichir le sol. Néanmoins, leur richesse en sels minéraux et leur potentiel d'ajustement du pH en font un atout pour la croissance des cultures dans des sols déficients. Des recherches complémentaires sont nécessaires pour évaluer leurs impacts à long terme et définir des pratiques agricoles optimales.

Mots clés : Briquettes, biomasse, cendres, fertilisation.

ABSTRACT

This study examines the potential of ash from biomass briquettes as a mineral amendment for fertilizing agricultural soils in Burundi. With the increasing use of biomass briquettes, interest in their residues, the ashes, has grown. The aim is to assess their utilization, determine the ash content, and analyze their physicochemical characteristics.

Survey forms and interview sheets were used to collect information on the current state of briquette use in Burundi from various stakeholders. The ash content was determined according to the ISO 18122 standard protocol. The physico-chemical analyses for the various parameters were carried out in the laboratory.

The results show that the use of briquettes in Burundi is growing. They also show a high ash content of 39.4%, confirming their potential for valorization. The analyses reveal that these ashes contain essential nutrients, notably potassium (1.59%), phosphorus (0.765%), and calcium (0.489%), with an alkaline pH of 10.1, which could correct soil acidity, a common issue in Burundi.

However, their low organic carbon content (0.45%) and nitrogen content (0.115%) limit their ability to enrich the soil with organic matter. Nevertheless, their richness in mineral salts and their potential to adjust pH make them an asset for crop growth in deficient soils. Further research is needed to evaluate their long-term impacts and to define optimal agricultural practices.

Key words: Briquettes, biomass, ashes, fertilization.

TABLE DES MATIERES

LES MEMBRES DU JURY ..... **i**
DEDICACES ..... **ii**
REMERCIEMENTS ..... **iii**
RESUME ..... **iv**
ABSTRACT ..... **v**
TABLE DES MATIERES ..... **vi**
LISTE DES TABLEAUX ..... **viii**
LISTE DES FIGURES ..... **ix**
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS ..... **x**
AVANT-PROPOS ..... **xi**
INTRODUCTION GENERALE **1**
I. GENERALITES SUR LA VALORISATION DE LA BIOMASSE ET LA FERTILISATION **5**
I.1. Gestion des déchets solides municipaux 5
I.2. La gestion des déchets dans une économie circulaire 10
I.3. Utilisation des briquettes dans le monde 12
I.4. Les fertilisants 17
I.5. Potentiel des cendres issues de la combustion de la biomasse dans la fertilisation des sols. 21
II. MATERIEL ET METHODES **24**
II.1. Collecte de données sur l'utilisation des briquettes de biomasse au Burundi 24
II.2. Détermination du taux de cendres des briquettes de biomasse 25
II.3. Détermination des caractéristiques physico-chimiques des cendres des briquettes de biomasse. 28
II.3.1. Analyse du Carbone organique 28
II.3.2. Analyse de l'Azote 32
II.3.3. Analyse du Phosphore 34
II.3.4. Analyse du Calcium et du Potassium 36
II.3.5. Détermination du pH 39
III. RESULTATS **40**
III.1. Etat des lieux de l'utilisation des briquettes au Burundi 40

III.2. Taux de cendres des briquettes de biomasse et caractéristiques physico-chimiques des cendres des briquettes de biomasse 48

IV. DISCUSSION DES RESULTATS 49

CONCLUSION GENERALE 52

REFERENCES 56

ANNEXES 61

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Existence d'une Réglementation Nationale sur la Gestion des Déchets (Kaza et al., 2018). 8
Tableau 2: Importations d'engrais au cours des années 2018, 2019, 2020, 2021 et 2022 (BRB, 2022). 20
Tableau 3: Résumé des résultats de l'enquête auprès des producteurs de briquettes de biomasse..... 44
Tableau 4: Caractéristiques physico-chimiques des cendres des briquettes de biomasse. 48

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Briquettes de biomasse. 15
Figure 2: Programme de chauffage. 27
Figure 3:Charbon de briquettes broyées. 27
Figure 4: Capsule contenant l'échantillon dans le four. 27
Figure 5: Appareil de distillation 34
Figure 6: Photo des réactifs utilisés dans les analyses 34
Figure 7: Titrage avec la solution d'EDTA 0.01 M 38
Figure 8: Pesée d'un échantillon de cendres de briquettes de biomasse. 38
Figure 9: Matières premières utilisées dans la production des briquettes de biomasse. 40
Figure 10: Méthodes de production des briquettes de biomasse. 41
Figure 11: Types de liants utilisés pour la production des briquettes de biomasse. 41
Figure 12: Capacité de production des briquettes de biomasse. 42
Figure 13: Finalité de la production des briquettes de biomasse. 42
Figure 14: Les principaux défis pour la production des briquettes de biomasse. 43
Figure 15: Solutions mises en place par les organisations productrices de briquettes pour relever les défis. 43
Figure 16: Perspectives des organisations productrices de briquettes de biomasse. 44
Figure 17: Durée d'utilisation des briquettes de biomasse. 45
Figure 18: Principales motivations pour l'utilisation des briquettes de biomasse. 46
Figure 19: Défis liés à l'utilisation des briquettes de biomasse. 47
Figure 20: Gestion des cendres par les utilisateurs des briquettes de biomasse. 47

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

ADEME: Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

ADB: Agence de Développement du Burundi

BRB: Banque de la République du Burundi

COS: Carbone Organique du Sol

DSM: Déchets Solides Municipaux

FAO: Food and Agriculture Organization

FDNB: Force de Défense Nationale du Burundi

FOMI: Industrie de Fertilisants Organo-Minéraux

IFDC: International Fertilizer Development Center

ISABU: Institut des Sciences Agronomiques du Burundi

KAGE: Kaze Green Economy

MINEAGRIE: Ministère de l'Environnement, de l'Agriculture et de l'Élevage

OMD: Organisation Mondiale des Douanes

PIB: Produit Intérieur Brut

PND: Plan National de Développement

PNIA: Plan National d'Investissement Agricole

PNSEB: Programme National de Subvention des Engrais

POP: Polluants Organiques Persistants

SETEMU: Services techniques Municipaux

UNCCD: United Nations Convention to Combat Desertification

UNEP: United Nations Environment Program

UNIDO: United Nations Industrial Development Organization

AVANT-PROPOS

La problématique de la gestion durable des ressources naturelles et de l'optimisation des déchets issus de la biomasse constitue un enjeu majeur dans le contexte actuel de transition énergétique et d'agriculture durable. Ce travail de recherche, intitulé "Contribution à l'étude du potentiel de la valorisation des cendres de briquettes de biomasse dans la fertilisation des sols", s'inscrit dans cette dynamique en explorant les possibilités d'utilisation des cendres de briquettes de biomasse comme amendement agricole au Burundi.

L'objectif de cette recherche est de mieux comprendre la composition physico-chimique des cendres issues de la combustion des briquettes de biomasse et d'évaluer leur potentiel en tant que fertilisant naturel. À travers cette étude, nous espérons contribuer à la promotion de solutions innovantes et durables pour la gestion des déchets de biomasse et l'amélioration de la fertilité des sols.

Ce travail est le fruit de nombreuses réflexions, d'investigations approfondies et de collaborations diverses. Il a bénéficié du soutien de plusieurs personnes et institutions, dont nous tenons à exprimer toute notre reconnaissance.

Nous espérons que cette étude apportera une contribution utile à la recherche scientifique et ouvrira la voie à de nouvelles perspectives pour la valorisation des déchets organiques dans une optique d'économie circulaire et de développement durable.

INTRODUCTION GENERALE

La perte de fertilité des sols est un problème mondial aux conséquences étendues. Selon la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification, 20 à 40 % de la superficie totale des terres dans le monde est touchée par la dégradation des sols et cela a un impact direct sur près de la moitié de la population active mondiale et concerne les terres cultivées, les terres arides, les zones humides, les forêts et les prairies (UNCCD, 2017). La FAO estime que 90 % de la couche arable de la Terre pourrait être menacée d'ici 2050. La couche arable est essentielle pour soutenir la croissance des plantes et fournir des éléments nutritifs essentiels (FAO, 2020).

Au Burundi, le secteur agricole connaît des défis non négligeables. Il s'agit entre autres d'une densité élevée de la population occasionnant une forte pression sur les ressources naturelles, l'inaccessibilité des intrants agricoles et d'élevage due au faible pouvoir d'achat des producteurs, une faible capacité technique et technologique des acteurs du secteur, une forte pression parasitaire sur les cultures et les animaux d'élevage, un manque de financement du monde rural, une insuffisance d'infrastructures de stockage, de transformation et de commercialisation des intrants et des produits agricoles et animaux, une faible organisation des acteurs, et le changement climatique (MINEAGRI, 2018) .

Le rapport cartographie de l'acidité et de la fertilité des sols au Burundi montre que la majorité des sols au Burundi (73 %) sont fortement à très fortement acides (pH $\leq$ 5,5). Cela représente une superficie de 1 651 625 hectares avec un potentiel agricole, qu'ils soient cultivés ou non. Les zones les plus touchées par l'acidité sont la crête Congo-Nil, les plateaux centraux et les escarpements de Mumirwa. La plaine de l'Imbo et les dépressions du nord sont moins acides; ces deux zones présentent des niveaux élevés de Ca et de Mg. Pour ce qui est des teneurs en carbone organique du sol, au niveau du Burundi, 78% des sols ont des valeurs comprises entre 1 et 3,5% dont 40% ont des valeurs de 2 à 3,5 % de teneur en COS. La crête a des valeurs de COS plus élevées avec 93 % des sols ayant des teneurs moyennes à élevées. Les dépressions de l'est ont des valeurs de COS plus faibles (avec 70% des sols avec des faibles à très faibles) suivies par la plaine de l'Imbo. Le Mumirwa, les plateaux centraux et les dépressions du Nord ont des valeurs intermédiaires. La déficience en phosphore est répandue dans tout le pays, aggravée par l'érosion. Cette carence affecte 98,8 % des terres agricoles. La déficience en potassium (K) est enregistrée sur 52,2 % des

terres, probablement en raison de l'érosion, de la lixiviation et de l'absorption par les cultures. Les bases échangeables présentent des teneurs faibles en Ca, Mg et K ou sont en ratios déséquilibrés. Certaines régions nécessitent de la chaux calcaire, tandis que d'autres requièrent l'ajout de chaux dolomitique (MINEAGRI, 2022).

Face à cette situation, la promotion des initiatives visant d'une part à prévenir la perte de la fertilité et d'autre part à améliorer la structure et la richesse des sols sont une priorité pour un pays comme le Burundi dont le secteur primaire représente 38% du PIB national (BRB, 2022), offre 84% d'emplois, fournit 95% de l'offre alimentaire et constitue le principal pourvoyeur de biomasse et de matière première à l'industrie agro-alimentaire. Pourtant, le secteur est caractérisé par une faible productivité mise en exergue par des rendements largement inférieurs à leurs niveaux potentiels et malgré les interventions réalisées pour booster la production, des défis au secteur persistent : la dégradation des sols, le changement climatique et le manque d'accès des agri-éleveurs aux intrants performants figurent parmi les 8 principaux défis du secteur identifiés par le PND (Plan National de Développement du Burundi, 2018).

En vue de relancer la production agricole et d'atténuer le déficit alimentaire, le Gouvernement s'est notamment doté de Plans Nationaux d'Investissement Agricole (PNIA) sur la période 2012-2017, 2016-2020 et 2018-2022, ainsi qu'un Programme National de Subvention des Engrais (PNSEB) et un Programme de Subvention des Semences Sélectionnées. Pour atteindre l'objectif de la Vision 2040 et 2060 relatifs à la sécurité alimentaire qui est projeté de passer de 56,6% à 60,6% en 2027, le taux de croissance des productions vivrières devra passer de 3,86% en 2022 à 10,15% en 2027 soit une progression annuelle moyenne de 2,03%. Parmi les 19 actions principales préconisées par le PND révisé, figure l'amélioration du système d'approvisionnement en intrants agricoles et d'élevage (MFBPE, 2023).

Les initiatives telles que « La cartographie de l'acidité et de la fertilité des sols au Burundi (MINEAGRI, 2022).» mis en œuvre par IFDC, en collaboration avec l'Institut des Sciences Agronomiques du Burundi (ISABU) et le Ministère de l'Environnement, de l'Agriculture et de l'Élevage (MINEAGRIE), la production d'engrais organo-minéraux et de chaux agricole par FOMI Burundi, sont opportunes et à encourager. La gestion des déchets axée sur la valorisation constitue également un secteur à fort potentiel pouvant contribuer dans la production d'engrais

organiques. En 2015, la production journalière des déchets solides municipaux, était estimée à 321 tonnes par jour dont 57% sont des déchets fermentescibles, susceptibles de constituer une matière première pour la production d'engrais organiques (Mizero et al., 2015).

Les initiatives ci-haut citées contribuent à l'achèvement des objectifs du PND dans son orientation stratégique numéro 1, axe d'intervention numéro 1 qui vise le développement de l'agriculture, élevage et le renforcement de la sécurité alimentaire (Plan National de Développement du Burundi, 2018) et des Objectifs globaux du développement durable notamment l'objectif numéro 2 qui vise à éliminer la faim dans sa cible numéro 3 « D'ici à 2030, doubler la productivité agricole et les revenus des petits producteurs alimentaires, en particulier les femmes, les autochtones, les exploitants familiaux, les éleveurs et les pêcheurs, y compris en assurant l'égalité d'accès aux terres, aux autres ressources productives et intrants, au savoir, aux services financiers, aux marchés et aux possibilités d'ajout de valeur et d'emploi autres qu'agricoles.» (IFDD, 2016).

La cendre issue de la combustion de la biomasse renferme des éléments nutritifs précieux pour les plantes. En effet, elle contient une quantité considérable de nutriments essentiels, tels que le potassium, le phosphore, le calcium et le soufre. Ces éléments sont bénéfiques pour la croissance et la santé des végétaux (Godbout et al., 2012).

C'est dans le but de contribuer à trouver des solutions durables pour la fertilisation des sols, que le présent travail s'intéresse à la valorisation des dérivés des briquettes de biomasse comme fertilisant.

Ce mémoire répond aux objectifs suivants :

Objectif général

Contribuer à l'étude du potentiel de valorisation des cendres des briquettes de biomasse dans la fertilisation des sols.

Objectifs spécifiques

- Etablir l'état des lieux sur l'utilisation des briquettes de biomasse au Burundi
- Déterminer le taux de cendres d'une briquette de biomasse
- Dégager les caractéristiques physico-chimiques des cendres des briquettes de biomasse.

Hypothèses de recherche

- La briquette de biomasse possède un taux de cendres assez élevé pour susciter l'intérêt de la valorisation.
- Les cendres issues des briquettes de biomasse présentent des propriétés physico-chimiques caractéristiques d'une matière à fort potentiel pour une utilisation en tant que fertilisant.

A part l'Introduction Générale et la Conclusion, ce mémoire se subdivise en trois chapitres, laa savoir : Chapitre 1 : Généralités sur la valorisation de la biomasse et la fertilisation ; Chapitre 2 : Matériel et Méthode, Chapitre 3 : Résultats, Discussion des résultats et Suggestion.

I. GENERALITES SUR LA VALORISATION DE LA BIOMASSE ET LA FERTILISATION

I.1. Gestion des déchets solides municipaux

Les déchets comprennent tous les objets dont les individus ou les institutions n'ont plus besoin et qu'ils envisagent de jeter ou d'éliminer. Les déchets solides incluent les ordures produites par les bâtiments résidentiels, commerciaux, industriels ou institutionnels, ainsi que par les activités de démolition et les services municipaux. Cependant, cette définition varie considérablement selon les études sur les déchets, et certaines sources sont fréquemment exclues (Ngoc & Schnitzer, 2009).

La croissance démographique a contribué à une forte augmentation de la production de déchets solides municipaux (DSM), ce qui est associé à de graves problèmes environnementaux et de santé publique dans le monde entier (Alfaia et al., 2017).

Annuellement, le monde génère 2,01 milliards de tonnes de déchets solides municipaux, dont au moins 33 % ne sont pas gérés de manière respectueuse de l'environnement. À l'échelle mondiale, la quantité de déchets générés par personne et par jour est en moyenne de 0,74 kilogramme, mais varie considérablement, allant de 0,11 à 4,54 kilogrammes. Bien qu'ils ne représentent que 16 % de la population mondiale, les pays à revenu élevé génèrent environ 34 % des déchets mondiaux, soit 683 millions de tonnes. La région de l'Asie de l'Est et du Pacifique génère le plus de déchets au monde, représentant 23 % du total. Cependant, les régions connaissant la croissance la plus rapide sont l'Afrique subsaharienne, l'Asie du Sud et le Moyen-Orient et l'Afrique du Nord, où, d'ici 2050, la production totale de déchets devrait presque tripler, doubler et doubler respectivement. Dans ces régions, plus de la moitié des déchets sont actuellement déversés à ciel ouvert, ce qui a des implications considérables sur l'environnement, la santé et la prospérité, nécessitant ainsi une action urgente (Kaza et al., 2018).

La gestion des déchets solides est une préoccupation majeure tant dans les pays développés que dans les pays en voie de développement. En effet, le monde s'urbanise à un rythme sans précédent. Ces changements représentent un défi pour les villes, qui doivent gérer les déchets de manière socialement et environnementalement responsable. Dans les pays développés, la gestion des

déchets est généralement organisée de manière formelle au niveau municipal ou régional. Dans les pays moins industrialisés, où les citoyens génèrent moins de déchets, principalement d'origine biogénique, la gestion des déchets est assurée par un mélange d'acteurs formels et informels (Vergara & Tchobanoglous, 2012).

La capacité de gérer une grande quantité de déchets dépend d'un système de collecte efficace. La collecte constitue l'interface entre le producteur de déchets et le système de gestion des déchets, ce qui empêche leur accumulation dans les villes et permet leur traitement. La collecte est généralement la composante la plus coûteuse du processus de gestion des déchets : les villes à revenu intermédiaire consacrent 50 % à 60 % de leurs budgets de gestion des déchets à la collecte, tandis que les villes à faible revenu y allouent environ 80 %.

Le mode de collecte utilisé influence la qualité et la quantité des matériaux récupérés et, par conséquent, « détermine quelles options de gestion des déchets peuvent être utilisées ». Si les déchets sont collectés avec une séparation des matériaux, le traitement de composants similaires est plus faisable et efficace que lorsque les matériaux sont mélangés. Dans les pays industrialisés, de nombreuses villes assurent une collecte séparée pour les déchets destinés à la décharge, pour les produits recyclables et pour les déchets verts. La séparation à la source implique un compromis entre la participation des usagers et un tri efficace : demander aux usagers de trier eux-mêmes leurs déchets augmente la probabilité que les composants des déchets soient traités de manière appropriée, mais leur demander trop d'efforts diminue la probabilité de leur participation (Awasthi et al., 2023).

Les impacts d'une mauvaise gestion des déchets sont graves et touchent de manière disproportionnée les populations les plus pauvres, qui sont souvent mal desservies ou ont peu d'influence sur la manière dont les déchets sont éliminés, que ce soit de manière formelle ou informelle, à proximité de leurs habitations. Une mauvaise gestion des déchets contamine les océans du monde, obstrue les canalisations et provoque des inondations, transmet des maladies par la prolifération de vecteurs, augmente les problèmes respiratoires en raison des particules en suspension générées par la combustion des déchets, nuit aux animaux qui ingèrent les déchets et affecte le développement économique, par exemple par une diminution du tourisme. Les déchets non gérés ou mal gérés, issus de décennies de croissance économique, nécessitent une action urgente à tous les niveaux de la société (Kaza et al., 2018).

Au niveau global, des conventions fournissant un cadre global pour la gestion des déchets dangereux et mettant l'accent sur la réduction de leur production, la gestion écologiquement rationnelle, et la protection de la santé humaine et de l'environnement sont en place :

- Convention de Bâle : Adoptée en 1989 et entrée en vigueur en 1992, cette convention vise à contrôler les mouvements transfrontaliers de déchets dangereux et leur élimination. Elle encourage la réduction de la production de déchets dangereux et promeut leur gestion écologiquement rationnelle.
- Convention de Stockholm : Adoptée en 2001 et entrée en vigueur en 2004, cette convention vise à éliminer ou à restreindre la production et l'utilisation des polluants organiques persistants (POP), qui sont des substances chimiques extrêmement toxiques et persistantes.
- Convention de Bamako: Adoptée en 1991 et entrée en vigueur en 1998, cette convention interdit l'importation de déchets dangereux en Afrique et vise à minimiser et contrôler les mouvements transfrontaliers de ces déchets au sein du continent.
- La convention de Minamata : Traité international visant à protéger la santé humaine et l'environnement contre les émissions et les rejets anthropiques de mercure et de composés du mercure. Adoptée en 2013 et entrée en vigueur en 2017, cette convention tire son nom de la ville japonaise de Minamata, où une grave pollution au mercure a causé des milliers de cas de maladies graves et de décès au milieu du 20ème siècle.

86 % des pays et des économies ont indiqué l'existence d'une loi nationale officielle ou de directives régissant la gestion des déchets solides.

Le tableau qui suit résume le nombre de pays disposant de lois nationales établies ou d'autres cadres directeurs pour la gestion des déchets solides, qui peuvent être soit une réglementation spécifique sur les déchets solides, soit des lois environnementales et urbaines plus larges abordant la gestion des déchets solides. Le Burundi y figure parmi les pays à revenus faible avec des lois ou politiques définies sur la gestion des déchets solides.

Tableau 1: Existence d'une Réglementation Nationale sur la Gestion des Déchets (Kaza et al., 2018).

Groupe de pays par niveau de revenu	Nombre total de pays.	Nombre de pays avec des lois ou politiques définies sur la gestion des déchets solides	Nombre de pays sans lois ou politiques définies sur la gestion des déchets solides	Nombre de pays sans information	Part des pays avec des lois ou politiques définies sur la gestion des déchets solides (pourcentage)
Revenu élevé.	78	75	2	1	96%
Revenu intermédiaire supérieur.	56	47	4	5	84%
Revenu intermédiaire inférieur	53	47	1	5	89%
Revenu faible	30	18	1	11	60%
Total	217	187	8	22	86%

Au Burundi, le problème de la gestion des déchets solides se pose avec acuité. La ville de Bujumbura qui s'étend actuellement sur 14 500 hectares, avec une population qui s'élève autour d'un million d'habitants répartis dans 3 communes et 13 zones (République du Burundi, 2014), connaît une croissance spatiale couplée à une croissance démographique élevée qui s'accompagnent inévitablement d'une production de grandes quantités de déchets surtout dans les ménages . Le manque d'une gestion durable de ces déchets entraine des conséquences lourdes sur l'environnement en général et sur la santé humaine en particulier. Faute de collecte régulière des déchets, les habitants de la ville de Bujumbura, s'en débarrassent en les jetant dans les rues, caniveaux ou rivières affluentes du lac Tanganyika. Malgré leur incapacité à résoudre le problème lié aux déchets, ils sont les premiers à en subir les conséquences: entassement des ordures, odeurs insupportables, multiplication des rats, cafards et mouches autour des décharges à ciel ouvert, contamination des ressources en eau, dégradation des sols et augmentation de la pollution de l'air, provoquant des maladies dangereuses pour ces populations et augmentant leur vulnérabilité aux effets du changement climatique.

En effet, Selon une étude de caractérisation des déchets solides dans la municipalité de Kinama, la majorité des ménages enquêtés, soit 74,58 %, évacuent leurs déchets soit dans les dépotoirs sauvages, soit dans les caniveaux destinés au transport d'eaux pluviales ou dans les ruisseaux (Manirakiza *et al.*, 2023).

Le principe de réduction à la source et la séparation des DSM avant de les orienter dans des filières de traitement spécifique constitue une stratégie de gestion efficace. Sa réussite compte sur une bonne législation mettant en application les codes de l'environnement et de la santé publique, ainsi que le concours et l'implication de tout un chacun. Un circuit de collecte et de stockage séparé doit être mis en place pour favoriser le traitement ultérieur des différentes fractions de déchets solides identifiés. Une campagne de sensibilisation de la population est nécessaire pour informer et former les producteurs de DSM sur les bonnes manières de leur gestion rationnelle (Mizero *et al.*, 2015).

Le cadre légal et règlementaire de la gestion des déchets au Burundi est structuré autour de plusieurs documents clés dont le code de l'environnement, le PND, la Politique Nationale d'Assainissement du Burundi et Stratégie Opérationnelle Horizon 2025, ces documents mettent l'accent sur la gestion durable des déchets solides et liquides, la promotion de l'hygiène, et la réduction de la pollution.

I.2. La gestion des déchets dans une économie circulaire

Portée par les avancées scientifiques et technologiques, l'économie mondiale actuelle, marquée par une augmentation globale de la consommation, dépasse de nombreuses limites planétaires (Rockström et *al.*, 2009). Depuis 2017, la consommation mondiale de matériaux a atteint un pic exceptionnel de 100 milliards de tonnes de matériaux qui depuis entrent chaque année dans l'économie mondiale. Ces matériaux traversent notre économie et nous permettent de maintenir notre mode de vie. Cependant, sur cette quantité massive, seulement 8,6 % sont réintégrés dans l'économie(Organisation Mondiale des Douanes, 2023). Depuis au moins 200 ans, la consommation mondiale et l'utilisation des ressources peuvent être décrites comme un modèle « extraire-produire-Consommer-jeter » : une économie linéaire (Circle Economy, 2021). Des données récentes mettent en évidence l'impact global de ces matériaux sur la société une fois utilisés. Environ 242 millions de tonnes de déchets plastiques sont générées chaque année (Kaza *et al*., 2018), dont 79 % sont mis en décharge (Geyer et al., 2017). Les déchets d'extraction ne cessent d'augmenter, atteignant plus de 100 milliards de tonnes (Charpentier Poncelet et al., 2022). 92 millions de tonnes de déchets textiles provenant de l'industrie de la mode sont incinérées, éliminées ou exportées vers les pays en développement (Niinimäki et al., 2020).

Cette augmentation de la consommation a eu des impacts socio-économiques et environnementaux profonds. La surexploitation, le changement climatique, la pollution, la transformation de l'utilisation des terres et la perte de biodiversité sont devenus des préoccupations internationales majeures. La pollution par les déchets engendre des coûts économiques et environnementaux importants, estimés en 2020 à plus de 21 milliards de dollars US pour la pollution des matières plastiques dans les océans uniquement (McIlgorm et al., 2022).

L'un des résultats de ces tendances a été que la notion de « durabilité » est devenue une priorité mondiale d'ordre social, environnemental et économique, tant pour les gouvernements que pour les organisations internationales et le secteur privé. Les dirigeants ont de plus en plus compris que progresser vers une économie plus durable nécessite une réduction absolue de l'utilisation des ressources à l'échelle mondiale, tandis que le bien-être humain exige l'expansion des activités économiques et la diminution des impacts environnementaux (UNEP, 2011).

Devant l'urgence d'une réflexion sur un usage efficace des ressources, le principe de l'économie circulaire a pris, depuis 2010, une place beaucoup plus large, pour devenir la base d'un cadre politique pour un nouveau modèle de fonctionnement de nos économies. L'économie circulaire s'oppose au modèle classique dit d'économie linéaire (Geldron, 2013). L'économie circulaire est un modèle de production et de consommation qui vise à minimiser les déchets et à maximiser la réutilisation des ressources.

Dans une économie circulaire, les produits sont conçus pour durer, être réparés, réutilisés et recyclés. Les matériaux sont maintenus dans une boucle fermée, ce qui permet de réduire la consommation de ressources naturelles, la production de déchets, les émissions de gaz à effet de serre et à diminuer les risques liés à la chaîne logistique, comme les pénuries de matières premières importées. L'économie circulaire présente de nombreux avantages pour l'environnement, l'économie et la société en favorisant la création des emplois, en stimulant l'innovation et en améliorant la qualité de vie. La transition vers une économie circulaire peut générer des gains économiques substantiels, allant de 4 100 milliards de dollars US dans l'économie mondiale à 965 milliards de dollars US par an dans les seuls pays de l'Union européenne (Organisation Mondiale des Douanes, 2023). Malgré ce potentiel, la transition de l'économie mondiale se fait actuellement dans la mauvaise direction, et peu de flux de ressources sont réintroduits dans l'économie, ce taux étant passé de 9,1 % en 2018 à 8,6 % en 2020. (Circle Economy, 2021)

L'évolution des cadres juridiques d'une économie linéaire vers une économie circulaire est un point critique de cette transition. Le soutien des gouvernements et de la législation sont largement reconnus comme des facteurs clés d'une économie circulaire. L'absence de consensus autour du concept d'économie circulaire peut également avoir laissé place à des interprétations juridiques différentes dans les législations nationales. Aujourd'hui, plus de 520 politiques et règlements promeuvent déjà les objectifs de l'économie circulaire au niveau national ou régional (Barrie et al., 2022), dont près de la moitié visent à améliorer la gestion des déchets et les activités de recyclage. Cette tendance est le reflet de la prise de conscience croissante de plusieurs nations quant à la transition vers une économie circulaire. Dans l'ensemble, de plus en plus de pays proposent des lois sur l'économie circulaire qui traitent de la manière de s'éloigner de l'économie industrielle traditionnelle. Dans la pratique, chaque pays peut avoir une compréhension différente

du concept d'économie circulaire, qui peut à son tour se traduire de multiples façons dans la mise en œuvre des politiques (Organisation Mondiale des Douanes, 2023).

I.3. Utilisation des briquettes dans le monde

En 2022, les températures globales de surface étaient supérieures de 1,15 [1,02–1,28] °C aux températures préindustrielles relevées entre 1850 et 1900, d'après les observations de l'Organisation météorologique mondiale. Ce réchauffement résulte de la croissance de la concentration de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère depuis la période préindustrielle (1750) jusqu'à aujourd'hui : +149 % de dioxyde de carbone (CO_2), +262 % de méthane (CH_4) et +124 % de protoxyde d'azote (N_2O). De tels niveaux de concentration n'avaient pas été observés depuis des centaines de milliers d'années. Entre 2015 et 2022, on a constaté une croissance annuelle cumulée de 7,2% des émissions, dont 88 % issue de la combustion d'énergies fossiles (Observatoire mondial de l'action climat, 2023). Le rapport sur l'écart des émissions du PNUE de 2019 révèle que même si toutes les Contributions Déterminées au niveau National (CDN) inconditionnelles dans le cadre de l'Accord de Paris seraient mises en œuvre, nous resterions sur une trajectoire de réchauffement de 3,2 °C, d'où l'urgence d'accélérer la transition énergétique (UNEP, 2019).

L'utilisation d'énergie renouvelable provenant de la biomasse est l'une des rares technologies prouvées, rentables et disponibles qui peuvent réduire les émissions de CO_2. En effet, parmi toutes les sources d'énergie, la biomasse est la troisième ressource énergétique la plus importante au monde. Elle est également la source d'énergie de cuisson et de chauffage la plus dominante pour les trois quarts de la population des pays en développement, et représente environ 14 % de la consommation énergétique mondiale totale. Dans certains pays, plus de 80 % de la consommation énergétique nationale provient de la biomasse. En Éthiopie, par exemple, la combustion traditionnelle de la biomasse fournit plus de 92 % de la consommation énergétique, plus de 64 % au Ghana, 70 % au Kenya, 78 % au Nigeria, 60 % au Bangladesh, et 7 % de l'électricité au Brésil (Kpalo et al., 2020).

La briquette est un matériau de biomasse compressé pour en faire un combustible solide. La briquette s'est imposée comme une solution plus écologique dans le cadre des initiatives

économiques et stratégiques visant à freiner le réchauffement climatique. La briquette est utilisée dans divers domaines, englobant des applications industrielles et domestiques. Par le passé, l'intérêt pour explorer la briquette comme solution aux problèmes énergétiques était limité en raison de l'abondance des combustibles fossiles. Aujourd'hui, alors que le monde est confronté à une pénurie de combustibles fossiles non renouvelables et à la hausse inexorable de leurs prix, ce changement de contexte a déclenché des tentatives et des efforts pour adopter la briquette comme une alternative énergétique moins coûteuse et durable (Mohd-Faizal et al., 2022).

Des études ont montré que les propriétés de combustion augmentaient de 20 % après que la biomasse ait été moulée en briquettes solides et que les émissions de gaz à effet de serre, de NOx et de SO2 étaient respectivement réduites à un neuvième, un cinquième et un dixième de celles du charbon. Les briquettes sont utilisées aux niveaux domestique et industriel pour la production de chaleur et d'énergie (Chen, 2015).

La qualité des briquettes dépend des matières premières et du processus de briquetage. Elle est évaluée en fonction des paramètres suivant (Aklis et al., 2020) :

- La teneur en matières volatiles qui correspond à un ensemble de substances pouvant s'évaporer suite à la décomposition de composés autres que l'eau contenue dans les briquettes. La teneur en cendres représente la quantité de résidus laissés après le processus de combustion des briquettes. Une teneur élevée en cendres peut réduire le pouvoir calorifique des briquettes, diminuant ainsi leur qualité.
- Le carbone fixe qui est la teneur en carbone restant dans les briquettes après séparation de l'eau, des matières volatiles et des cendres. Le pouvoir calorifique indique la quantité d'énergie thermique produite par le processus de combustion par unité de masse d'un combustible. Ce pouvoir calorifique détermine la qualité d'un combustible : plus il est élevé, meilleure est la qualité de la briquette. Le pouvoir calorifique peut être mesuré par différentes méthodes, dont celle du calorimètre à bombe.
- La teneur en eau désigne la quantité d'eau contenue dans une briquette, exprimée par unité de masse. Cette teneur influe fortement sur la qualité des briquettes : plus elle est faible, plus la valeur calorifique des briquettes est élevée, ce qui améliore leur qualité.

- La densité des briquettes est le rapport entre la densité des briquettes et celle de l'eau (1 g/cm³ ou 1000 kg/m³). La densité spécifique des briquettes affecte leur pouvoir calorifique : plus la densité spécifique est élevée, plus le pouvoir calorifique est important.

Les chercheurs travaillent sur des méthodes d'amélioration de la qualité des briquettes et sur l'utilisation de nouvelles matières premières. L'innovation continue est essentielle pour maximiser leur efficacité énergétique. Les recherches se concentrent sur l'examen de la production de briquettes de biomasse, en mettant en évidence les avantages des briquettes, notamment la régularité des propriétés du combustible, l'amélioration du stockage et du transport et une combustion efficace. Ainsi, Hivilla, et al. (2021) propose l'évaluation expérimentale de divers facteurs affectant la qualité des briquettes. Les variables clés comprennent la granulométrie de la matière première, la pression appliquée, la teneur en humidité, la durée de compactage et le type de liant, la proportion de biomasse, la température de traitement et les prétraitements thermiques pour optimiser les propriétés des briquettes en termes de rendement énergétique et de caractéristiques physiques. Hafizul Islam, et al. (2011) propose l'introduction d'un système de préchauffage de la biomasse avant l'extrusion pour d'une part booster la production et améliorer la qualité des briquettes

La promotion des briquettes de biomasse offre potentiellement de nombreux avantages si elle est correctement gérée. Cela inclut des investissements dans le secteur agricole, des opportunités de développement rural, la création d'emplois et une sécurité et un accès énergétique accrus.

L'industrie des combustibles à base de briquettes de biomasse devrait connaître un fort élan en raison de la sensibilisation croissante des consommateurs et des applications finales en forte croissance.

Selon l'analyse partagée par l'institution de recherche Zion Market Research *(Consulté le 15/08/2024). https://www.zionmarketresearch.com/report/biomass-briquette-fuel-market)*:

- le marché mondial du combustible à base de briquettes de biomasse devrait croître à un taux annuel composé (TCAC) d'environ 7,75 % sur la période de prévision (2023-2030).

- En termes de chiffre d'affaires, le marché mondial du combustible à base de briquettes de biomasse était évalué à environ 832,94 millions de dollars américains en 2022 et devrait atteindre 1 510,36 millions de dollars américains d'ici 2030.
- Le marché du combustible à base de briquettes de biomasse devrait croître à un rythme significatif en raison de la demande croissante en énergie propre.
- Selon la segmentation par application, la production d'électricité devrait détenir la part de marché la plus importante en 2022.



Figure 1: Briquettes de biomasse.

Le Ministère burundais ayant l'Energie dans ses attributions a promu, depuis 2019, un article de la loi budgétaire qui prévoit des mesures incitatives pour encourager l'utilisation de foyers améliorés et de cuisinières propres, soutenant ainsi les efforts vers la transition énergétique. Le Ministère mène chaque année des campagnes de sensibilisation pour promouvoir les énergies de cuisson propres et considère l'exploitation énergétique de la biomasse comme un levier important pour réduire la déforestation. Des initiatives comme le Projet Umuco w'Iterambere et le Projet Soleil Nyakiriza participent également à ces efforts, en augmentant la disponibilité d'énergies renouvelables et d'équipements performants tels que les foyers améliorés.

Dans le cadre de la Politique de l'Énergie et de sa stratégie de mise en œuvre 2022, le Ministère ayant l'Energie dans ses attributions, vise l'amélioration de l'efficacité des foyers et de la qualité des briquettes produites. De plus, cinq organisations productrices de briquettes, telles que KAGE, KTF, JPCO, KIMABU et BIOENERGIE, ont signé des partenariats avec le Ministère pour accroître la production et la qualité de leurs produits.

Le Ministère ayant l'Environnement dans ses attributions encourage les initiatives liées à la production de briquettes de biomasse en élaborant des textes, des stratégies et des politiques favorables à cette industrie. Dans cette perspective, le Burundi prépare un cadre législatif spécifique qui s'inscrira dans le Plan d'action continental pour la promotion de l'économie circulaire. La politique environnementale du pays met également l'accent sur la valorisation des déchets, reconnaissant le potentiel important de cette approche pour le développement durable. Cependant, malgré ces progrès, il manque encore un document spécifique dédié à l'économie circulaire, ce qui limite l'encadrement des initiatives informelles dans ce secteur. Le ministère organise également des événements, tels que la Journée du Recyclage, chaque 18 mars, pour sensibiliser la communauté à l'importance de l'économie circulaire.

Le Ministère ayant le Commerce et l'Industrie dans ses attributions soutient la promotion des briquettes de biomasse, notamment au travers de la mise en place de projets pilotes, tels que celui financé par le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE), visant le renforcement des capacités en gestion des déchets dans le cadre de l'économie circulaire. Ce projet de trois ans inclut la création d'un comité national dédié à la gestion des déchets et la mise en place d'un cadre légal. De plus, dans le cadre de la Politique Nationale d'Industrialisation, la transformation des déchets en produits énergétiques, comme les briquettes de biomasse, est encouragée. Cette politique renforce aussi le développement du biogaz comme alternative à l'utilisation du bois comme énergie ce qui est source d'une déforestation accélérée.

L'Agence de Développement du Burundi (ADB), qui place le secteur des énergies comme prioritaire, permet aux producteurs de briquettes de biomasse de bénéficier des avantages fiscaux et opérationnels du code des investissements. Jusqu'à présent, six organisations productrices des briquettes de biomasse ont pu accéder à ces avantages, leur offrant ainsi un soutien financier et administratif précieux pour se développer.

I.4. Les fertilisants

Les fertilisants, qu'ils soient d'origine minérale ou organique, jouent un rôle crucial dans l'augmentation de la productivité agricole, contribuant ainsi à la sécurité alimentaire mondiale. Les fertilisants améliorent la croissance des plantes en leur fournissant des nutriments et, dans certains cas, en améliorant les propriétés du sol (par exemple, la rétention d'eau, l'aération).

Les trois composants principaux des fertilisants sont les macronutriments (Alnaass et al., 2021)

- L'azote : un composant important de nombreux composés structuraux, génétiques et métaboliques essentiels des cellules végétales. Il est également un élément constitutif fondamental de nombreux composés organiques importants, notamment les acides aminés, les protéines, les acides nucléiques, les enzymes et la molécule de chlorophylle. Parmi tous les nutriments essentiels, l'azote est celui qui limite le plus souvent la croissance des cultures. C'est le nutriment qui produit généralement la plus grande réponse en termes de rendement des cultures, en favorisant une croissance végétative rapide et en donnant à la plante une couleur verte saine.
- Le Phosphore (P) : Nutriment essentiel, à la fois en tant que composant de plusieurs structures végétales clés et en tant que catalyseur de nombreuses réactions biochimiques importantes dans les plantes. Le phosphore joue un rôle crucial dans la capture et la conversion de l'énergie solaire en composés végétaux utiles. Il est un composant de diverses enzymes et protéines, ainsi qu'un élément vital de l'ADN, l'« unité de mémoire génétique » de tous les êtres vivants, et de l'ARN, le composé qui lit le code génétique de l'ADN pour produire des protéines et d'autres composés essentiels à la structure végétale, à la production de graines et au transfert génétique. On peut citer : le développement des racines, le renforcement des tiges, une meilleure formation des fleurs et production de graines, une maturité plus uniforme et précoce des cultures, une capacité accrue de fixation d'azote chez les légumineuses, une amélioration de la qualité des cultures et une résistance accrue aux maladies des plantes.
- Potassium (K) : macronutriment essentiel des plantes, et il est absorbé par les cultures en quantités relativement importantes à partir des sols. Le potassium augmente les rendements et améliore la qualité des produits agricoles. Il renforce également la capacité des plantes

à résister aux maladies, aux attaques d'insectes, au froid, à la sécheresse et à d'autres conditions défavorables. Le potassium favorise également la photosynthèse, processus par lequel les sucres et l'énergie nécessaires au développement des plantes sont formés et convertis. Il régule l'ouverture et la fermeture des stomates des feuilles, qui contrôlent l'état hydrique de la plante. De plus, le potassium joue un rôle essentiel dans la formation de l'amidon, ainsi que dans la production et le transport des sucres. Il est donc particulièrement précieux pour les cultures riches en glucides, telles que la canne à sucre, la pomme de terre et la betterave sucrière.

Trois macronutriments secondaires couramment trouvés dans les fertilisants sont les suivants :

- le calcium (Ca) : Il joue un rôle extrêmement important dans la formation des tissus végétaux et permet aux plantes de mieux se développer. Il est responsable de la cohésion des parois cellulaires des plantes. Le calcium est également essentiel pour activer certaines enzymes et transmettre des signaux qui coordonnent des activités cellulaires spécifiques. Il joue un rôle clé dans le développement normal du système racinaire. De plus, le calcium renforce la résistance des plantes aux agressions extérieures et améliore la valeur nutritive des cultures fourragères pour le bétail.
- le magnésium (Mg) : Indispensable à toutes les cultures pour capturer l'énergie solaire nécessaire à leur croissance et à leur production grâce à la photosynthèse. La photosynthèse se déroule dans la chlorophylle, le pigment vert des plantes, et le magnésium est l'atome central de la molécule de chlorophylle,
- le soufre (S) : un élément essentiel à la formation des protéines, des enzymes, des vitamines et de la chlorophylle chez les plantes. Il joue un rôle crucial dans le développement des nodules et l'efficacité de la fixation de l'azote chez les légumineuses. La synthèse des protéines nécessite de grandes quantités de soufre, notamment pour la formation des huiles dans les graines.

La consommation mondiale d'engrais devrait croître de 2 % au cours de l'exercice 2024 pour atteindre 195,4 Mt. La consommation de N devrait augmenter de 2 % pour atteindre 111,6 Mt, celle de P_2O_5 de 2 % pour atteindre 47,1 Mt, et celle de K_2O de 3 % pour atteindre 36,7 Mt. En conséquence, la consommation de N et de P_2O_5 devrait dépasser leurs niveaux de l'exercice 2019

de 2 % et 1 % respectivement, tandis que la consommation de K_2O devrait rester 2,5 % en dessous de ses niveaux de l'exercice 2019 au cours des deux prochaines années.

L'Amérique latine, l'Asie de l'Est et l'Asie du Sud devraient stimuler la consommation mondiale d'engrais en 2024, représentant deux tiers de la croissance mondiale. En revanche, l'Océanie pourrait connaître une nouvelle année de baisse de la consommation d'engrais en raison de l'impact d'El Niño. L'Afrique devrait être le marché à la croissance la plus rapide en 2024 (+5 %), contribuant de manière significative (10 %) à la croissance mondiale par rapport à sa taille de marché (4 %) (IFA, 2023).

Cependant, l'utilisation massive et continue des fertilisant est source de débats concernant les impacts sur l'environnement et les communautés locales. Les pratiques agricoles durables ont été adoptées à l'échelle mondiale pour réduire les conséquences négatives des engrais chimiques, car ceux-ci provoquent une diminution de la teneur organique des sols ainsi qu'une dégradation de leur qualité. Ils durcissent le sol, réduis sa fertilité, épuisant les nutriments minéraux essentiels, et polluant l'air, l'eau et les sols, diminuent l'activité microbienne dans le système de culture, altèrent le pH du sol, augmentent la résistance des ravageurs, acidifient la croûte du sol, entraînent une diminution de la matière organique et un ralentissant de la croissance des plantes et ils sont à la source des problèmes d'eutrophisation (Chittora, 2023).

Deux grandes voies existent pour limiter la pollution due aux engrais (World Bank, 2018):

- La première consiste à réduire la quantité d'engrais utilisée par les agriculteurs. De nombreuses opportunités existent pour freiner l'utilisation d'engrais sans compromettre les rendements des cultures ou la sécurité alimentaire. En Chine, par exemple, l'utilisation d'azote a été réduite d'environ 4 % à 14 % dans les essais de terrain de maïs, de riz et de blé tout en augmentant les rendements de 18 % à 35 %, grâce à une approche intensive en connaissances de l'agriculture connue sous le nom de gestion intégrée des systèmes sol-culture ou ISSM. Des techniques telles que la fertilisation de précision, qui utilisent des capteurs de sols et des technologies GPS, permettent d'appliquer les fertilisants de manière plus ciblée, réduisant ainsi les pertes et les effets environnementaux négatifs.

- La deuxième voie consiste à limiter la quantité qui s'écoule sans être utilisée par les plantes, y compris en recyclant les nutriments déjà présents dans l'environnement. D'un point de vue technique, cela peut être réalisé par des changements dans le dosage, le moment, les méthodes d'application et les pratiques d'irrigation, ainsi que par des stratégies de gestion des exploitations agricoles. Parmi ces dernières, on trouve l'utilisation de zones tampons, la rotation des cultures et l'aquaculture pour absorber les nutriments excédentaires. Au Bangladesh, ce qui est connu sous le nom de placement profond d'engrais a permis à plus de 2,5 millions d'agriculteurs d'abandonner la méthode traditionnelle de diffusion des engrais, entraînant des réductions notables de l'utilisation d'engrais (25 à 40 %) et des pertes (jusqu'à plus de 50 %). Cette méthode consiste à placer les granulés d'engrais, qui restent en place plus facilement, dans la zone racinaire, près de l'endroit où ils sont nécessaires. Ces pratiques sont encouragées dans le cadre de l'agriculture durable pour maximiser l'efficacité tout en préservant les ressources naturelles.

Au Burundi, les fertilisants classiques proviennent de l'élevage et du compost en plus des engrais minéraux. En matière d'engrais minéraux, le Burundi se trouve largement en deçà des normes recommandées. En effet, de 2002 à 2017, la quantité d'engrais est passée de 1,3 à 12 kg/ha alors que la conférence d'Abuja préconisait d'atteindre 50kg/ha en 2015. En outre, malgré le Programme National de Subvention des Engrais du Burundi (PNSEB), seulement 40,7% des ménages agricoles utilisent des engrais chimiques. La Stratégie Agricole Nationale s'est fixé comme objectif, un minimum de 60000 tonnes d'engrais achetés et utilisés par an (MINEAGRI, 2018).

Les importations d'engrais au cours des récentes années se présentent comme suit :

Tableau 2: Importations d'engrais au cours des années 2018, 2019, 2020, 2021 et 2022 (BRB, 2022).

Années	2018	2019	2020	2021	2022
Q (Tonnes)	62 849	56 292	86 381	56 782	83 501
V (M Bif)	64 536.5	50 746.7	65 634	53 717	155 043

L'importation des engrais coûte cher au trésor public et aux agri-éleveurs. Par ailleurs, ils ne sont pas disponibles en quantité et temps voulus. Pour pallier ces défis, un homme d'affaire,

expérimenté en matière d'importation et de distribution des engrais minéraux a pris l'initiative de créer une usine de production des Engrais Organo-Minéraux appelée « Fertilisants Organo-Minéraux Industries (FOMI) ». Avec une capacité de production potentielle de 600 tonnes d'engrais par jour, l'entreprise propose 4 types d'engrais Organo-Minéraux à savoir :

- FOMI-Totahaza : Un engrais organo-minéral de couverture essentiellement azoté. Il est conçu et produit pour les céréales et les légumes. Sa teneur en éléments nutritifs est: l'azote à 21%, le potassium à 8%, le calcium à 4% et le magnésium à 2%.
- FOMI-Imbura : Un engrais organo-minéral adapté aux conditions des sols tropicaux qui sont généralement acides et pauvres en matières organiques. A la différence des engrais minéraux classiques, FOMI-IMBURA contient : de la matière organique bénéfique à la physico-chimie et à la biologie du sol ; du calcium (Ca) et du magnésium (Mg) en plus des trois éléments majeurs (NPK) essentiels pour la plante. Sa teneur en éléments nutritifs est : 9% N, 22% P_2O_5, 4% K_2O, 13% CaO, 2% MgO.
- FOMI-Bagara : Un engrais organo-minéral de couverture essentiellement potassique. Il est conçu et produit pour les cultures à tubercules. Sa teneur en éléments nutritifs est: l'azote à 11%, le potassium à 22%, le calcium à 4% et le magnésium à 2%.

  Chaux agricole : Un amendement calco-magnésien qui neutralise l'acidité et améliore les propriétés physico-chimiques des sols tout en apportant des éléments nutritifs (Calcium et Magnésium) pour les plantes. Elle est produite à partir des roches dolomitiques extraites des gisements locaux.

  (FOMI. (Consulté le 17/08/2024). *https://fomi.bi/*)

I.5. Potentiel des cendres issues de la combustion de la biomasse dans la fertilisation des sols.

Tout comme la combustion du charbon ou du lignite, la combustion de la biomasse génère des déchets solides, principalement des cendres. La quantité et la qualité de ces déchets dépendent du type de biomasse utilisé. Selon le concept de développement durable et en conformité avec la loi sur les ressources en énergie renouvelable et la protection de l'environnement au sens large, la manière la plus bénéfique d'utiliser les cendres obtenues de l'incinération du bois ou de la biomasse végétale est de retourner le résidu au sol (Wierzbowska et al., 2020).

Les cendres et les produits à base de cendre sont généralement approuvés et conviennent à l'agriculture conventionnelle. Il est aussi question qu'ils soient approuvés pour l'agriculture biologique puisque des fertilisants phosphatés alternatifs y sont très recherchés. Il n'y a pas de restriction pour les cultures. La dose d'apport est généralement basée sur les besoins en Phosphore de la culture en tenant compte de la teneur du sol. Sous forme pulvérulente, l'épandage est impacté par les conditions météorologiques (vent). Si les cendres sont mélangées à un amendement basique, elles sont épandues avec un matériel spécifique des amendements. Après granulation, les produits peuvent être épandus à l'aide d'un épandeur d'engrais traditionnel (Nutriman, 2020).

Les cendres issues de la biomasse peuvent être utilisées comme engrais dans la culture de plantes. Le biochar et les cendres de biomasse, lorsqu'ils sont appliqués à des doses appropriées, ont un effet bénéfique sur les propriétés chimiques du sol, ce qui conduit à une augmentation des rendements des cultures. Des études antérieures ont montré que les cendres de bois/biomasse sont de nature alcaline et peuvent servir de conditionneur efficace pour augmenter le pH du sol, rendant ainsi les sols moins acides. Cependant, l'utilisation de cendres de biomasse dans des sols alcalins peut encore accroître l'alcalinité du sol. Les cendres de biomasse constituent une bonne source de nutriments tels que le calcium, le magnésium, le potassium et le phosphore, ainsi que certains oligo-éléments nécessaires à la croissance des plantes (Chahande et al., 2024).

Cependant, elles contiennent également des traces de métaux lourds qui peuvent menacer l'environnement du sol, ce qui nécessite une prudence quant à leur utilisation. Par conséquent, avant d'utiliser les cendres de biomasse en agriculture, une étude approfondie est nécessaire pour comprendre leurs effets sur différents types de sols et de cultures (Wierzbowska et al., 2020).

L'étude « Recherche Agronomique Suisse (2014) a testé l'utilisation de cendres de bois en guise d'engrais potassique a été testée sur le tournesol. L'essai s'est déroulé en serre à Changins, avec les cendres sous foyer de la centrale à bois Enerbois (Vaud). Ces cendres présentaient des teneurs élevées en Ca et en K mais contenaient également des éléments traces métalliques, notamment du Cu, du Zn et du Ni. Cet essai a mis en évidence une efficience du K contenu dans ces cendres équivalente à celle du KCl utilisé comme engrais potassique de référence. En conditions limitantes en NPKMg, ces cendres ont eu un effet favorable sur la biomasse du tournesol et l'absorption du K, alors que les quantités de Ni et Zn absorbées ont diminué, vraisemblablement en raison de

l'effet négatif du chaulage sur la solubilité de ces éléments. En conditions non limitantes en NPKMg, les mêmes tendances ont été observées sur la biomasse et l'absorption du Ni et Zn. Cet essai a montré que, malgré des teneurs en Ni et Cu supérieures aux seuils actuellement autorisés en Suisse pour l'épandage d'engrais de recyclage, ce sont avant tout les teneurs en K qui limitent la quantité de cendres à épandre.

II. MATERIEL ET METHODES

II.1. Collecte de données sur l'utilisation des briquettes de biomasse au Burundi

Pour atteindre cet objectif, une approche méthodologique en plusieurs étapes a été adoptée, incluant la collecte de données, ainsi que des analyses qualitatives et quantitatives.

Des enquêtes structurées et des interviews semi-structurées ont été menées auprès des principaux acteurs impliqués dans la promotion, production, distribution et utilisation des briquettes de biomasse. Les participants incluent :

- **Producteurs de briquettes** : Pour obtenir des informations sur les méthodes de production, les volumes produits, et les défis rencontrés, 4 organisations impliquées dans la production des briquettes de biomasse au Burundi ont pu répondre à l'enquête à savoir KTF Concept, Kaze Green Economy (KAGE), General Trading Entreprise (GTE) et la FDNB.
- **Utilisateurs finaux** : Pour comprendre les motivations, les avantages perçus, et les obstacles à l'utilisation des briquettes, 10 utilisateurs finaux des briquettes ont répondu à l'enquête, dont 8 ménages et deux institutions dont un restaurant et une maison pour sauna.
- **Institutions publiques concernées :** Pour recueillir des perspectives sur les impacts environnementaux et socio-économiques des briquettes de biomasse, des entretiens ont pu être réalisés avec des responsables au sein du Ministères de l'Hydraulique, de l'Energie et des Mines, du Ministère de l'environnement, de l'agriculture et de l'élevage, du Ministère du Commerce, du Transport, de l'Industrie et du Tourisme et au sein de l'Agence de Développement du Burundi (ADB).

Des visites de terrain ont été effectuées sur des sites de production et des sites d'utilisation des briquettes de biomasse pour observer les pratiques en cours et collecter des données.

Analyse des données

Analyse qualitative : Les données des interviews et des observations ont été analysées à l'aide de techniques d'analyse du contenu pour identifier les thèmes récurrents et les perceptions des différents acteurs.

Analyse quantitative : Les données des enquêtes ont été analysées statistiquement pour quantifier les différents enjeux entrant dans la production des briquettes, l'ampleur de l'utilisation des briquettes de biomasse, et les impacts économiques et environnementaux.

Matériel Utilisé

1. **Questionnaires et Guides d'entretien** :

    1. **Questionnaires** : Conçus pour recueillir des données quantitatives auprès des producteurs de briquettes et utilisateurs de briquettes de biomasse.
    2. **Guides d'entretien** : Utilisés pour des entretiens avec les experts, les institutions publiques.

2. **Outils de collecte de données** :

    3. **Appareil photo** : Pour documenter visuellement les sites de production et d'utilisation.
    4. **Ordinateur portable** : Pour la saisie et l'analyse des données.

II.2. Détermination du taux de cendres des briquettes de biomasse

Echantillonnage

L'échantillon utilisé dans cette étude est une briquette de biomasse fournie par l'usine de production de Kaze Green Economy (KAGE), acteur majeur dans la fabrication de briquettes écologiques au Burundi. Pour garantir son intégrité, l'échantillon a été prélevé directement à l'usine, emballé hermétiquement et transporté vers le laboratoire de l'ISABU.

Protocole

Selon le protocole RAGT Energie MON-ANA-19 & Norme ISO 18122 , pour la détermination du taux de cendre, le combustible est tout d'abord réduit en particules inférieures ou égales à 1 mm de granulométrie et les prises d'essai doivent être de 1 g minimum. Le résultat est exprimé en pourcentage de teneur en cendres sur un combustible sec (masse cendres / masse sèche du combustible).

Matériel

- Four à moufle
- Capsules en porcelaine ou en silice
- Balance analytique
- Dessiccateur
- Pinceau
- Mortier et pilon (en option)

Procédure

Préparation de l'échantillon:

- Broyer l'échantillon en fines particules (inférieures à 1 mm) si nécessaire.
- Homogénéiser l'échantillon broyé.
- Prélever une prise d'essai d'environ 1 g (ou la quantité spécifiée par la norme applicable) et la placer dans une capsule tarée.
- Identifier la capsule avec le numéro d'échantillon et la date.

Pesée et Incinération:

- Prendre une nacelle propre, dépourvue d'humidité et à température ambiante
- **m1** - Peser le plus précisément possible (ex : à 0,001g près) la nacelle vide et noter la masse.
- Placer environ 1g de broyat (si possible, un broyat à 1 mm) dans la nacelle et l'étaler en une couche uniforme.
- **m2** - Peser la nacelle + le broyat et noter la masse
- Laisser refroidir le four à température ambiante.
- Placer la nacelle dans le four froid. Démarrer le programme de chauffe ci-dessous

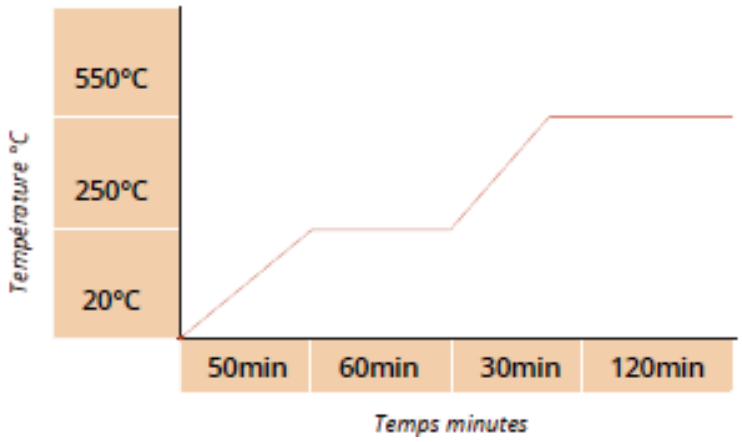


Figure 2: Programme de chauffage.

- Retirer la nacelle du four pour la laisser refroidir pendant 10 min. Puis la transférer dans un dessiccateur et laisser refroidir jusqu'à température ambiante.
- **m3** - Une fois la nacelle refroidie, peser et noter la masse
- **Mad** est la teneur en humidité (exprimée en %)

Calcul du taux de cendres:

Ad est la teneur en cendres sur sec :

$$A_d = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} \times 100 \times \frac{100}{100 - M_{ad}}$$



Figure 3:Charbon de briquettes broyées.



Figure 4: Capsule contenant l'échantillon dans le four.

II.3. Détermination des caractéristiques physico-chimiques des cendres des briquettes de biomasse.

Echantillonnage

L'échantillon utilisé dans cette étude est la cendre de briquette de biomasse fournie par l'usine de production de Kaze Green Economy (KAGE). Pour garantir son intégrité, l'échantillon a été prélevé directement à l'usine, emballé hermétiquement et transporté vers le laboratoire de l'ISABU.

II.3.1. Analyse du Carbone organique

La détermination du carbone organique total (COT) selon le protocole du centre d'expertise du Québec, nous permet d'évaluer la quantité de matière organique présente dans des échantillons de sols et de sédiments. La matière organique amplifie grandement la capacité d'échange cationique du sol et retient les nutriments assimilables par les plantes.

Principe et théorie

Le carbone organique total dans les solides peut être déterminé par titrage. Pour ce faire, une solution de bichromate de potassium est ajoutée à un échantillon en présence d'acide sulfurique. Après la réaction, le dosage de la quantité de bichromate qui n'a pas réagi avec l'échantillon permet d'établir la concentration de carbone organique total.

La présence de tout produit réducteur inorganique peut causer une surévaluation de la valeur de carbone organique total.

Prélèvement et conservation

Prélever un échantillon représentatif dans un contenant de verre exempt de contaminants. Aucun agent de préservation n'est ajouté. Conserver l'échantillon en réfrigérant entre 0 et 6 ºC. Le délai de conservation entre le prélèvement et l'analyse ne doit pas excéder 28 jours.

Appareillage

- Balance analytique dont la sensibilité est de 1mg
- Burette
- Etuve à 104 ^{o}C ± 1 ^{o}C

Réactifs et étalons

Tous les réactifs commerciaux utilisés sont de qualité Abstract Chemical Service (ACS), à moins d'indication contraire. L'eau utilisée pour la préparation des réactifs est de l'eau distillée ou déminéralisée.

Les solutions préparées peuvent être conservées indéfiniment à la température ambiante. Elles doivent cependant être refaites si un changement de couleur est noté ou s'il y a formation de précipité.

- Acide sulfurique, H_2SO_4 (CAS no 7664-93-9)
- Acide phosphorique, H_3PO_4 (CAS no 7664-38-2)
- Bichromate de potassium, $K_2Cr_2O_7$ (CAS no 7778-50-9)
- Sulfate ferreux, $FeSO_4 \bullet 7\ H_2O$ (CAS no 7782-63-0)
- 1, 10 – phénanthroline monohydraté, $C_{12}H_8N_2 \bullet H_2O$ (CAS no 5144-89-8)
- Bichromate de potassium 1 N

Peser exactement environ 49,04 g de $K_2Cr_2O_7$ préalablement séché à 105 °C pendant 2 heures, et dissoudre dans environ 700 ml d'eau. Agiter et compléter à 1 litre avec de l'eau.

- Solution indicatrice de ferroine

Peser exactement environ 1,485 g de 1, 10 – phénanthroline monohydraté et 0,695 g de $FeSO_4 \bullet 7\ H_2O$ et dissoudre dans environ 70 ml d'eau. Compléter à 100 ml avec de l'eau.

- Sulfate ferreux 0,5 N

Peser exactement environ 70,0 g de $FeSO_4 \bullet 7\ H_2O$ et dissoudre dans environ 350 ml d'eau. Ajouter 20 ml de H_2SO_4 et compléter à 500 ml avec de l'eau. Cette solution se conserve un an à la température ambiante.

Préparation de l'échantillon

L'échantillon est homogénéisé manuellement. **L'échantillon ne doit pas être séché à 104 °C afin d'éviter de perdre de la matière organique volatile**. Déterminer le pourcentage d'humidité sur une autre portion de l'échantillon. Utiliser uniquement la portion inférieure à 2 mm pour l'analyse.

Dosage du carbone organique total

- Peser une portion de solide entre 0,25 g et 1,0 g de sol dans une fiole conique de 250 ou 300 ml et y ajouter 10 ml de bichromate de potassium 1 N. Mettre un barreau aimanté dans la fiole.
- Ajouter 20 ml d'acide sulfurique concentré et placer un verre de montre sur la Fiole conique.

Note – Ajouter l'acide sulfurique lentement, car il peut y avoir projection.

- Agiter vigoureusement pendant 1 minute et laisser reposer pendant 30 minutes.
- Rincer le verre de montre et ajouter 150 à 200 ml d'eau déminéralisée, 10 ml d'acide phosphorique concentré et 10 à 15 gouttes de la solution indicatrice de ferroine.

Le point de virage sera plus net avec l'addition de 500 ml d'eau au lieu de 150 à 200 ml; l'utilisation de fiole conique de 500 ml peut être faite en doublant la quantité d'eau ajoutée en autant que le témoin et tous les échantillons soient faits de la même façon.

- Titrer l'excès de bichromate de potassium avec la solution de sulfate ferreux 0,5 N; lors de l'apparition de la coloration turquoise, titrer lentement jusqu'à la coloration finale brune. Noter le volume utilisé.

Préparation d'un témoin :

- Introduire dans un erlenmeyer un barreau aimanté, 10 ml de bichromate de potassium 1 N et 20 ml d'acide sulfurique. Couvrir d'un verre de montre puis agiter vigoureusement pendant une minute avant de poursuivre la procédure décrite aux paragraphes précédents.

Note : Si le titrage prend moins que 4 ml de sulfate ferreux 0,5 N (*i.e.* plus de 80 % de dichromate est réduit), il faut reprendre l'analyse avec un poids moindre d'échantillon. Si le volume de titrant est proche du témoin, prendre une quantité plus importante de sol jusqu'à un maximum d'environ 1,0 gramme. Il est à noter que si le point de virage est dépassé, ajouter 0,5 ml de la solution de dichromate de potassium et poursuivre le titrage (le volume de bichromate est alors de 10,5 ml).

Les résultats sont exprimés en % C. En considérant les concentrations de sulfate ferreux et du bichromate de potassium, chaque ml de bichromate de potassium qui réagit correspond à 4 mg de C. Le pourcentage de carbone dans l'échantillon exprimé en % C est déterminé comme suit :

$$C = \frac{(A - B) \times 10 \times 0{,}004 \times 100}{P \times A}$$ où

C : concentration de carbone organique (% C);

A : volume de sulfate ferreux utilisé pour le témoin (ml);

B : volume de sulfate ferreux utilisé pour l'échantillon (ml);

10 : volume de bichromate ajouté initialement;

0,004 : nombre de g de C par ml de bichromate;

P : poids de l'échantillon titré exprimé sur base sèche (g);

100 facteur pour obtenir un pourcentage.

II.3.2. Analyse de l'Azote

Principe

Selon la méthode Kjeldahl (AOAC, 978.02), l'azote organique (provenant des protéines, des acides aminés ou d'autres composés contenant de l'azote) est transformée en sulfate d'ammonium ($(NH_4)_2\ SO_4$) par l'acide sulfurique en présence de catalyseurs.

Apres refroidissement et dilution de la solution, une aliquote est distillée, (en milieu alcalin) par entrainement à la vapeur. L'ammoniac (NH_3) distillé est recueilli dans un tampon borique additionné d'indicateur et titré, en retour, par l'acide sulfurique (H_2SO_4) de normalité 0.05 et de facteur correctif connu.

Matériel

- Échantillon séché et broyé (passé au tamis de 2 mm)
- Balance analytique (précision de 0.0001 g)
- Pipettes jaugées (10 ml, 25 ml, 50 ml)
- Burette digitale (20 mL)
- Erlenmeyers (250 ml)
- Appareil minéralisateur d'azote de type Kjeldahl
- Appareil de distillation Kjeldahl
- Solution d'acide sulfurique concentré
- Sulfate de potassium
- Sulfate de cuivre
- Sulfate de fer
- Selenium
- Solution d'hydroxyde de sodium 32%
- Solution d'indicateur coloré (mélange de rouge de méthyle et de vert de bromocrésol)

Méthode

Préparation de catalyseur

Peser 100 gr de K_2SO_4, I2.3 gr de $FeSO_4$. $7H_2O$, 7.8 gr de $CuSO_4.5H_2O$. Porter dans un mortier et broyer intimement.

Préparation de l'échantillon:

- Peser 1 g de sol séché et broyé dans un tube à minéraliser de 300mL.
- Ajouter 15 ml d'acide sulfurique concentré et une spatule de mélange catalytique.
- Chauffer le mélange jusqu'à ce que le sol soit complètement digéré, jusqu'à ce que la couleur soit transparente (Minimum 2 heures)
- Laisser refroidir et filtrer la solution dans le jauge volumétrique de 250 ml.

Distillation:

- Pipeter 25 ml de la solution filtrée dans un tube d'eau distillée de volume 300 ml et mettre dans l'appareil de distillation Kjeldahl.
- Ajouter 25 ml d'hydroxyde de sodium 30%.
- Distiller pendant 3 minutes
- Recueillir le distillat dans un erlenmeyer contenant 40 ml d'acide borique avec mélange d'indicateur.

Dosage de l'ammoniaque: Titrer le distillat avec la solution d'acide sulfurique 0.05 N jusqu'à changement de couleur (du vert au rouge). Noter le volume d'acide versé.

Calcul de la teneur en azote: Teneur en N (%) = (1.4008 * V* N* (V1/ V2)) / M

Où : V = Volume d'acide sulfurique versé (ml)

V1 = Le volume (ml) du jaugé (en général 250 ml)

V2 = Le volume (ml) de prise pour analyse (en général 25 ml)

N = Normalité de l'acide sulfurique (gr–eq/l)

M = Masse de l'échantillon de sol (gr)

1.4008 = Masse molaire de l'azote (gr/mol) /10



Figure 5: Appareil de distillation



Figure 6: Photo des réactifs utilisés dans les analyses

II.3.3. Analyse du Phosphore

Principe

Le dosage du phosphore (AOAC, 958.01) est basé sur le principe de la formation du complexe phospho-vanado-molydbique de couleur jaune lu au colorimètre à 420 nm.

Matériel

- Échantillon séché et broyé (passé au tamis de 2 mm)
- Balance analytique (précision de 0.0001 g)
- Pipettes jaugées (2, 5, 10 ml, 25 ml, 50 ml)
- Jauge volumétrique (100 ml)
- Dispensette
- Spectrophotomètre UV visible marque BUO BASE
- Solution d'acide sulfurique concentré
- Solution de molybdate d'ammonium 5%
- Solution d'acide ascorbique 10%
- Solution de phosphate de potassium 1000 mg/L

Méthode

Préparation de l'extrait d'échantillon:

- Les cendres obtenues dans la phase de détermination sont traitées par 7 ml de l'acide nitrique concentré et ajouter 10-15 ml d'eau distillée.
- Laisser digérer ½ heure au bain de sable.
- Enlever et filtrer sur filtre whatmann n°42 sans cendres dans un jaugé de 100 ml.
- Porter le jaugé à volume de 100 ml avec de l'eau distillée

Courbe d'étalonnage

- Pipetter respectivement 0, 2, 5 et 10 ml de la solution à 100 ppm P et porter dans des jaugés de 100 ml.
- Rincer avec de l'eau distillée.
- Ajouter 10 ml de la solution vanado-molybdique
- Porter à volume avec de l'eau distillée
- Boucher et agiter ;
- Lire à 420 nm après ½ heure minimum
- La courbe a les valeurs 0-2-5-10

Dosage du phosphore:

- A partir des solution-mères préparées, diluer les aliquotes, dans les jaugés appropriées, au moyen de pipettes.
- Rincer les jaugés à l'eau distillée au moyen d'un jet de pissette.
- Ajouter une quantité de réactif équivalente au 1/10 de la capacité du jaugé (5 ml pour un jaugé de 50, 10 ml pour un jaugé de 100 ml.)
- Porter à volume avec de l'eau distillée.
- Boucher et agiter
- Lire, après ½ heure minimum, au colorimètre à 420 nm, après avoir tracée la courbe d'étalonnage.
- Noter les résultats et les numéros. Les résultats sont exprimés en ppm de P.

Calcul de la teneur en phosphore:

Teneur en P (mg/kg) = (X*Y*Z)/A

Où :

A = Le poids (gr) de l'échantillon initialement pesé.

X = La concentration (P ppm) lue au colorimètre

Y = La dilution (2, 5, 10, …)

Z = Le volume de la solution mère (100ml)

II.3.4. Analyse du Calcium et du Potassium.

Principe

La détermination des cations (AOAC 965.09), se fait au spectrophotomètre d'absorption atomique où les mesures se font sur un échantillon transformé en gaz atomique. Une température de 2000^{o} à 3000^{o}C permet cette transformation. L'intensité de l'absorption dépend du nombre de particules absorbant la lumière.

Matériel:

- Balance analytique (précision de 0.001 g)
- Pipettes jaugées (10 ml, 25 ml, 50 ml)
- Burets (25 ml, 50 ml)
- Béchers (50 ml, 100 ml)
- Erlenmeyers (250 ml)
- pH-mètre
- Solution d'EDTA 0.01 M
- Solution de tampon pH 7
- Solution de noir d'Eriochrome T
- Solution de chlorure de calcium 1000 mg/L

Méthode:

Préparation des courbes d'étalonnage :

- Préparer 1000 ppm de l'élément à analyser au cas où nous ne possédons pas la solution commerciale 1000 ppm de cet élément.
- Préparer 100 ppm à partir de 1000 ppm, c'est à dire pipeter 10 ml de solution de 1000ppm et les mettre dans un jaugé de 100 ml puis compléter jusqu'au trait de jaugé avec de l'eau distillée. A partir de 100ppm, préparer 10 ppm, c'est à dire pipeter 10 ml de 100 ppm et les mettre dans un jaugé de 100 ml puis mettre à volume avec de l'eau distillée. Cette courbe comprend une gamme de concentration : 0 ; 0.2 ; 0.5 ; 1.0 ; 2.0 ; 5.0 ; 10.0 ; 15.0…. mg/l de l'élément à doser.
- Pour préparer les étalons 0.2 ; 0.5 ; 1.0 mg/l, pipeter la solution de 10 ppm en utilisant les pipettes de 2 ml ; 5 ml ; 10 ml puis ajouter du chlorure de lantane (1/10 du jauge utilisé) en cas de K, Na, Ca, Mg et enfin mettre à volume avec la solution d'extraction utilisée pendant la préparation des échantillons et agiter manuellement.
- Pour préparer les étalons 2 ; 5 ; 10 ; 15… mg/, pipeter la solution de 100 ppm en utilisant les pipettes de 2 ml ; 5 ml ; 10 ml ; 15 ml, … puis ajouter du chlorure de lantane pour éviter l'interférence chimique pour les éléments K, Ca et Mg (1/10 du jaugé utilisé) et enfin mettre à volume avec la solution d'extraction utilisée pendant la préparation des échantillons et agiter manuellement

Préparation des dilutions de l'échantillon :

- Faire les dilutions suivantes : 1/5 ; 1/10 ; 1/20 ; 1/50 ; 1/100 ; 20/25 ; 1/200
- Ajouter du chlorure de lantane pour éviter l'interférence chimique (1/10 du jaugé utilisé)
- Mettre à volume avec la solution d'extraction utilisée pendant la préparation des échantillons et agiter manuellement.
- Ajouter 25 ml d'eau distillée et agiter pendant 5 minutes.
- Laisser reposer pendant 30 minutes.
- Filtrer l'extrait sur un papier filtre.

Lecture au spectrophotomètre d'absorption atomique

- Allumer le compresseur
- Connecter l'imprimante sur la machine
- Allumer l'ordinateur
- Allumer le spectrophotomètre
- Allumer la lampe représentant l'élément à analyser
- Allumer la flamme
- Tracer la courbe en utilisant les étalons préparés et requis pour l'élément à analyser sans omettre de faire le signal maximal d'absorbance qui doit être entre 0.2 – 0.3 en cliquant l'auto zéro en mode graphique ;
- Analyser l'échantillon en plongeant le nébuliseur dans l'échantillon. Cliquer analyse simple et la machine donne les résultats calculés ou non dans une unité de mesure demandée.

Si la machine n'a pas calculé ou si on veut mettre les résultats dans une autre unité, il faut procéder de la façon suivante :

- Le Potassium en K_2O, prendre les résultats trouvés en mg/kg et les exprimer en % et les multiplier par 1.2046
- Le Calcium en Ca_2O, prendre les résultats trouvés en mg/kg et les exprimer en % et les multiplier par 1.3992



Figure 7: Titrage avec la solution d'EDTA 0.01 M



Figure 8: Pesée d'un échantillon de cendres de briquettes de biomasse.

II.3.5. Détermination du pH

La méthode d'analyse du pH utilisée est tirée de la méthode ISO 10390.

Matériel:

- Un pH-mètre ou un kit de test de pH
- Une bêche ou une tarière
- Un récipient
- Eau distillée ou déminéralisée
- Balance
- Agitateur

Étapes:

Prélever, sécher et étaler l'échantillon sur un papier absorbant et laisser à l'air libre pendant 24 heures.

Préparer une suspension échantillon-eau. Dans un récipient, peser 20 grammes d'échantillon sec. Ajouter 50 ml d'eau distillée ou déminéralisée. Remuez vigoureusement pendant 5 secondes, puis laisser reposer pendant 15 minutes. Remuer de nouveau l'échantillon avant de procéder à la mesure du pH.

III. RESULTATS

III.1. Etat des lieux de l'utilisation des briquettes au Burundi

III.1.1. Production de briquettes

1. Matières premières

Les résidus agricoles sont les principales matières premières utilisées pour la fabrication des briquettes de biomasse. Toutes les organisations productrices ont indiqué avoir recours aux balles de riz et aux parches de café, tandis que 50% des producteurs ont indiqué avoir également recours aux sciures de bois et aux déchets de charbon.

La figure 9 présente les types de matières premières et leur niveau de recours par les organisations productrices des briquettes.

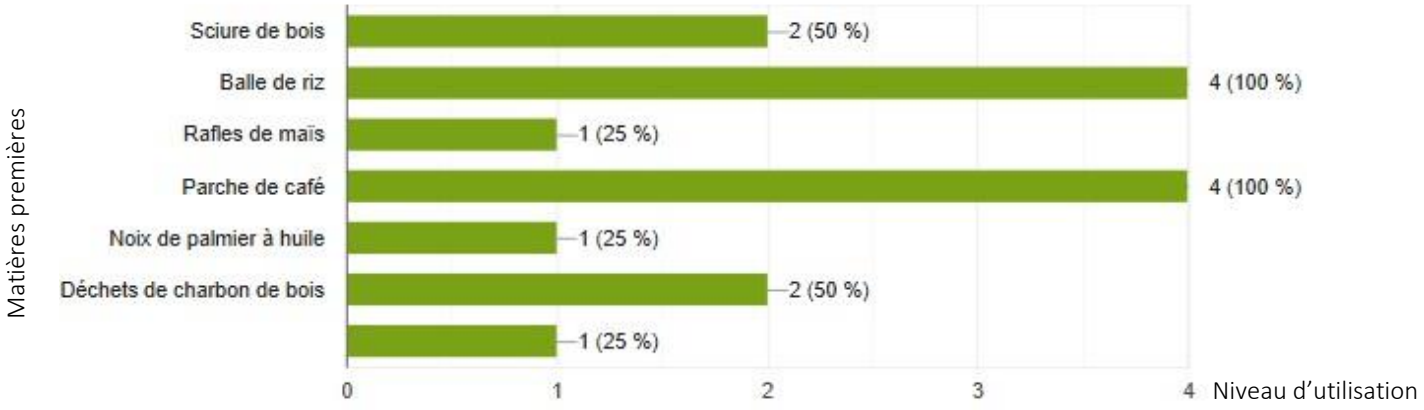


Figure 9: Matières premières utilisées dans la production des briquettes de biomasse.

2. Méthode de production

La méthode de production des briquettes de biomasse par densification est la plus répandu, avec 100 % des organisations productrices ayant indiqué avoir recours à cette méthode de production.

La figure 10 présente les méthodes de production en fonction du niveau de recours par les organisations productrices de briquettes de biomasse.

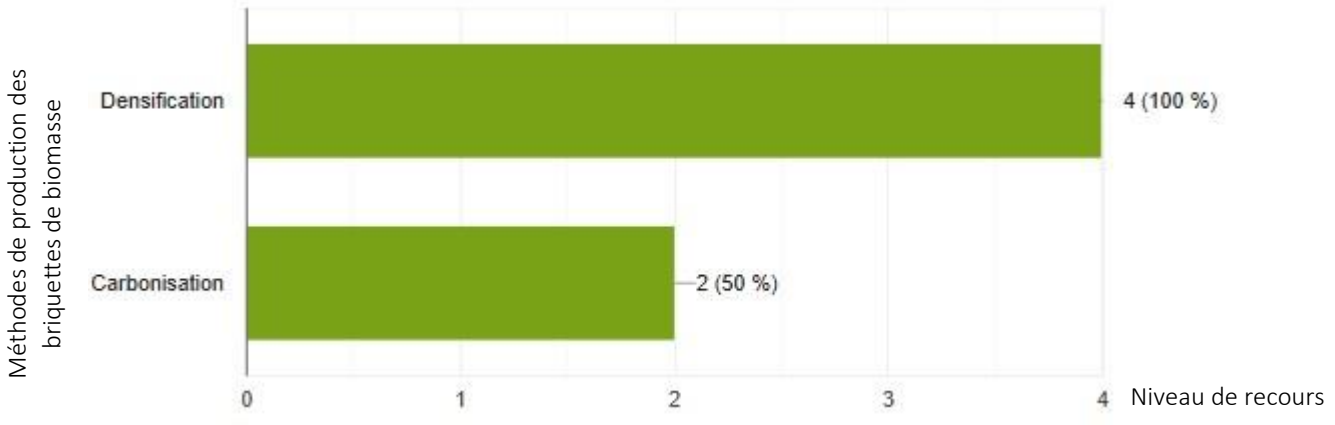


Figure 10: Méthodes de production des briquettes de biomasse.

50% des organisations ont indiqués avoir recours au liants pour produire les briquettes. L'argile et l'amidon étant les liants les plus utilisés.

La figure 11 présente les types de liants utilisés dans la production des briquettes de biomasse.

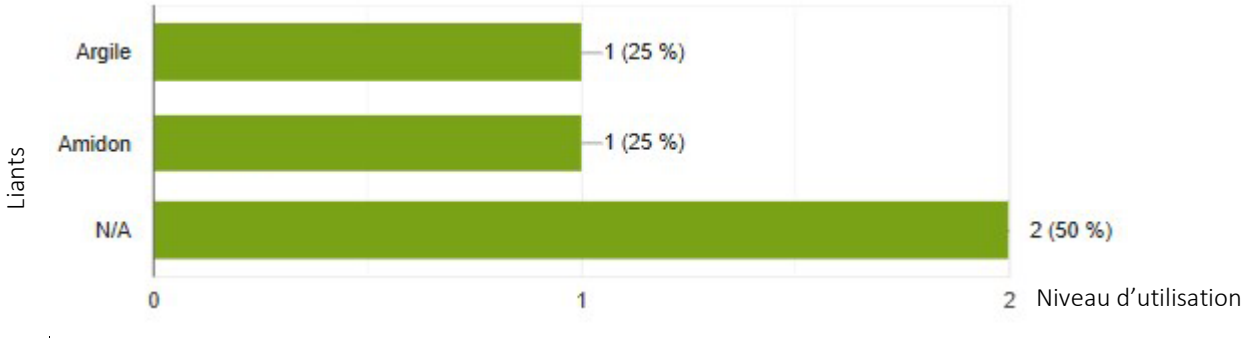


Figure 11: Types de liants utilisés pour la production des briquettes de biomasse.

3. Capacité de production

Toutes les organisations productrices des briquettes ont indiqué avoir une capacité de production mensuelle dépassant 100 tonnes.

La figure 12 dresse la capacité de production des organisations productrices des briquettes de biomasse.

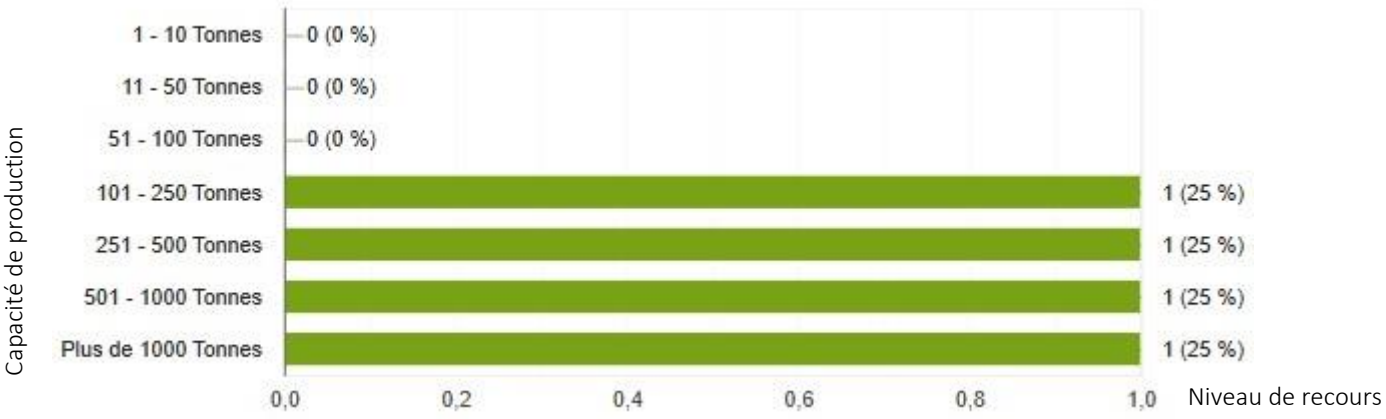


Figure 12: Capacité de production des briquettes de biomasse.

Finalité de la production

75 % des organisations productrices de briquettes de biomasse ont indiqué que la finalité de leur production est la commercialisation contre 15% qui ont indiqué que la finalité est l'usage interne. Les organisations ont indiqué des chiffres d'affaires ou des valeurs d'utilisation interne compris entre 80 millions de fbu et 3 milliards de fbu.

La figure 13 présente la finalité de la production des briquettes de biomasse.

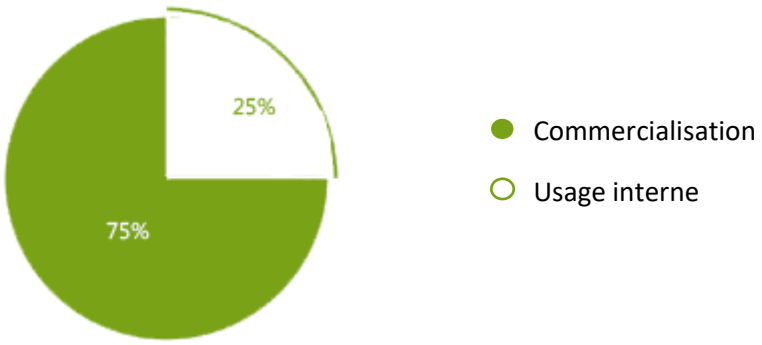


Figure 13: Finalité de la production des briquettes de biomasse.

La figure 14 donne les principaux défis liés à la production des briquettes.



Figure 14: Les principaux défis pour la production des briquettes de biomasse.

La figure 15 donne les principales solutions face aux défis.

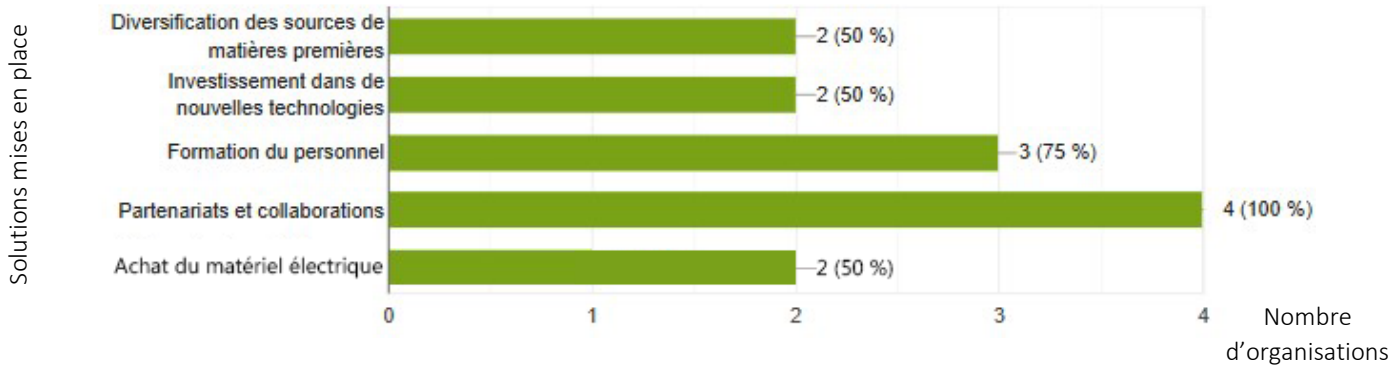


Figure 15: Solutions mises en place par les organisations productrices de briquettes pour relever les défis.

100% des organisations productrices de briquettes de biomasse ont indiqués avoir dans leurs perspectives, l'augmentation de la capacité de production pour pouvoir répondre à la demande sans cesse croissante et l'expansion vers de nouveaux marchés. Elles ont indiqué, à 75%, viser l'amélioration de la qualité des briquettes. 50% ont indiqués avoir dans leurs perspectives le renforcement de l'innovation et la sensibilisation de la population quant à l'utilisation des briquettes.

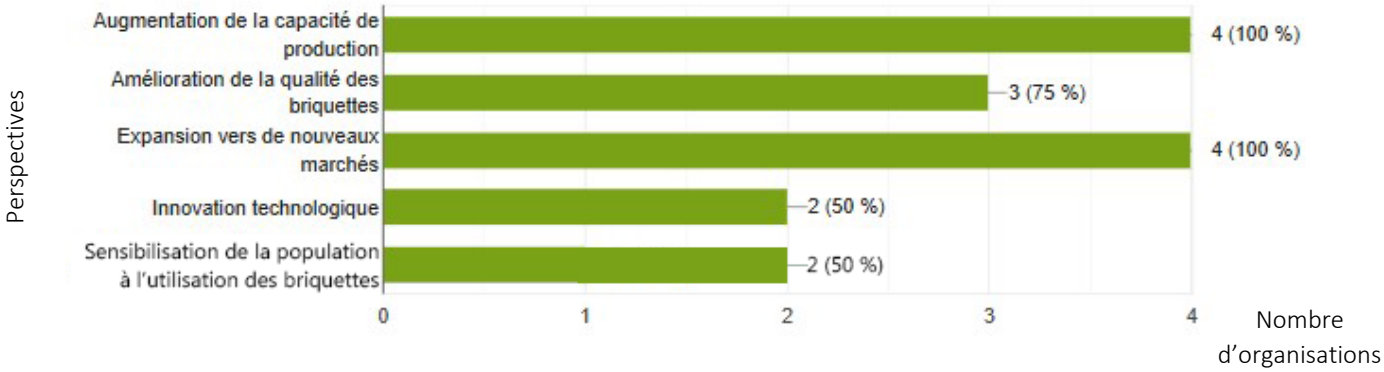


Figure 16: Perspectives des organisations productrices de briquettes de biomasse.

Tableau 3: Résumé des résultats de l'enquête auprès des producteurs de briquettes de biomasse.

Organisations	**Matières première**	**Source d'énergie**	**Méthode de production**	**Capacité de production (Tonne/ mois)**
KTF Concept	Sciure de bois, Balle de riz, Parche de café	Réseau national d'électricité.	Densification	200 - 300
KAGE	Balle de riz, Parche de café, Résidus du charbon.	Réseau national d'électricité.	Densification, carbonisation.	500 - 800
General Trading Entreprise (GTE)	Balle de riz, Parche de café, Résidus du charbon.	Réseau national d'électricité.	Densification, carbonisation.	100 - 200
FDNB	Balle de riz, Parche de café	Réseau national d'électricité, Groupe électrogène.	Densification	800 - 1500

III.1.2. Utilisation des briquettes

1. Durée d'utilisation et fréquence d'utilisation

60% des utilisateurs ont indiqués avoir utilisé les briquettes de biomasses pour plus de 2 ans, 20% ont indiqués une utilisation de 1 à 2 ans, 10% ont indiqué une utilisation de 6 mois à 1 an et 10% ont indiqués une utilisation de moins de 6 mois. Il faut aussi noter que 90% des utilisateurs ont indiqués qu'ils utilisent les briquettes de biomasse quotidiennement.

La figure 18 dresse la situation de la durée d'utilisation par les utilisateurs des briquettes de biomasse.

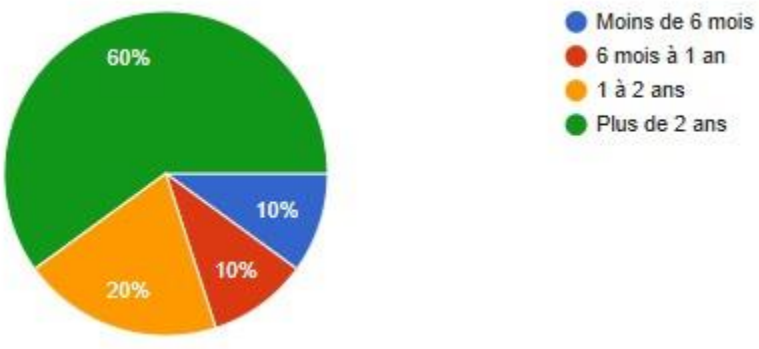


Figure 17: Durée d'utilisation des briquettes de biomasse.

2. Consommation et motivations pour utiliser les briquettes

La moyenne journalière de consommation des briquettes de biomasse est de 2,5 kg par ménage. Elle est de 14 kg par catégorie d'Hôtel, Restaurant, Sauna et peut atteindre 30 tonnes pour des institutions.

Parmi les principaux avantages liés à l'utilisation des briquettes de biomasse qui ont été relevés par les utilisateurs figurent le coût inférieur des briquettes de biomasse par rapport aux combustibles qu'ils utilisaient auparavant. 100% des utilisateurs de briquettes de biomasse s'accordent sur ce point et indiquent que cet avantage est lié à la durée de combustion des briquettes qui est plus longue. 80 % des utilisateurs ont indiqué l'avantage lié à la facilité d'utilisation, 60% ont indiqué que les briquettes de biomasse offrent une bonne cuisson des

aliments et 50 % ont indiqué des avantages liés à la réduction de l'impact environnemental dont la réduction de la déforestation et des émissions des fumées et à la préservation des ustensiles de cuisine.

Il faut aussi noter que 100% des utilisateurs ayant fait l'objet de l'enquête vivent dans le milieu urbain.

La figure 18 présente les principales motivations exprimées par les utilisateurs quant à l'utilisation des briquettes de biomasse.

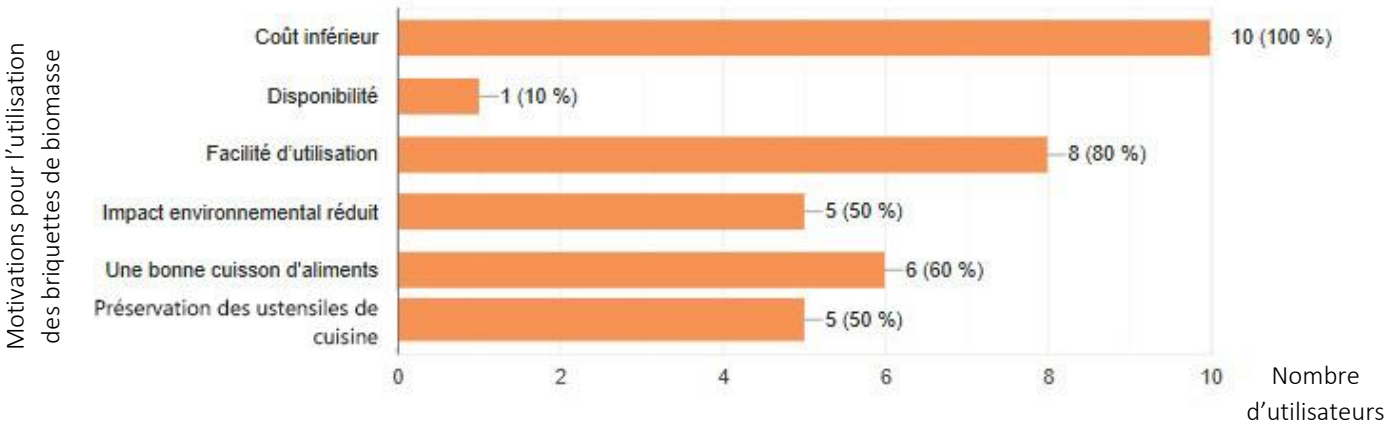


Figure 18: Principales motivations pour l'utilisation des briquettes de biomasse.

3. Défis d'utilisation

60 % des utilisateurs de briquettes de biomasse ont soulevés le défi lié à la disponibilité des briquettes près des lieux d'utilisation. Ils ont indiqué qu'il n'existe qu'un nombre très réduit de points de vente de briquettes de biomasse et qu'ils sont souvent obligés d'investir dans le transport du produit depuis le point de vente jusqu'au lieu d'utilisation.

60% des utilisateurs des briquettes de biomasse ont indiqué que la quantité de cendres issue de la combustion des briquettes est élevée par rapport à celle des énergies de cuisson issues du bois et 40 % ont soulevé le défi lié à une gestion difficile des cendres.

La figure 19 présente les principaux défis exprimés par les utilisateurs quant à l'utilisation des briquettes.

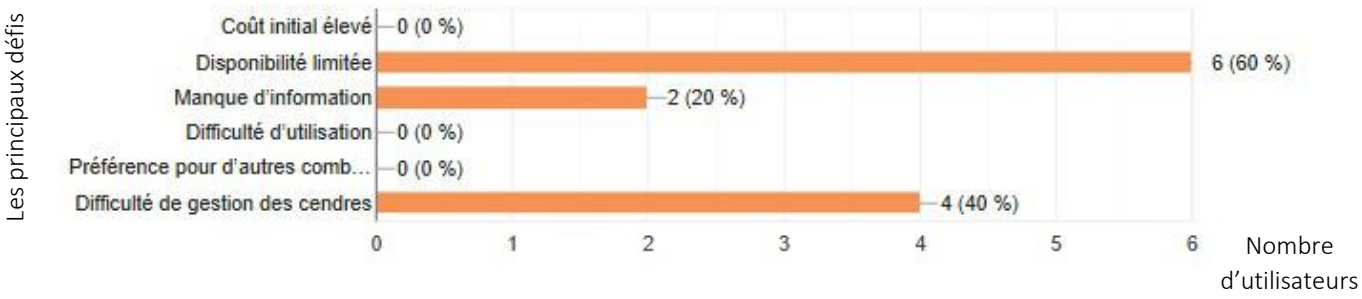


Figure 19: Défis liés à l'utilisation des briquettes de biomasse.

4. Gestion des cendres

50 % des utilisateurs des briquettes de biomasse ont indiqué jeter les cendres à la poubelle, 30% ont indiqué qu'ils utilisent les cendres comme fertilisant dans de petites plantations de légumes et 20% ont indiqué qu'ils stockent les cendres pour les faire retourner aux fabricants des briquettes qui leur offrent en retour des bonus en briquettes.



Figure 20: Gestion des cendres par les utilisateurs des briquettes de biomasse.

III.2. Taux de cendres des briquettes de biomasse et caractéristiques physico-chimiques des cendres des briquettes de biomasse

Tableau 4: Caractéristiques physico-chimiques des cendres des briquettes de biomasse.

Echantillon	Taux de cendres %	Taux d'humidité %	C %	N %	P_2O_5 %	CaO %	K_2O %	MgO %	pH
Cendres de briquettes de biomasse.	-	-	0.450	0.115	0,765	0,489 ± 0,006	1,59	0,307 ± 0,001	10,1
Briquettes de biomasse	39,4	3,94	-	-	-	-	-	-	-

Selon la norme NF U 44-051, les amendements organiques avec engrais doivent respecter des teneurs en N, P_2O_5 ou en K_2O supérieures à 1 % (TERRE ET COMPOST, 2006).

Le taux de cendres obtenu (39,4%) est élevé et est caractéristique d'un combustible riche en sels minéraux. Cela confirme l'hypothèse que les briquettes de biomasse possèdent un taux de cendres relativement élevé pouvant susciter l'intérêt pour la valorisation

Les analyses ont révélé que les cendres de briquettes de biomasse présentent une teneur en carbone organique relativement faible (0,45%), indiquant une décomposition quasi-totale de la matière organique initiale lors de la combustion. La teneur en azote est également faible (0,115%), suggérant une limitation de l'apport d'azote aux sols.

Les analyses ont montré des teneurs en potassium et en phosphore de l'ordre de 1,59% et 0,765% respectivement, deux éléments nutritifs essentiels pour la croissance des plantes. La teneur en calcium est égale à 0,489 %.

Les sols du Burundi sont généralement acides. L'application de cendres alcalines (pH 10,1) pourrait contribuer à neutraliser l'acidité du sol, ce qui pourrait avoir un effet positif sur la disponibilité de certains nutriments et la croissance des plantes.

IV. DISCUSSION DES RESULTATS

Les résultats obtenus dans cette étude montrent un recours particulier à l'exploitation des résidus agricoles pour produire les briquettes de biomasse ce qui est en accord avec les résultats de Kumar et al. (2021) qui ont souligné la place prépondérante des résidus agricoles en tant que matière première pour la production des briquettes de biomasse. L'étude a aussi montré que 50% des producteurs des briquettes de biomasse font recours aux liants, ce qui est en accord avec les résultats du travail de Kumar et al. (2021), qui ont aussi souligné l'importance des liants dans la production des briquettes. L'étude a surtout démontré que la production et l'utilisation des briquettes de biomasse comme alternative énergétique durable prend de l'ampleur, avec un intérêt croissant des différents acteurs pour cette forme d'énergie.

Tel que présenté par la figure 14, les défis soulevés par 75 % des organisations productrices de briquettes de biomasse sont liées aux difficultés d'accès aux matières premières, aux pièces de rechange, mais aussi à un marché de briquettes de biomasse qui est à la phase naissante et qui demande des efforts conséquents pour la pénétration. 50% des organisations productrices ont aussi soulevé les défis liés aux coupures répétitive et imprévisible de l'électricité, au manque d'une main d'œuvre qualifiée et à l'absence d'une bonne règlementation.

Pour pouvoir relever les défis, les organisations productrices de briquettes de biomasse ont indiqué à 100% investir dans le partenariat et la collaboration. Elles investissent, à 75%, dans la formation du personnel et 50% ont indiqué investir dans la diversification des sources de matières premières, dans l'acquisition des nouvelles technologies et dans l'achat du matériel électrique dont les transformateurs électriques et les générateurs d'électricité. Voir la figure 15.

Les résultats obtenus dans cette étude montrent que les cendres de briquettes de biomasse présentent un potentiel significatif pour la fertilisation des sols agricoles au Burundi. Le taux de cendres élevé (39,4%) confirme l'hypothèse initiale selon laquelle les briquettes de biomasse possèdent un taux de cendres suffisamment élevé pour justifier leur valorisation. Cette observation est en accord avec les études menées par Puri et al. (2024), qui ont trouvé une valeur élevée du taux de cendres (27 %) issues de la biomasse des déchets solides municipaux. Les études menées Boulday & Marcovecchio (2016), ont trouvé un taux de cendres de 15% dans les combustibles biomasses, soulignant leur richesse en sels minéraux.

Les caractéristiques physico-chimiques des cendres de briquettes de biomasse révèlent une faible teneur en carbone organique (0,45%) et en azote (0,115%), ce qui indique une décomposition quasi-totale de la matière organique initiale lors de la combustion. Ces résultats sont proches de ceux rapportés par Saletnik et al. (2016), avec des teneurs en carbone et en azote de l'ordre de 1.22 ± 0.02 % et 0.17 ± 0.01 respectivement. Ils sont aussi proches de ceux rapportés par Godbout et al. (2012) et ceux rapportés par Boulday & Marcovecchio (2016), qui ont observé des teneurs faibles en carbone et en azote dans les cendres de biomasse agricole. La faible teneur en azote suggère que les cendres de biomasse ne peuvent pas être utilisées comme source principale d'azote pour les sols, mais elles peuvent être combinées avec d'autres amendements pour améliorer leur efficacité.

Les cendres de briquettes de biomasse présentent des valeurs en potassium et en phosphore de 1,59% et (0,765%), respectivement. L'étude de Puri et al. (2024) a démontré que les cendres selon les types de biomasse dont ils sont issues peuvent être une source importante de potassium (4,5% ; cendre de biomasse issue des déchets municipaux.) et de phosphore (1,54% ; cendre de biomasse issue des écorces de coton.). Les résultats de Maltas & Sinaj (2015), ont démontré que les cendres de bois naturel sont une source importante de potassium et de phosphore pour les cultures avec des valeurs de l'ordre de 9% pour chacun des deux.

La teneur en oxyde de calcium (0,489 ± 0,006) des cendres de briquettes de biomasse peut également contribuer à l'amélioration de la structure et de la fertilité des sols, comme l'ont montré les travaux de Sinaj et al. (2015) qui ont trouvé une teneur de calcium de 2% pour des cendres humides issues de la biomasse des sous-bois. Le travail de Puri et al. (2024) a aussi trouvé une teneur en calcium de 2,41% dans des cendres issues de la biomasse des déchets agricoles (Coque de noix de coco).

Les résultats d'analyse de l'échantillon de cendre de briquette de biomasse révèlent une teneur en oxyde de magnésium (MgO) égale à 0,307 ± 0,001 %. Ce résultat témoigne d'une faible concentration en MgO, cependant cette concentration reste exploitable pour des applications en tant qu'amendement agricole dans les sols pauvres en magnésium. L'étude Saletnik et al.(2016) a trouvé des teneurs en oxyde de magnésium de l'ordre de 2,72 ± 0,032 % pour des cendres issues de la biomasse des déchets agricoles.

Les sols du Burundi étant généralement acides (MINEAGRI, 2022), l'application de cendres alcalines (pH 10,1) pourrait aider à neutraliser cette acidité, améliorant ainsi la disponibilité de certains nutriments et la croissance des plantes. Cette observation est soutenue par les recherches de Godbout et al. (2012), qui ont montré que les cendres de biomasse peuvent être utilisées pour augmenter le pH des sols acides et ont proposé une valeur moyenne de 12 pour le pH des cendres issus de la biomasse (Boulday & Marcovecchio, 2016).

Compte tenu de leur richesse en potassium et en phosphore et de leur pH alcalin les cendres de briquettes de biomasse présentent un potentiel intéressant pour la fertilisation des sols agricoles au Burundi. Leur utilisation pourrait contribuer à combler les carences en ces éléments nutritifs, améliorant ainsi la croissance et le rendement des cultures. Cependant, il est crucial de surveiller le pH du sol après l'application des cendres pour éviter une alcalinisation excessive, ce qui pourrait nuire à la disponibilité de certains nutriments.

CONCLUSION GENERALE

Les résultats obtenus montrent que les cendres de biomasse peuvent effectivement jouer un rôle important dans l'amélioration de la fertilité des sols, en raison de leur richesse en certains nutriments essentiels.

Les cendres des briquettes de biomasse étudiées présentent un taux de cendres élevé, confirmant ainsi l'hypothèse initiale selon laquelle les briquettes de biomasse produisent suffisamment de cendres pour justifier leur valorisation. Ce résultat est comparable aux taux observés dans d'autres types de biomasse, tels que les cendres issues des déchets solides municipaux (27 %) ou des sous-produits agricoles (jusqu'à 30 %), et souligne le potentiel de récupération des minéraux contenus dans ces résidus.

L'analyse physico-chimique des cendres a révélé des concentrations significatives en potassium, des éléments essentiels pour la croissance des plantes. Ces valeurs montrent que les cendres de biomasse peuvent être une source précieuse de nutriments pour les cultures, notamment dans des systèmes agricoles où ces éléments sont déficients. Cette observation est cohérente avec les études, qui ont démontré que les cendres de certaines biomasses, telles que les coques de noix de coco ou le bois, peuvent contenir des niveaux élevés de ces éléments, renforçant ainsi leur intérêt en tant qu'amendement minéral.

Cependant, la faible teneur en azote et en carbone organique observée dans les cendres de briquettes indique que leur utilisation comme source de matière organique et d'azote pour le sol reste limitée. Ces résultats confirment que les cendres de biomasse, en raison de la combustion presque complète de la matière organique, ne sont pas adéquates pour enrichir les sols en azote, mais peuvent plutôt être combinées avec d'autres sources organiques pour améliorer leur efficacité.

En outre, la teneur en oxyde de calcium et en oxyde de magnésium des cendres de briquettes peut contribuer à la correction de l'acidité des sols, un problème récurrent dans les sols du Burundi. L'application de ces cendres, avec un pH alcalin de 10,1, pourrait aider à neutraliser l'acidité des sols, favorisant ainsi une meilleure disponibilité des nutriments et une croissance améliorée des plantes. Ce potentiel d'ajustement du pH est particulièrement pertinent pour les sols acides du Burundi, où la gestion de l'acidité est un enjeu crucial pour l'agriculture.

En conclusion, cette étude a démontré que les cendres de briquettes de biomasse présentent un potentiel significatif pour la fertilisation des sols, grâce à leur richesse en certains nutriments essentiels et à leur capacité à neutraliser l'acidité des sols. Toutefois, l'utilisation de ces cendres doit être complétée par d'autres amendements organiques ou minéraux pour pallier la carence en azote et en matière organique. Une évaluation plus poussée de leur impact à long terme sur la structure et la fertilité des sols est nécessaire pour déterminer les doses optimales et les conditions d'application qui maximisent leurs bénéfices dans les systèmes agricoles burundais.

SUGGESTIONS

Suite aux résultats de cette étude, plusieurs recommandations sont formulées pour optimiser la valorisation des cendres de briquettes de biomasse dans la fertilisation des sols au Burundi. Il faudrait :

- Mener des recherches supplémentaires sur l'utilisation combinée des cendres de briquettes de biomasse avec d'autres amendements organiques ou minéraux. Étant donné la faible teneur en azote et en carbone organique des cendres, des études doivent être réalisées pour déterminer les meilleures pratiques d'application qui maximisent leur efficacité, tout en améliorant la fertilité des sols.
- Faire une étude d'analyses et de comparaison du taux de cendre en fonction des matières premières utilisées dans la production des briquettes de biomasse.
- Sensibiliser les producteurs, les utilisateurs des briquettes de biomasse et les entreprises œuvrant dans la collecte des déchets sur le potentiel de valorisation des cendres dans la fertilisation des sols au Burundi. C'est dans l'optique de favoriser la mise en place d'un système de collecte des cendres.
- Développer des guides de bonnes pratiques pour l'utilisation des cendres de briquettes de biomasse, incluant des recommandations sur les doses appropriées et les conditions d'application pour éviter une alcalinisation excessive des sols. Une attention particulière devrait être portée à la gestion du pH des sols afin de garantir une disponibilité optimale des nutriments.
- Encourager les agriculteurs à adopter les cendres de briquettes de biomasse comme amendement minéral. Des campagnes de sensibilisation devraient être organisées pour informer sur les bénéfices agronomiques associés à leur utilisation.
- Instaurer des programmes de suivi des sols après application des cendres pour évaluer leur impact à long terme sur la structure et la fertilité des sols. Cela permettra de mieux comprendre les interactions entre les cendres et les caractéristiques du sol, ainsi que leur influence sur la productivité des cultures.
- Favoriser la collaboration entre les chercheurs, les agronomes et les acteurs de l'agriculture durable pour partager les connaissances et les expériences concernant la valorisation des

cendres de biomasse. Cela permettra d'accroître l'impact des résultats de recherche sur les pratiques agricoles locales.

- Encourager les autorités locales et nationales à inclure la valorisation des cendres de biomasse dans les politiques agricoles et environnementales. Des subventions ou des incitations financières pourraient être mises en place pour promouvoir l'utilisation de ces cendres, contribuant ainsi à une agriculture plus durable.

REFERENCES

Aklis, N., Dwi, A., & Darmawan, A. (2020). The Influence of the Type of Adhesive on the Properties of Sawdust Briquettes. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, *8*(9), 5353–5356. https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/73892020

Alfaia, R. G. de S. M., Costa, A. M., & Campos, J. C. (2017). Municipal solid waste in Brazil: A review. *Waste Management and Research*, *35*(12), 1195–1209. https://doi.org/10.1177/0734242X17735375

Alnaass, N. S., Agil, H. K., & Ibrahim, H. K. (2021). Use of fertilizers or importance of fertilizers in agriculture. *International Journal of Advanced Academic Studies*, *3*(2), 52–57. https://doi.org/10.33545/27068919.2021.v3.i2a.770

Awasthi, P., Chataut, G., & Khatri, R. (2023). Solid waste composition and its management: A case study of Kirtipur Municipality-10. *Heliyon*, *9*(11). https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2023.E21360

Barrie, J., Schröder, P., Schneider-Petsinger, M., King, R., & Benton, T. G. (2022). *The role of international trade in realizing an inclusive circular economy*.

Boulday, D., & Marcovecchio, F. (2016). *Valorisation des cendres issues de la combustion de biomasse: Revue des gisements et des procédés associés*. 1–18.

BRB. (2022). *Rapport annuel*.

Chahande, S. B., Badole, W., Mandavgane, S., & Deshmukh, A. (2024). Utilization of biomass briquette ash as source of potassium to sunflower and its effect on soil properties. *International Journal of Advanced Biochemistry Research*, *8*(2), 374–377. https://doi.org/10.33545/26174693.2024.v8.i2e.569

Charpentier Poncelet, A., Helbig, C., Loubet, P., Muller, S., Villeneuve, J., Laratte, B., Tuma, A., Sonnemann, G., Poncelet, A. C., Helbig, C., Loubet, P., Beylot, A., Poncelet, A. C., Helbig, C., Loubet, P., Beylot, A., Muller, S., Villeneuve, J., Laratte, B., … Sonnemann, G. (2022). Losses and lifetimes of metals in the economy. *Nature Sustainability*, 717–726.

Chen, H. (2015). Lignocellulose biorefinery product engineering. *Lignocellulose Biorefinery*

Engineering, 125–165. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100135-6.00005-3

Chittora, D. (2023). Harmful Impact of Synthetic Fertilizers on Growing Agriculture and Environment. *Global Journal of Pharmacy & Pharmaceutical Sciences*, *11*(1). https://doi.org/10.19080/gjpps.2023.11.555804

Circle Economy. (2021). *The Circularity Gap*.

FAO. (2020). *World Soil Day: Overview and key results.*

Geldron, A. (2013). Economie Circulaire : Notions. *ADEME*, 1–9.

Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 1–5. https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782

Godbout, S., Palacios, J. H., Larouche, C. J., Bussières, D., Fournel, S., Léveillée, F., Pelletier, F., Morissette, R., Charest, C., Perrault, A., Lagacé, R., & Savoie, P. (2012). *Avenues pour la valorisation des cendres de combustion de la biomasse agricole*. 1–2.

IFA. (2023). *Public Summary Short-Term Fertilizer Outlook 2023-2024*.

IFDD. (2016). Objectifs de développement durable. *Gastronomía Ecuatoriana y Turismo Local.*, 1–44.

Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). What a Waste 2.0 Introduction - "Snapshot of Solid Waste Management to 2050." Overview booklet. *Urban Development Series*, 1–38. https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317

Kpalo, S. Y., Zainuddin, M. F., Manaf, L. A., & Roslan, A. M. (2020). A review of technical and economic aspects of biomass briquetting. *Sustainability (Switzerland)*, *12*. https://doi.org/10.3390/su12114609

Kumar, J. A., Kumar, K. V., Petchimuthu, M., Iyahraja, S., & Kumar, D. V. (2021). Comparative analysis of briquettes obtained from biomass and charcoal. *Materials Today: Proceedings*, *45*, 857–861. https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.02.918

Maltas, A., & Sinaj, S. (2015). Wood ashes: A new fertilizer for Swiss agriculture. *Agrarforschung Schweiz*, *5*(6).

Manirakiza, N., Bisore, S., Ndihokubwayo, N., Niyuhire, E., Bigumandondera, P., & Nimbona, G. (2023). Caractérisation des déchets solides municipaux générés dans la municipalité de Kinama, Bujumbura-Burundi. *Afrique SCIENCE*.

McIlgorm, A., Raubenheimer, K., McIlgorm, D. E., & Nichols, R. (2022). The cost of marine litter damage to the global marine economy: Insights from the Asia-Pacific into prevention and the cost of inaction. *Marine Pollution Bulletin*, *174*. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.113167

MFBPE. (2023). *Plan National du Développement du Burundi 2018-2027 Révisé et Son plan d'actions prioritaires 2023-2027*.

MINEAGRI. (2018). *Stratégie Agricole Nationale*.

MINEAGRI. (2022). *Cartographie de la fertilité des sols du Burundi*.

Mizero, M., Ndikumana, T., & Jung, G. (2015). Quantification, caractérisation et voies de valorisation des déchets solides municipaux dans la ville de Bujumbura. *Bulletin Scientifique Sur l'Environnement et La Biodiversité*, *1*, 1–7.

Mohd-Faizal, A. N., Mohd-Shaid, M. S. H., & Ahmad-Zaini, M. A. (2022). Solid fuel briquette from biomass: Recent trends. *Ovidius University Annals of Chemistry*, *33*(2), 150–155. https://doi.org/10.2478/auoc-2022-0022

Ngoc, U. N., & Schnitzer, H. (2009). Sustainable solutions for solid waste management in Southeast Asian countries. *Waste Management*, *29*(6), 1982–1995. https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2008.08.031

Niinimäki, K., Peters, G., Dahlbo, H., Perry, P., Rissanen, T., & Gwilt, A. (2020). The environmental price of fast fashion. *Nature Reviews Earth and Environment*, *1*(4), 189–200. https://doi.org/10.1038/s43017-020-0039-9

Nutriman. (2020). *Utilisation des cendres et des produits à base de cendres comme fertilisants. 818470*.

Observatoire mondial de l'action climat. (2023). *Observatoire Mondial de l'action climat*.

Organisation Mondiale des Douanes. (2023). *La transition vers une économie circulaire et ses*

conséquences pour les administrations des douanes.

Plan National de Développement du Burundi. (2018). *Plan National de Développement du Burundi*.

Puri, L., Hu, Y., & Naterer, G. (2024). Critical review of the role of ash content and composition in biomass pyrolysis. *Frontiers in Fuels*, *2*. https://doi.org/10.3389/ffuel.2024.1378361

République du Burundi. (2014). *Loi No1/33 du 28 Novembre 2014 portant révision de la Loi No 1/02 du 25 Janvier 2010 portant organisation de l'administration communale.*

Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E. F., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H. J., Nykvist, B., De Wit, C. A., Hughes, T., Van Der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P. K., Costanza, R., Svedin, U., … Foley, J. A. (2009). A safe operating space for humanity. *Nature*, 1–33. https://doi.org/10.1038/461472a

Saletnik, B., Bajcar, M., Zagula, G., Czernicka, M., & Puchalski, C. (2016). Influence of biochar and biomass ash applied as soil amendment on germination rate of Virginia mallow seeds (Sida hermaphrodita R.). *Econtechmod*, *5*(3), 71–76.

TERRE ET COMPOST. (2006). Amendements organiques Dénominations, spécifications et marquage. Norme : NF U44-051. *AFNOR*, 1–17.

UNCCD. (2017). *Perspectives territoriales mondiales*.

UNEP. (2011). Decoupling natural resource use and environmental impacts from economic growth. In *International Journal of Social Economics*. https://doi.org/10.1108/03068291311305044

UNEP. (2019). *Emissions Gap*. https://doi.org/10.18356/9789210022262c008

Vergara, S. E., & Tchobanoglous, G. (2012). Municipal Solid Waste and the Environment: A Global Perspective. *Annual Review of Environment and Resources*, *37*(1), 277–309. https://doi.org/10.1146/annurev-environ-050511-122532

Wierzbowska, J., Sienkiewicz, S., Zarczyński, P., & Krzebietke, S. (2020). Environmental application of ash from incinerated biomass. *Agronomy*, *10*. https://doi.org/10.3390/agronomy10040482

World Bank. (2018). *Agricultural Pollution Fertilizer*.

ANNEXES

1. Formulaire d'enquête pour les producteurs de briquettes de biomasse

Section 1 : Informations Générales

1. Nom de l'entreprise :
2. Localisation de l'entreprise :
3. Année de création :
4. Nombre d'employés :

Section 2 : Méthodes de Production

5. **Quels types de biomasse utilisez-vous pour produire les briquettes ?** (Cochez toutes les options applicables)

- Sciure de bois
- Résidus agricoles (Balle de riz, rafles de maïs, parche de café, noix de palmiers à huiles
- Déchets de charbon de bois
- Autres (précisez) : _____

6. **Quelle méthode de production utilisez-vous principalement ?**

- Densification
- Carbonisation
- Autre (précisez) : _____

7. **Utilisez-vous des liants dans la production de briquettes ?**

- Oui
- Non

8. **Si oui, quels types de liants utilisez-vous ?** (Cochez toutes les options applicables)

- Argile

- Amidon
- Terre
- Autres (précisez) : _____

Section 3: Volumes produits

9. **Quelle est votre capacité de production mensuelle de briquettes (en tonnes) ?**

- Moins de 1 tonne
- 1 à 10 tonnes
- 11 à 50 tonnes
- 51 à 100 tonnes
- 101 à 250 tonnes
- 251 à 500 tonnes
- 501 à 1000 tonnes
- Plus de 1000 tonnes

Section 4: Défis Rencontrés

10. **Quels sont les principaux défis que vous rencontrez dans la production de briquettes ?** (Cochez toutes les options applicables)

- Accès aux matières premières
- Coût des matières premières
- Technologie de production (Pièces de rechange)
- Main-d'œuvre qualifiée
- Marché et distribution
- Réglementations et normes
- Autres (précisez) : _____

11. **Comment évaluez-vous l'impact de ces défis sur votre production ?**

- Très faible
- Faible

- Modéré
- Élevé
- Très élevé

12. **Quelles solutions avez-vous mises en place pour surmonter ces défis ?** (Cochez toutes les options applicables)

- Diversification des sources de matières premières
- Investissement dans de nouvelles technologies
- Formation du personnel
- Partenariats et collaborations
- Autres (précisez) : _____

Section 5: Perspectives d'Avenir

14. **Quels sont vos projets futurs pour améliorer la production de briquettes ?** (Cochez toutes les options applicables)

- Augmentation de la capacité de production
- Amélioration de la qualité des briquettes
- Expansion vers de nouveaux marchés
- Innovation technologique
- Autres (précisez) : _____

15. **Quels types de soutien ou d'assistance seraient les plus bénéfiques pour votre entreprise/organisation ?** (Cochez toutes les options applicables)

- Financier
- Technique
- Formation
- Accès au marché
- Autres (précisez) : _____

2. Formulaire d'enquête pour les utilisateurs des briquettes de biomasse

Section 1 : Informations générales

1. **Nom et Prénom :**
2. **Âge :**

- Moins de 18 ans
- 18-30 ans
- 31-50 ans
- Plus de 50 ans

3. **Sexe :**

- Masculin
- Féminin
- Autre

4. **Lieu de résidence :**

- Urbain
- Rural

5. **Niveau d'éducation :**

- Aucun
- Primaire
- Secondaire
- Supérieur

Section 2 : Utilisation des briquettes de biomasse

6. **Catégorie d'utilisateur**

- Ménage
- Hôtels et/ou restaurant

- Camps (Militaire, Police, Refugiés, …)
- Usines et unités de productions
- Autres …..

7. **Depuis combien de temps utilisez-vous des briquettes de biomasse ?**

- Moins de 6 mois
- 6 mois à 1 an
- 1 à 2 ans
- Plus de 2 ans

8. **À quelle fréquence utilisez-vous des briquettes de biomasse ?**

- Quotidiennement
- Hebdomadairement
- Mensuellement
- Rarement

9. **Pour quelles utilisations principales utilisez-vous les briquettes de biomasse ?** (Cochez toutes les réponses applicables)

- Cuisine
- Chauffage
- Autre (veuillez préciser) : _____

Section 3 : Motivations et avantages perçus

8. **Quelles sont vos principales motivations pour utiliser des briquettes de biomasse ?** (Cochez toutes les réponses applicables)

- Coût inférieur
- Disponibilité
- Facilité d'utilisation
- Impact environnemental réduit
- Autre (veuillez préciser) : _____

9. **Quels avantages avez-vous observés en utilisant des briquettes de biomasse ?** (Cochez toutes les réponses applicables)

- Réduction des coûts énergétiques
- Moins de fumée et de pollution
- Meilleure efficacité énergétique
- Contribution à la réduction de la déforestation
- Autre (veuillez préciser) : _____

Section 4 : Obstacles et défis

10. **Quels obstacles rencontrez-vous dans l'utilisation des briquettes de biomasse ?** (Cochez toutes les réponses applicables)

- Coût initial élevé
- Disponibilité limitée
- Manque d'information
- Difficulté d'utilisation
- Préférence pour d'autres combustibles
- Autre (veuillez préciser) : _____

11. **Quelles améliorations suggéreriez-vous pour encourager l'utilisation des briquettes de biomasse ?** (Cochez toutes les réponses applicables)

- Réduction des coûts
- Meilleure distribution
- Campagnes de sensibilisation
- Formation sur l'utilisation

Autre (veuillez préciser) : _____

Section 5 : Commentaires supplémentaires

12. **Avez-vous des commentaires ou suggestions supplémentaires concernant l'utilisation des briquettes de biomasse ?**

3. Guide d'entretien

1. Introduction

Date de l'entretien :
Nom de l'institution :
Nom du responsable :
Poste du responsable :

2. Questions générales

1. **Pouvez-vous nous donner un aperçu général de l'utilisation des briquettes de biomasse au Burundi ?**

- Quelle est la proportion de la population qui utilise des briquettes de biomasse par rapport à d'autres sources d'énergie ?
- Quels types de biomasse sont principalement utilisés pour la production de briquettes ?

2. **Quelles sont les principales initiatives gouvernementales ou politiques en place pour promouvoir l'utilisation des briquettes de biomasse ?**

- Y a-t-il des subventions ou des incitations fiscales pour encourager leur utilisation ?
- Comment ces initiatives ont-elles évolué au fil du temps ?

3. **Quels sont les principaux avantages et défis associés à l'utilisation des briquettes de biomasse au Burundi ?**

- En termes de coût, d'accessibilité, et d'impact environnemental.
- Quels sont les obstacles à une adoption plus large ?

Impact sur les Politiques Nationales

4. **Comment l'utilisation des briquettes de biomasse s'aligne-t-elle avec les objectifs des politiques nationales en matière d'énergie et d'environnement ?**

3. Y a-t-il des objectifs spécifiques que le gouvernement cherche à atteindre avec l'utilisation des briquettes de biomasse ?

5. **Quels sont les résultats observés jusqu'à présent en termes de réduction de la déforestation et d'amélioration de la qualité de l'air ?**

4. Avez-vous des données ou des études qui montrent l'impact des briquettes de biomasse sur ces aspects ?

Secteur et Développement

6. **Comment évaluez-vous le développement du secteur des briquettes de biomasse au Burundi ?**

5. Y a-t-il des entreprises locales ou des initiatives communautaires notables dans ce domaine ?
6. Quels sont les principaux défis auxquels ce secteur est confronté ?

7. **Quelles sont les perspectives d'avenir pour l'utilisation des briquettes de biomasse au Burundi ?**

7. Y a-t-il des projets ou des innovations en cours qui pourraient influencer leur adoption future ?

Conclusion

8. **Y a-t-il d'autres aspects ou informations que vous aimeriez partager concernant l'utilisation des briquettes de biomasse au Burundi ?**