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

Contribution à la valorisation énergétique des déchets organiques par co-digestion anaérobie : Cas des pulpes de café et des épluchures de pomme de terre

Nishimwe, Anicet; Sous la direction de : Prof. Aloys Katihabwa; Dr. Pierre Ntakiyiruta (Co-directeur)

2025-03
UB, FS
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/2126

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

UNIVERSITE DU BURUNDI

FACULTE DES SCIENCES

Master en Sciences Chimiques

==========

CONTRIBUTION A LA VALORISATION ENERGETIQUE DES DECHETS ORGANIQUES PAR CO-DIGESTION ANAEROBIE : Cas des pulpes de café et des épluchures de pomme de terre

Par :

Anicet NISHIMWE

Mémoire

présenté et défendu publiquement en vue de l'obtention du Diplôme de Master en Sciences Chimiques

Spécialité : Contrôle et Analyses Chimiques

Sous la direction de :

Prof. Aloys KATIHABWA (Directeur)

Dr. Pierre NTAKIYIRUTA (Co-directeur)

Bujumbura, Mars 2025

MEMBRES DU JURY

Président : Prof. Godefroid GAHUNGU

Directeur : Prof. Aloys KATIHABWA

Co-directeur : Dr. Pierre NTAKIYIRUTA

Secrétaire : Prof. Pierre Claver MPAWENAYO

Membre : Dr. Manassé NIHORIMBERE

DEDICACE

A mes regrettés parents ;

A mes frères et sœurs ;

A mes amis et connaissances ;

Je dédie ce mémoire.

REMERCIEMENTS

Ce travail de fin d'études de master n'est pas uniquement le fruit du travail de son auteur, mais plutôt le résultat d'une conjugaison des efforts consentis par plusieurs personnes auxquelles j'exprime mes sentiments de gratitude et une grande reconnaissance pour leurs diverses contributions et leurs soutiens dans sa réalisation.

Mes sincères remerciements sont adressés au Prof Aloys KATIHABWA et au Dr Pierre NTAKIYIRUTA respectivement directeur et co-directeur de ce mémoire qui, malgré leurs nombreuses occupations ont accepté de diriger ce travail. Leurs disponibilités, suggestions et conseils m'ont été d'un grand intérêt dans la confection de ce travail.

Mes remerciements sont également adressés à tous les professeurs qui m'ont formé tout au long de ce cursus académique ; leur enseignement, expérience et conseil m'ont été d'un grand apport à l'aboutissement de ce travail. Je remercie profondement les membres du jury, malgré leurs occupations si nombreuses, ont accepté d'evaluer ce travail.

Ma gratitude est aussi adressée à l'Université du Burundi et surtout à la Faculté des Sciences qui m'a fourni des outils nécessaires à l'apprentissage des études universitaires et ont suscité en moi l'esprit de créativité, de critique et de recherche.

Mes remerciements sont dignement adressés aux techniciens du laboratoire de ses bonnes collaborations et bonnes humours durant la période du déroulement des analyses au laboratoire.

Je voudrais enfin exprimer mes sentiments de reconnaissance aux membres de ma famille, aux amis et connaissances qui n'ont pas cessé de m'apporter leur encouragement, leur soutien moral et financier tout au long de la réalisation de ce mémoire.

RESUME

La consommation excessive des combustibles fossiles comme source d'énergie primaire a conduit au changement climatique mondial, à la pollution et à la dégradation de l'environnement, entraînant ainsi des problèmes de santé humaine. De plus, les déchets provenant principalement de l'agriculture, de l'industrie agroalimentaire et des ménages, se produisent de plus en plus à cause de la croissance démographique et l'industrialisation. Le déversement de ces déchets dans les dépotoirs et décharges non contrôlés entraîne des impacts environnementaux importants notamment les émissions de gaz à effet de serre, la pollution du sol et des eaux. L'objectif de cette étude était d'évaluer le potentiel énergétique des pulpes de café et les épluchures de pomme de terre par biométhanisation. Le processus de biométhanisation a été réalisé en mode batch et différents paramètres physico-chimiques ont été mesurés avant et après la digestion anaérobie selon des méthodes standards. Cette digestion a été réalisée dans des digesteurs de 4 litres dans lesquels ont été introduit 2,5kg du mélange Substrat/Inoculum. A cet effet, 3 scénarios du mélange substrat–inoculum entre autre les pulpes de café seules, les épluchures de pomme de terre seules et leur mélange dans les rapports 3/1, 1/1 et du témoin ont été réalisé. Les résultats montrent que le rapport 3/1 génère une production élevée de biogaz pour les pulpes de café (49580ml de biogaz dont la composition en méthane est de 67,9%). Le mélange pulpes de café – épluchures de pomme de terre dans le rapport 1/1 a produit 44280 ml de biogaz dont la composition en méthane est de 72,8 % de méthane, tandis que les épluchures de pomme de terre, dans le rapport 3/1, a produit 26030 ml de biogaz dont la composition en méthane est de 66,9%. Signalons également que le mélange pulpes de café – épluchures de pomme de terre dans son rapport témoin a généré 23280ml dont la composition en méthane est de 67,8 %. En matière de rendement en méthane, le mélange pulpes de café – épluchures de pomme de terre a produit plus de méthane que les autres scenarios (67,8% 77,57% 72,8%) respectivement pour le témoin, le rapport S/I 3/1 et le rapport 2/2. Cette production si importante pourrait servir à la population comme énergie à utiliser pendant la cuisson et l'éclairage.

Mots clés : Biogaz, Co-digestion anaérobie, Déchets organiques, Biométhanisation, inoculum.

ABSTRACT

The excessive consumption of fossil fuels as a primary energy source has led to global climate change, pollution and environmental degradation, resulting in human health problems. In addition, waste, mainly from agriculture, the food industry and households, is increasingly produced due to population growth and industrialization. The dumping of this waste in uncontrolled dumps and landfills causes significant environmental impacts including greenhouse gas emissions, soil and water pollution.The objective of this study was to evaluate the energy potential of organic waste (coffee pulp and potato peelings) by biomethanization. The biomethanization process was carried out in batch mode and different physicochemical parameters were measured before and after anaerobic digestion according to standard methods. This digestion was carried out in 4-liter digesters into which 2.5 kg of the Substrate/Inoculum mixture was introduced. For this purpose, 3 scenarios of the substrate-inoculum mixture including coffee pulps alone, potato peels alone and their mixture in the ratios 3/1, 1/1 and the control were carried out. The results show that the ratio 3/1 generates a high production of biogas for coffee pulps (49580ml of biogas with a methane composition of 67.9%). The mixture of coffee pulps - potato peels in the ratio 1/1 produced 44280 ml of biogas with a methane composition of 72.8% methane, while the potato peels, in the ratio 3/1, produced 26030 ml of biogas with a methane composition of 66.9%. It should also be noted that the coffee pulp-potato peelings mixture in its control report generated 23280ml with a methane composition of 67.8%. In terms of methane yield, the coffee pulp-potato peel mixture produced more methane than the other scenarios (67.8%, 77.57%, 72.8%) for the control, the S/I ratio 3/1 and the ratio 2/2, respectively. This significant production could be used by the population as energy for cooking and lighting.

Keywords: Biogas, Anaerobic co-digestion, Organic waste, Biomethanization, inoculum.

TABLE DES MATIERES

MEMBRES DU JURY ..... **i**

DEDICACE ..... **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**

CHAPITRE I. GENERALITES SUR LE CAFEIER, LA POMME DE TERRE ET LA BIOMETHANISATION (Codigestion anaérobie) **5**

I.1. Généralités sur le caféier, la pomme de terre 5

I.1.1. Généralités sur le cafeier cultivé au Burundi 5

I.1.1.1. Déscription botanique 5

I.1.1.2. Exigences édapho-climatiques du caféier 6

I.1.1.3. Pulpes de café 6

I.1.2. Généralités sur la pomme de terre 7

I.1.2.1. Déscription botanique 7

I.1.2.2. Exigences édapho-climatiques 7

I.1.2.3. Epluchures de pomme de terre 9

I.2. Généralités sur la gestion des déchets organiques 9

I.2.1. Gestion des pulpes de café 9

I.2.2. Gestion des épluchures de pomme de terre 10

I.2.3. Impact négatif sur l'environnement et la santé 10

I.3. Contexte de la Co-digestion anaérobie 11

I.3.1. Production du biogaz à travers les pulpes de café 11

I.3.2. Production du biogaz à travers les épluchures de pomme de terre 12

I.4. Méthanisation (ou digestion anaérobie) 12

I.4.1. Définition 12

I.4.2. Mécanismes de la digestion anaérobie 13
I.4.3. Produits de la digestions anaérobie et leurs caractéristiques 15
Biogaz 15
I.5. Paramètres clés de la digestion 15
CHAPITRE II. MATERIEL ET METHODES 19
II.1. Description du site d'échantillonnage 19
II.2. Ramassage, conservation et transport de l'échantillon 19
II.3. Inoculum 20
II.4. Préparation de l'échantillon 20
II.5. Caractérisation physico-chimique des substrats 20
II.5.1. Détermination du taux d'humidité et de la quantité de matière sèche 20
II.5.2. Détermination de la matière organique (NF, 1985) 21
II.5.3. Détermination de carbone organique et azote total 21
II.6. Paramètres de suivi du fonctionnement du digesteur 24
II.6.1. Détermination du pH 24
II.6.2. Détermination du titre alcalimétrique complet (TAC) par la méthode titrimétrique 24
II.6.3. Détermination d'Acides gras volatils (AGV) par la méthode titrimétrique 24
II.7. Protocole expérimental de digestion anaérobie 25
II.8. Méthodologie de calcul de rendement énergétique produit à partir du méthane 27
CHAPITRE III. PRESENTATION ET DISCUSSIONS DES RESULTATS 29
III.1. Caractéristiques des échantillons brutes 29
III.2. Evolution de certains paramètres dans les digesteurs durant la digestion anaérobie 30
III.3. Cinétique de production du Biogaz et du méthane 31
III.3.1. Cinétique de production de Biogaz 31
III.3.2. Cinétique de production du méthane 35
III.4. Estimation de la quantité d'énergie produite 37
CONCLUSION GENERALE ET SUGGESTIONS 39
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 41
ANNEXES 47

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Composition chimique de la pulpe de café 7

Tableau II.1 : Composition du mélange des substrats au cours de la digestion anaérobie. ... 27

Tableau III.1 : Détermination de taux d'humidité, matière sèche, matière organique et le rapport C/N 29

Tableau III. 2 : Evolution de certains paramètres dans les digesteurs durant la digestion anaérobie 30

Tableau III.3 : Quantité cumulée et composition du Biogaz produit. 36

Tableau III.4 : Comparaison des résultats par rapport à ceux des autres chercheurs. 37

Tableau III.5 : Estimation de la quantité d'énergie pour chaque type de substrat par tonne et par an. 38

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Photographie du caféier arabica 5

Figure I.2 : Photographie du champs de pomme de terre..... 7

Figure II.1 : Photographie des pulpes de café (a) et les épluchures de pomme de terre (b)..... 19

Figure II.2 : Dispositif pour la production du Biogaz. 26

Figure III.1 : Evolution journalière de la production du biogaz pour les PC (a) ; les EPT (b) ; le mélange des PC - des EPT (c). 32

Figure III.2 : Evolution journalière de la production cumulée du biogaz pour les PC (a), les EPT terre (b), le mélange des PC- des EPT(c)..... 34

Figure III.3 : Evolution journalière de la production cumulée du méthane pour les PC (a), les EPT(b), le mélange PC− EPT(c)..... 35

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

AGV	: Acides gras volatiles
C/N	: Rapport Carbone/Azote
COT	: Carbone organique total
DA	: Digestion anaérobie
EPT	: Epluchures de Pomme de Terre
KWh	: Kilowattheures
LACHISTE	: Laboratoire de Chimie, Sciences de la terre et de l'Environnement
MS	: Matière sèche
MO	: Matière organique
N	: Normalité
NTK	: Azote totale kjeldhal
PC	: Pulpes de Café
pH	: potentiel d'hydrogène
PED	: Pays en développement
S/I	: Substrat/Inoculum
TAC	: Titre alcalimétrique complet
TH	: Taux d'humidité
%m/m	: pourcentage en masse

AVANT-PROPOS

La présente étude a été effectuée dans le cadre du mémoire de fin d'étude du cycle de master en sciences chimiques, spécialité : Contrôle et analyse chimiques. C'est une étude du potentiel énergétique par conversion des déchets organiques en biogaz : cas de pulpes de café et des épluchures de pomme de terre.

L'objectif de cette étude est de contribuer à la gestion des déchets organiques par la méthanisation. Pour réaliser cette étude, une digestion anaérobie en mode batch de deux substrats (pulpes de café et des épluchures de pomme de terre) a été suivie ainsi que la caractérisation et mesure d'autres différents paramètres physico-chimiques. Les analyses ont montré que les deux substrats produisent une bonne quantité de biogaz. De nos jours, la consommation excessive des combustibles fossiles est l'une des principales sources de pollutions environnementale. Parmi les solutions alternatives à ce problème, la méthanisation vient en avant comme une solution prometteuse et durable.

INTRODUCTION GENERALE

Les déchets organiques sont des déchets composés de matière organique caractérisée par la présence de carbone issu d'organismes vivants, végétaux ou animaux. Ces déchets peuvent subir un phénomène de biodégrabilité (Nawel, 2015).

Ils constituent une source d'éléments énergétiques valables pour le maintien de la vie sur terre (Yasmine *et al.*, 2018). Dans le contexte des pays du monde entier et ceux en développement en particulier, l'énergie joue un rôle crucial dans la prospérité économique et social (Sagar, 2005). L'énergie est un facteur déterminant de la qualité de vie des populations, et son accès universel est un objectif essentiel pour les politiques publiques (Gashaw, 2016).

Cependant, dans de nombreux pays comme le Burundi, l'accès à l'énergie est encore fortement restreint pour la majorité de la population, qui dépend exclusivement des combustibles fossiles pour ses besoins en énergie (Manigomba *et al.*, 2019). Ces combustibles, tels que le bois de chauffage, le charbon de bois, la tourbe et les dérivés du pétrole, sont une source d'énergie primaire mais sont également un facteur de pollution atmosphérique, ce qui aggrave les problèmes de santé publique, l'épuisement des ressources naturelles et les enjeux de développement durable (Al Seadi, 2008).

Dans cette logique, plusieurs recherches ont été conduites pour faire face à ces défis. Dans leurs travaux de recherche, (Lacour *et al*., 2011) ont montré que les déchets organiques ont un potentiel énergétique élevé. Dans le contexte de gestion, Les extraits de nature agricole, agroalimentaire et domestique, sont le plus souvent acheminés vers les décharges ou incinérés (Prévot**,**2000). Cette pratique, qui s'effectue en l'absence de régulation, a des répercussions notables sur l'environnement, notamment en termes d'émissions de gaz à effet de serre et de changement climatique (Sandra, 2021).

Dans le monde, plus la population augmente, plus la production de déchets augmente (Aina, 2006). L'urbanisme et la croissance économique sont un problème grave en ce qui concerne les déchets que nous produisons. Il en découle alors des effets néfastes majeurs sur la santé humaine et sur l'environnement pour toutes les nations quel que soit le niveau de développement (World Bank, 2018).

Au Burundi, l'incidence de cette pratique sur l'environnement est particulièrement préoccupante, car elle a entraîné une augmentation de plus de 90 % du taux de production de déchets à ciel ouvert, un phénomène qui n'était pas anticipé par les parties prenantes et les communautés locales (Manigomba *et al.*, 2019)**.**

Dans les zones rurales, ces déchets organiques sont traditionnellement valorisés dans l'alimentation animale et la fertilisation des sols en tant qu'amendement organique (Nurfeta, 2010).

En revanche, dans les zones urbaines, ils sont majoritairement évacués vers les décharges non contrôlées où ils causent des problèmes de pollution phytosanitaire (Manirakiza *et al.*,2020). Dans ses recherches, (Rucakumugufi *et al.*, 2021) ont montré que ces déchets peuvent être valorisés par production du compost, fertilisant organique pouvant améliorer la fertilité du sol. Toutefois, cette production de l'engrais organique est accompagnée par le dégagement du biogaz pouvant être récupéré par les technologies de Co digestion anaérobie telles que démontrée par (Angeli, 2019).

Cependant, il est à constater que les résidus d'origine organique constituent une source potentielle énergétique renouvelable pouvant remédier les problèmes de pollution et d'épuisement des ressources (Gunaseelan, 2007). Elle s'avère être une solution prometteuse permettant de transformer ces déchets en ressources renouvelables tout en réduisant leur empreinte écologique (Manigomba *et al*, 2019). Cette valorisation se présente par le biais d'un processus de transformation de la matière organique en méthane et en dioxyde de carbone par la communauté microbienne fonctionnant dans un milieu anaérobie (Bensmail & Touzi, 2012).

Pour une température de fermentation de 30 °C, aisément atteignable dans des régions à climat chaud, le rendement sur des déchets organiques à forte concentration en cellulose peut atteindre 250 m^3 de biogaz par tonne de matière organique (MO), ce qui correspond à l'équivalent de 120 kg de butane ou de 150 litres de fioul (Jean Luc, 2009). Par ailleurs, une étude menée par (Benyahia, 2012) a révélé que la production de 1 m^3 de méthane correspond à 9,7 kWh d'énergie.

Il a été démontré que les sous-produits du café, tels que les pulpes, les marc et les grains, peuvent être exploités de diverses manières (Torres-Valenzuela *et al.*, 2019). Ils peuvent être utilisés pour la production d'aliments, de boissons, de vinaigre, de biogaz, de caféine, de

pectine, d'enzymes pectiques, de protéines, de fertilisants, ainsi que pour l'alimentation des poissons, des poulets, des agneaux et des lapins (Rathinavelu & Graziosi, 2005). Dans leurs travaux de recherches, (Rojas-Sossa *et al.*, 2017) ont montré que les pulpes de café présentent un potentiel significatif en termes de production de biogaz.

Elles peuvent générer environ 140 m^3 de méthane par tonne de matière organique et 170 KWh d'énergie par tonne de matière organique (Jean Luc, 2009).

Elles sont caractérisées par leur forte teneur en sucres et en fibres, ce qui les rend particulièrement pertinents pour la production de biogaz (Kessoum & Lougliti, 2021). Pandey *et al.*(2000) ont rapporté que 133 m^3 de biogaz peuvent être produits par la digestion anaérobie d'une tonne de pulpe de café, ce qui équivaut à la teneur de 100 L d'huile.

Par ailleurs, les épluchures de pomme de terre, qui sont générées en grande quantité, contiennent également une quantité significative de sucres et de fibres, ce qui les rend utiles pour la production de biogaz (Khanal *et al.*, 2023). Elles contiennent des glucides et des composés organiques facilement biodégradables, favorisant ainsi leur conversion en biogaz lors du processus de Co digestion (Chauhan *et al.*, 2023). L'ajout de micro-organismes (l'inoculum) a été démontré comme un facteur clé dans l'optimisation de la production de biogaz et de la teneur en CH_4, tout en réduisant le temps de rétention (Lacour, 2012a).

Le biogaz apparaît donc comme une solution économique et écologique à ces problèmes ; à travers une autonomie énergétique et un développement durable des zones rurales

Toutefois, le manque de connaissances et d'expertise est l'une des problématiques les plus préoccupantes dans le monde en général et dans les pays en développement en particulier. C'est pour cette raison qu'une étude intitulée « **Contribution à la valorisation énergétique des déchets organiques par Co-digestion anaérobie : cas de pulpes de café et et des épluchures de pomme de terre** » a été faite pour tirer une attention particulière sur les pulpes de café et les épluchures de pomme de terre compte tenu de leur potentiel énergétique significatif.

Objectif global

L'objectif global de cette étude consiste à évaluer le potentiel énergétique des déchets organiques par biométhanisation.

Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques de cette étude consistent à :

- Caractériser les substrats utilisés dans la digestion anaérobie.
- Optimiser la production du biogaz à partir des substrats utilisés
- Déterminer le volume maximal du biogaz et du méthane produit dans une quantité donnée des substrats

Hypothèse de recherche

L'hypothèse de cette recherche est de vérifier si les pulpes de café et les épluchures de pomme de terre produiraient des maxima de volumes de biogaz et du méthane par codigestion anaérobie.

L'originalité de ce travail reside dans la co-digestion anaérobie de deux substrats tels que les pulpes de café et les épluchures de pomme de terre.

En plus de l'introduction et de la conclusion, ce mémoire s'articule sur 3 chapitres :

Le 1er chapitre concerne la généralité sur les déchets organiques et la méthanisation (codigestion anaérobie) ;

Le 2eme chapitre représente la partie « Matériels et méthodes» et le 3eme chapitre présente les « Résultats et discussion » de ce travail.

CHAPITRE I. GENERALITES SUR LE CAFEIER, LA POMME DE TERRE ET LA BIOMETHANISATION (Codigestion anaérobie)

I.1. Généralités sur le caféier, la pomme de terre

I.1.1. Généralités sur le cafeier cultivé au Burundi

I.1.1.1. Déscription botanique

Le caféier est arbuste qui porte des cerises . Il appartient à la famille des Rubiacees et au genre Coffea. La famille des rubiacées comprend quelques 500 genres et plus de 6000 espèces. La plupart sont des arbres et arbustes tropicaux qui poussent dans les étages inférieurs de la foret.



Figure I.1 : Photographie du caféier arabica (République du Burundi. Ministère de l'agriculture et de l'élevage, 2017).

Deux principales espèces sont cultivées pour faire le boisson qu' on appelle « café » :

- Le caféier arabica : il pousse en haute altitude (1000 à 2000 m), donne des grosses fèves et un café très aromatique.
- le caféier robusta : il pousse à basse altitude (0 à 800 m) en situation climatique chaude et humide, de grande taille par rapport à l'arabica , donne des petites fèves et un café fort et amer.

I.1.1.2. Exigences édapho-climatiques du caféier

❖ **Exigences édaphiques (vis-à-vis du sol) du caféier**

Le caféier demande avant tout des sol profond, au minimum de 1,00 à 1,20 m sans obstacles. Il faut donc proscrire des sols à forte charge caillouteuse, les sols à dalles latéritiques ou banc rocheux, les sols à nappe phréatique permanente à moins d'1 m à 2 m. Le sol doit etre fertile, riche en humus avec une teneur en argile de l'ordre de 30%.

Les sols sableux doivent etre eliminés. Ces critères déterminent trois zones agro-écologiques pour le café arabica matérilisées sur la carte du Burundi à savoir les plateaux centraux humides , les plateaux centaux secs et le Mumirwa.

❖ **Exigences climatiques du caféier**

Les éxigences climatiques du caféier sont entre autre une température moyenne annuelle comprise entre 15 et 25ºC, une pluviométrie annuelle suffisante d'une moyenne de 1500 mm d'eau, une saison sèche de courte durée n'excédant pas 3 ou 4 mois. De cefait, au Burundi, le caféier arabica se développe bien entre 1200 et 1950 m d' altitude. Le caféier craint les vents violents ou desséchants ainsi que les zones ou les brouillards sont fréquents et pérsistants. Il convient donc d'éviter les sommets des collines et les bas-fonds de vallée (République du Burundi. Ministère de l'agriculture et de l'élevage, 2017)

I.1.1.3. Pulpes de café

La pulpe est la partie externe du fruit, constituée de l'épicarpe (couche rouge externe) et du mésocarpe (couche de tissu mou). C'est le premier résidu obtenu du traitement humide des cerises de café et peut représenter entre 40 et 43 % du poids frais du fruit entier (Aguirre *et al*., 2018) et (Montilla *et al.,* 2008). (Munguía Ameca, 2015) et (Pinto-Ruiz *et al.,* 2017) prouvent que la pulpe de café a une valeur nutritionnelle appréciable qui pourrait être utilisée dans l'alimentation animale. Ainsi, ils mentionnent une teneur en matière sèche de 20 à 25 %, des protéines brutes de 8 à 12 %, des fibres brutes de 20 à 25 % et des cendres de 9 à 11 %. Cependant, sa composition chimique peut varier en fonction de facteurs tels que les conditions agro-écologiques, la variété, la gestion des cultures et la méthode de transformation (Pinto-Ruiz *et al.,* 2017).

Tableau I.1 : Composition chimique de la pulpe de café (Da Silveira, 2019).

Composés	Valeurs (% m/m)
Lipides	1,3 – 3,8
Fibres	16,2 – 35,2
Protéines	8,0 – 15,0
Cendres	5,0 – 9,5
Glucides	66,5 – 84,4
Cellulose	10,5 – 28,6
Hémicellulose	1,0 – 15,5
Lignine	12,2 – 22,8
Tanins	0,7 – 4,6
Caféine	0,7 – 1,8

I.1.2. Généralités sur la pomme de terre

I.1.2.1. Déscription botanique

La pomme de terre est une plante herbacée vivace (de par ses tubercules se développant à l‟extrémité de ses tiges souterraines), mais on la cultive généralement annuellement (JAUNARD, 2010)



Figure I.2: Photographie du champs de pomme de terre (Harahagazwe, 2006).

I.1.2.2. Exigences édapho-climatiques

- **Facteurs climatiques**

La pomme de terre est une plante vivace, rustique et annuelle, qui peut se développer dans différentes régions du globe mais qui préfère les climats tempérés et brumeux, où elle assure les meilleures récoltes.

Au burundi, la pomme de terre est généralement cultivé dans les régions de hautes altitudes (Harahagazwe, 2006). Selon une etude menée par Vyizigiro et al., (2014), il y a des varietés qui peuvent s'adapter dans les régions de basses altitudes.

Températures

La pomme de terre exige des températures très variables selon les différentes phases de développement. Selon Bamouh, (1999), les hautes températures stimulent la croissance des tiges, par contre les basses températures favorisent davantage la croissance du tubercule. La pomme de terre est très sensible au gel ; le zéro de végétation est compris entre 6 et 8°C. Les températures optimales de croissance des tubercules se situent aux alentours de 18°C le jour et 12°C la nuit et une température du sol supérieure à 25°C est défavorable à la tubérisation.

Eau et humidité

Les besoins en eau vont principalement avec la profondeur du système racinaire et varient selon la période. Ils se situent aux environs de 3-4 mm d'eau /jour avant la tubérisation et de 5-6 mm/jour dès la formation des tubercules ; les besoins totaux atteignent environ 455 mm. Les pluies abondantes lui sont nuisibles car elles provoquent soit un développement foliacé trop considérable, soit la pousse des jeunes tubercules qui se forment. Comme elles peuvent également empêcher la circulation de l'oxygène vers les parties souterraines de la plante en induisant une asphyxie et la pourriture des tubercules (Naoual, 2021).

- **Facteurs édaphiques**

La pomme de terre préfère les terres meubles et légères ; les terres compactes, argileuses et trop humides sont nettement défavorables.

La pomme de terre préfère un pH légèrement acide (entre 5,5 et 6). Cependant, une alcalinité excessive du sol peut causer le développement des galles communes sur les tubercules. Aussi, un taux de salinité élevé peut bloquer l'absorption de l'eau par le système racinaire (Bamouh, 1999).

I.1.2.3. Epluchures de pomme de terre

Les épluchures de pomme de terre, qui sont générées en grande quantité dans les restaurants et dans les ménages, contiennent des glucides et des composés organiques facilement biodégradables, favorisant ainsi leur conversion en biogaz lors du processus de Co-digestion (Chauhan *et al.* , 2023).

La composition chimique des épluchures de pomme de terre est présentée dans le tableau ci-dessous mais peut varier selon la varieté, le sol et le climat (Achinas *et al.*, 2019).

Tableau I.2 : Composition chimique des épluchures de pomme de terre (Khanal et al., 2023).

Composés	Valeurs (%)
Amidon	15-25
Protéines	18
Polysaccharides non amylacés	25-30
Lipides	1
Lignines	15-20
Cendres	6-10

I.2. Généralités sur la gestion des déchets organiques

I.2.1. Gestion des pulpes de café

Les usines de préparation du café par voie humide rejettent les pulpes de café et des eaux résiduaires de dépulpage et lavage. Ceux-ci peuvent être considérés comme une cause de contamination des cours d'eau dans les zones de production. Il est ainsi fréquent de voir des tas de pulpe en cours de décomposition à proximité des usines. La pulpe de café est l'un des sous-produits agro-industriels les plus abondants puisqu'elle est générée chaque année en tonnes, ce qui représente une source de pollution importante (Murthy & Naidu, 2012).

L'utilisation de la pulpe de café a fait l'objet de nombreuses études, d'une manière générale selon lesquelles les résidus et sous-produits du café peuvent être utilisés de diverses manières. Elle a été utilisé comme substrat pour la culture de champignons exotiques, pour le production de biogaz (Chala *et al.*, 2018), pour la production de l'engrais organique (Padovan et *al*., 2015) pour l'alimentation animale (Salazar *et al.*, 2009). production de bioéthanol ainsi

que substrat pour la culture de fabrication de boissons alcoolisées ou gazeuses, vinaigre, extraction de caféine, pectine (Padovan *et al.*, 2015).

I.2.2. Gestion des épluchures de pomme de terre

Les pommes de terre sont l'une des plus grandes cultures au monde et sont devenues jusqu'à présent une culture alimentaire de base (FAO,2022).

Les épluchures de pommes de terre sont le principal sous-produit de la transformation, produisant environ 8 % de déchets en poids et leur réduction devient un problème majeur. L'industrie de la pomme de terre produit en moyenne 100 000 tonnes d'épluchures dans le monde chaque année (Achinas *et al.*, 2019) . Les recherches actuelles se concentrent sur les voies de recyclage des déchets d'épluchures de pommes de terre (EPT) pour les industries pharmaceutiques et/ou énergétiques, ce qui permet une meilleure gestion des déchets d'épluchures de pommes de terre. Les EPT sont utilisés pour la production d'aliments pour animaux de faible valeur ou comme engrais dans les activités agricoles (Wu, 2016).

Au Burundi, les hôtels, restaurants et les ménages produisent en eux seuls plus de la moitié de déchets du type alimentaire dont les EPT en font une grande quantité. Les EPT produites se retrouvent sur des tas de dépôt d'immondices tout près des marchés ou sont acheminés dans des décharges.. Cependant, leur valorisation énergétique est une action qui permet de mieux les gérer tout en protégeant l'environnement (Kabanyegeye, 2009).

I.2.3. Impact négatif sur l'environnement et la santé

- **Impact négatifs des pulpes de café**

Lors de la production du café vert par la voie humide, plus de 50 % de la masse des PC ne sont pas utilisées et sont souvent mis en décharge près des sites de production. Ceci pose des problèmes de stockage (volumes importants de déchets) et de contamination des sols et des nappes phréatiques du fait de la toxicité des lixiviats. L'utilisation et la gestion à grande échelle des déchets du café reste un défi dans le monde entier en raison de leurs teneurs importantes en caféine et en composés phénoliques, qui sont connus pour être très toxiques pour de nombreux écosystèmes (Da Silveira, 2019) ; de plus, d'après (Salazar et al., 2008), la croissance des veaux est retardée lorsqu'ils reçoivent une ration journalière contenant 15 % de pulpe de café.

La pulpe de café mise en décharge directement sur les sites de production génère une toxicité environnementale importante (sols, rivières, nappes phréatiques) en raison de sa forte charge organique, sa putrescibilité limitée (nuisance olfactive) et la présence de substances toxiques à la fois pour la faune aquatique et terrestre (Da Silveira, 2019).

❖ **Impact négatif des épluchures de pomme de terre**

Les épluchures de pomme de terre, comme d'autres déchets organiques, sont souvent considérées comme une ressource potentielle pour la valorisation énergétique ou la gestion des déchets (Wu, 2016). Toutefois, si elles ne sont pas correctement traitées, elles peuvent avoir des impacts négatifs sur l'environnement et la santé publique :

La décomposition et émission de gaz à effet de serre**:** Les épluchures de pomme de terre, lorsqu'elles sont envoyées dans les décharges sans être traitées de manière appropriée, subissent une décomposition anaérobie (en absence d'oxygène). Cela produit du méthane (CH_4). Le méthane est un des principaux contributeurs au changement climatique lorsqu'il est libéré dans l'atmosphère (Kaur *et al.*, 2020);

La pollution des sols et contamination par les produits chimiques : Les épluchures de pomme de terre peuvent contenir des résidus de pesticides ou de produits chimiques utilisés durant la culture des pommes de terre. Ces contaminants peuvent affecter la qualité du sol lorsqu'elles sont déposées dans des environnements non contrôlés, comme les décharges, ou lorsqu'elles sont mal compostées (Sarmah *et al*., 2004).

Parmi les effets nocifs des déchets non contrôlés , il faut inclure les mauvaises odeurs qui peuvent être à l'origine de divers effets indirects sur la santé tels que des nausées, des vomissements et des maladies de mains sales (Domingo & Nadal, 2008).

I.3. Contexte de la Co-digestion anaérobie

I.3.1. Production du biogaz à travers les pulpes de café

Les pulpes de café, qui représentent un sous-produit important de l'industrie du café, sont riches en sucres et en fibres, ce qui les rend particulièrement intéressantes pour la production de biogaz (Kessoum & Lougliti, 2021). La pulpe de café peut être utilisée comme substrat pour la production de biogaz dans des environnements mésophiles (Getachew *et al.*, 2023). Selon l' étude faite par (Jean Luc, 2009), les pulpes de café ont un potentiel de produire environ 140 m^3 de CH_4/T de matière organiques, 170 KWh d'énergie/T de matière organique.

(Chala *e t al*., 2018),(Rojas-Sossa *et al.*, 2017),(Samira *et al.*, 2023) ont rapporté que les pulpes de café sous l'action du consortium microbien peuvent générer une quantité très importante dont la teneur en méthane peuvent atteindre respectivement 70% , 56,8% , 52,61%.

I.3.2. Production du biogaz à travers les épluchures de pomme de terre

Les déchets alimentaires destinés à la production de biogaz ont un potentiel élevé. Les fruits et les déchets végétaux tels que les épluchures de pommes de terre nécessitant 55 jours de digestion complète pour produire du biogaz dans des conditions anaérobies (Yemane & Chen, 2018).

La production de biogaz à partir de résidus de déchets dans le traitement de l'amidon de pomme de terre a fait l'objet de recherches plus approfondies : (Azeitona, 2012) a démarré un système de fermentation de biogaz de résidus de pomme de terre basé sur la méthode d'acclimatation par rechargement, une technologie typique de fermentation de mélange, le taux de production moyen de biogaz peut atteindre 0,55 L/g de MS, bien plus élevé que la fermentation à inoculum multiple de 0,32 L/g de MS. Santos (2013) a fait des recherches sur la production de biogaz par co-digestion de pulpe de pomme de terre avec du fumier de vache dans un système de réacteur à cuve agitée en continu, Selon Krus Carlos (2014), la digestion anaérobie des épluchures de pommes de terre produit la quantité importante de biogaz dont la teneur en CH_4 est de 72%.

I.4. Méthanisation (ou digestion anaérobie)

I.4.1. Définition

La digestion anaérobie ou encore méthanisation est la dégradation de la biomasse en biogaz (mélange gazeux constitué majoritairement de méthane et dioxyde de carbone) par une communauté microbienne naturelle complexe présente dans les matières organiques. Elle pro duit aussi d'autres éléments tels que le sulfure d'hydrogène (H_2S) et l'ammoniac (NH_3) dans de très faibles proportions. En dehors du biogaz, on obtient aussi comme produit le digestat (le résidu de la digestion essentiellement constitué de matières minérales), qui est utilisé comme fertilisant en agriculture (Karol Ekouedjen, 2017).

La digestion anaérobie ou méthanisation est un procédé à la fois ancien et nouveau (Buffiere et *al*., 2007). Ancien car le phénomène naturel de fermentation en gaz inflammable dans les marais a été identifié par VOLTA en 1776 (Godon, 2011).

Nouveau car la mise en œuvre industrielle de cette biotransformation remonte aux années 1940, pour la digestion de boues, et au début des années 1990 pour les déchets.

Le processus de digestion anaérobie s'est développé dès le début du 20ème siècle en Europe et depuis 1940 en France. Les premières unités ont été implantées sur des exploitations agricoles principalement, pour traiter les fumiers.

Ce n'est qu'à partir des années 1970 que la méthanisation a connu un réel essor, avec le développement des unités destinées au traitement des boues d'épuration. A l'heure actuelle, la méthanisation est employée dans différents secteurs d'activités : l'agriculture et l'élevage, le traitement des ordures ménagères, le traitement des déchets industriels, le traitement des boues d'épuration (Poirier, 2021).

I.4.2. Mécanismes de la digestion anaérobie

La méthanisation est un processus de fermentation anaérobie complexe, mettant en jeu plusieurs étapes biochimiques notamment l'hydrolyse, l'acidogenèse, l'acétogenèse et la méthanogenèse qui conduit à la formation de méthane à partir des produits de la réaction précédente.

En raison de la complexité du processus de methanisation, la totalité des transformations n'est pas réalisée par une seule espèce, mais par un ensemble (un consortium), au sein duquel chaque groupe réalise une partie du travail de décomposition (Figure 1).

Hydrolyse

Cette étape d'hydrolyse correspond à la dégradation des macromolécules organiques (protéines, lipides, polysaccharides…) en monomères (acide aminé, acide gras, oses…). Ce sont les bactéries dîtes hydrolytiques qui vont permettre de casser des structures organiques complexes en libérant des enzymes (protéases, lipases, cellulases...). Cette étape est déterminante pour la suite de la fermentation, car seules les molécules simples seront disponibles pour la suite du traitement. D'un point de vue cinétique, l'hydrolyse est considérée comme une étape limitant (Bernet, 2020).

Acidogenèse

Les monomères obtenus à l'étape d'hydrolyse sont fermentés principalement en acides gras volatils (AGV), en alcools, en H_2 et en CO_2. Les AGV sont des acides carboxyliques (comprenant un groupement carboxyle)**.** Les bactéries responsables de cette étape sont nombreuses ; on les appelle « bactéries acidogènes » (Poulleau, 2002).

Acétogenèse

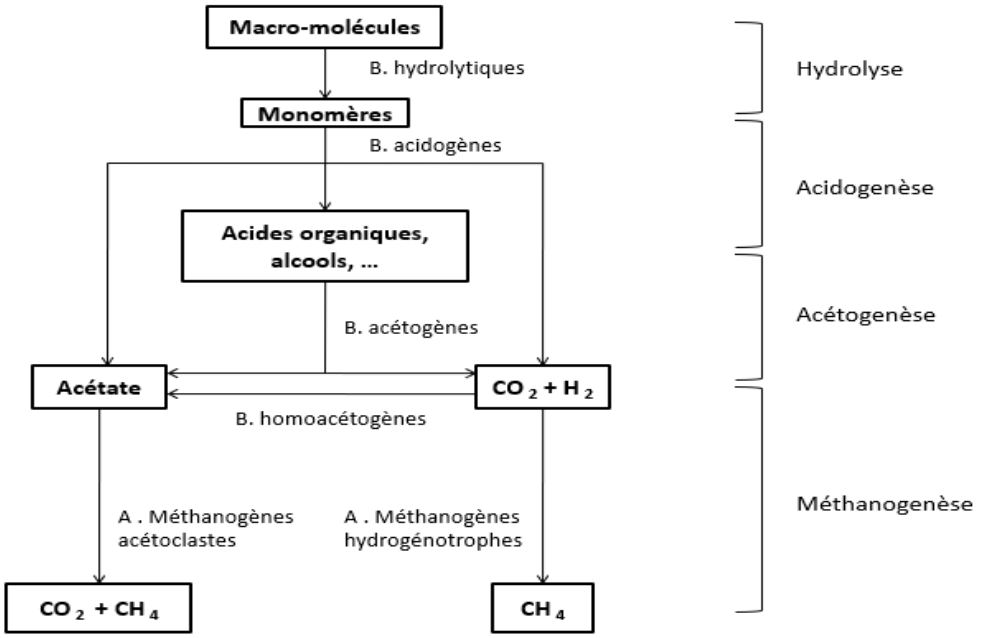
Dans cette étape, une grande partie des acides gras volatils (AGV) et des alcools sont dégradés par les bactéries acétogènes pour former de l'acide acétique (CH_3COOH). Une autre partie est convertie en dihydrogène (H_2) et dioxyde de carbone (CO_2) (Angeli, 2019).

Méthanogenèse

Il y a deux voies de production du méthane :

- 70% par les bactéries méthanogènes acétoclastes, le méthane est produit à partir de l'acétate.
- 30% par les bactéries méthanogènes hydrogénotrophes, le méthane est produit à partir du dioxyde de carbone et de l'hydrogène(Bernet, 2020).

Les différentes étapes de la digestion anaérobie sont résumées dans la figure suivante :



Légende

A : Archaea

B : Bactéries

Figure I.3 : Principales voies métaboliques de la digestion anaérobie (Bernet, 2020).

I.4.3. Produits de la digestions anaérobie et leurs caractéristiques

Biogaz

Le biogaz est principalement constitué de méthane combustible et de gaz carbonique. D'autres gaz peuvent venir s'ajouter de façon minoritaire dans la composition du biogaz: NH_3, N_2, sulfure d'hydrogène (H_2S) , … **(**Poirier,2021**)**. La teneur de ces gaz dépend étroitement du déchet traité et du degré d'avancement de la méthanisation. Le pouvoir calorifique du biogaz dépend de sa richesse en méthane. Si le biogaz contient 70% de CH_4, le pouvoir calorifique inférieur sera de 6,96 kWh/m^3 et le pouvoir calorifique supérieur sera de 7,72 kWh/m^3 (Bensmail & Touzi, 2012).

Digestat

Le digestat, en sortie de méthaniseur, est un produit relativement humide qui n'est pas complètement stabilisé. En effet, les réactions de dégradation anaérobies ne permettent pas une dégradation totale de la matière organique (MO) contenue dans les déchets. Certaines fractions de cette MO sont inaccessibles aux bactéries anaérobies (Buffière et al., 2007).

Dans le cas de résidus organiques, la méthanisation est analogue du point de vue des transformations biochimiques à ce qui se passe lors de la phase de fermentation en compostage; le digestat peut ainsi être post-composté et aura, après maturation, des propriétés agronomiques analogues à celle d'un compost qui aurait été élaboré avec les mêmes produits initiaux.

Dans le cas des ordures ménagères résiduelles, qui contiennent une teneur importante en plastiques et en métaux, la valorisation agronomique est plus problématique.
En fonction du procédé de méthanisation choisi, du type de maturation prévu et des possibilités locales de traitements des effluents, il est possible de déshydrater le digestat pour générer une fraction liquide (jus) qui pourront en partie être re-circulés ou qui devront être traités avant rejet au milieu naturel et une fraction solide (gâteau) qui sera envoyé en post-compostage.

I.5. Paramètres clés de la digestion

Température

Le processus de dégradation anaérobie, pour se dérouler dans les meilleures conditions, peut se situer dans 2 gammes de température : 35-40°C (mésophile) et 50-55°C (thermophile).

Le contrôle de la température au sein du digesteur doit donc être précis (système de mesure fiable et étalonné régulièrement), régulier et représentatif de l'ensemble du digesteur.

A partir des données recueillies, le système de chauffage du digesteur doit être capable d'atteindre une température cible (double enveloppe, chauffage du réacteur ou du produit alimenté...) (Cazier, 2015).

Taux de la matière sèche (MS)

La détermination de la matière sèche (MS) est un des critères qui permet de classer le substrat en fonction de son aptitude à être plus ou moins dégradable par voies biochimiques. Elle conditionne le choix thermochimique pour les teneurs en matière sèche supérieures à 30% ,ou biochimique par fermentation, pour des teneurs inferieures.
La teneur en matière sèche (MS) du substrat à méthaniser détermine, généralement le choix des procédés de méthanisation et le type de digesteur anaérobie (Billy, 2015). La digestion anaérobie par « voie humide » est adaptée au traitement des déchets ayant entre 5 et 20% de taux de matière sèche (MS) (Traoré *et al.*, 2016).

Production de biogaz et % de CH_4

La quantité de biogaz produit et sa teneur en méthane sont des paramètres clés que l'on peut obtenir aisément via des analyseurs de gaz installés sur l'unité.

La corrélation entre les quantités de déchets alimentés et la production de méthane associée permet de vérifier le déroulement de la dégradation d'un produit. Lorsque la dégradation paraît insuffisante par rapport aux objectifs calculés à partir du potentiel de méthane théorique, il convient de réduire (voire stopper) l'alimentation et d'identifier rapidement la source de cette baisse de rendement pour éviter une saturation du système.

pH

Le pH est un paramètre essentiel car l'écosystème de la digestion anaérobie, en particulier les organismes méthanogènes, est sensible aux variations du pH, donc on admet que le pH est le premier indicateur du mauvais fonctionnement éventuel d'un digesteur. Si le pH est au-dessous de 6.5, l'ajout de la chaux ou du bicarbonate de sodium corrige cette anomalie (Traoré *et al.*, 2016**)** .

Le pH optimum de la méthanisation se situe autour de la neutralité, entre 6.5 et 8.5 (Saïdi-Boulahia *et al.*, 2018). Le pH a une importance primordiale pour l'accomplissement de la phase méthanogénique, puisqu'une diminution du pH entraîne une inhibition du processus de méthanisation.

La variation du pH dépend de l'évolution de la fermentation de la matière organique ; le pH diminue avec la production des AGV durant la phase acidogénique (Traoré *et al.*, 2016)

TAC

Le Titre Alcalimétrique Complet est une mesure qui indique le pouvoir tampon d'un substrat et ainsi sa capacité à stabiliser les variations de pH, proches de la neutralité. Il est principalement défini par la concentration en CO_2 dissous dans la phase liquide (HCO_3) et en ions carbonates et hydroxyles. Le titre alcalimétrique complet permet de connaitre les doses de carbonates d'hydroxydes et d'hydrogénocarbonates alcalins ou alcalino-terreux, responsables du pouvoir tampon du fermenteur vis-à-vis des acides organiques et acides gras volatils. Cette alcalinité permet au pH de rester aux alentours de la neutralité malgré la présence d'acides.

Dans le cas d'une micro-méthanisation, le digesteur, étant particulièrement sensible aux modifications de pH, plus le titre alcalimétrique est élevé, plus le réacteur sera stable. Le résultat est classiquement donné en mg par litre de $CaCO_3$. Les valeurs comprises entre 2000 et 4000 mg/l de $CaCO_3$, permettent habituellement d'assurer la neutralité de la digestion anaérobie (Angeli, 2019).

AGV

La détermination de la concentration en Acides Gras Volatils permet de s'assurer que les réactions de dégradation se déroulent correctement. En effet, la principale cause d'acidification du milieu se situe au niveau de l'accumulation d'acides gras volatils. Une concentration en AGV inférieure à 3 $g.l^{-1}$ est préconisée. Cependant dans la digestion des déchets solides, et en particulier dans les digesteurs fonctionnant en voie sèche, des taux d'AGV supérieurs à 5 g/L peuvent être constatés, sans affecter le rendement de dégradation.). De plus, l'accumulation d'AGV n'est pas seulement problématique en tant que cause d'acidification ; les acides gras volatils peuvent être responsables d'une inhibition du processus en pénétrant dans les cellules bactériennes. Il faut toutefois noter que cela se produit lorsqu'ils sont sous forme moléculaire uniquement, soit sous un pH à tendance acide.

A pH basique, les AGV sont sous forme ionisée et cela atténue leur effet inhibiteur. Enfin, les différents AGV sont plus ou moins inhibiteurs. Ainsi, l'acide propionique est plus toxique que l'acide acétique ou l'acide butyrique (Cazier, 2015). Lorsque des valeurs importantes d'AGV sont mesurées (8 à 10 g/L), il convient de ralentir ou au pire de stopper l'alimentation afin de laisser le temps au système de se réguler et de consommer les AGV produits.

Si ce taux important a provoqué une acidification prononcée (pH < 6,5), il convient alors de rétablir un pH légèrement basique afin de rétablir des conditions favorables pour les bactéries.

Rapport Carbone / Azote (C/N) sur le substrat de départ

Le rapport C/N est représenté par la relation entre la teneur en carbone et en azote de la matière organique. Dans une digestion anaérobie, le C/N optimal est compris entre 20 et 30 (Azeitona, 2012). Un rapport plus élevé engendre une consommation rapide de l'azote et conduit à une faible production de biogaz. Mais aussi, une trop faible valeur du rapport C/N entraîne une accumulation d'ammoniac et des pH dépassant 8,5 qui sont toxiques pour les bactéries méthanogènes (Krus Carlos, 2014).

Un rapport C/N favorable pour la digestion anaérobie peut être obtenu par le mélange des déchets à faibles et à forts C/N. Ils peuvent être des déchets organiques solides avec des déjections animales (Halmaciu et al., 2024)**.**

CHAPITRE II. MATERIEL ET METHODES

II.1. Description du site d'échantillonnage

Les échantillons utilisés dans cette étude sont la pulpe de café (a) et les épluchures de pommes de terre (b)**.** Les échantillons de pulpe de café ont été collectés à l'usine de dépulpage de Murwi dans le SOGESTAL Mirwa, située à 2 km du chef-lieu de la commune de Murwi dans la province de CIBITOKE. Ce site est situé à 2º53'505'' de la latitude Sud, 29º13'995''de longitude Est et à 1208 m d'altitude. Ces coordonnées géophysiques sont prises à l' aide d' une application GPS de la téléphone portable. Les épluchures de pommes de terre utilisées comme substrat ont été collectées dans un restaurant en zone Nyakabiga de la commune Mukaza en Mairie de Bujumbura.

La figure II.1 illustre la photographie des pulpes de café et des épluchures de pomme de terre utilisés dans l'alimentation des digesteurs.



Figure II.1 : Photographie des pulpes de café (a) et les épluchures de pomme de terre (b).

II.2. Ramassage, conservation et transport de l'échantillon

Les pulpes de café ont été ramassées dans la décharge de l'usine et conservés dans le sceau bien lavé. Les épluchures de pomme de terre ont été ramassées dans un restaurant et conservés dans un sac bien nettoyé. L'inoculum a été prélevé a la station d'epuration des eaux de Buterere et conservé dans des bidons de 5L.

Tous les échantillons ont été transportés au Laboratoire de Chimie, Sciences de la terre et de l'Environnement (LACHISTE) de la faculté des sciences, département de chimie, à l'Université du Burundi.

II.3. Inoculum

L'inoculum a été prélevé à la station d'épuration des eaux de Buterere , zone Buterere de la commune Ntahangwa en mairie de Bujumbura. Il a été conservé dans des petits bidons de 5L.

II.4. Préparation de l'échantillon

Avant leur caractérisation, les PC et les EPT ont été d'abord séchés à l'étuve à 105ºC pendant 24h puis broyés manuellement à l'aide d'un mortier et tamisés à l'aide des tamis pour avoir une poudre fine de 800nm.

II.5. Caractérisation physico-chimique des substrats

La caractérisation des substrats et la mise place du dispositif expérimental ont été réalisée dans le Laboratoire de Chimie, Sciences de la terre et de l'Environnement (LACHISTE) de la faculté des sciences, département de chimie, à l'Université du Burundi.

II.5.1. Détermination du taux d'humidité et de la quantité de matière sèche

Un creuset vide a été placé dans une étuve réglée à 105°C pendant 15 minutes. Il a ensuite été retiré et refroidi dans un dessiccateur avant d'être pesé (m_0). Une masse d'environ 1 g de substrat (soit de pulpe de café ou d'épluchures de pommes de terre finement broyées) a été ajoutée et pesée (m_1). Le creuset contenant du substrat était à nouveau placé dans une étuve réglée à 105°C pendant 24 h, retiré puis refroidi dans le dessiccateur et enfin sa masse était pesée (m_2). Les deux expressions suivantes ont été utilisées pour déterminer respectivement l'humidité et la matière sèche (MS).

$$\textbf{\textit{Humidit}é\ (\%)} = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0} \times 100 \qquad \textit{(1)}$$

$$\textbf{\textit{MS}}(\%) = \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} \times 100 \qquad \textit{(2)}$$

Avec m_0 : la masse du creuset (en g) ; m_1 : la masse de l'échantillon et du creuset avant séchage (en g) ; m_2 : la masse de l'échantillon et du creuset après séchage.

II.5.2. Détermination de la matière organique (NF, 1985)

L'échantillon obtenu à la section II.4.1. a été placé dans un four réglé à une température allant jusqu'à 550°C pendant 4 heures. Après cette période, le creuset a été retiré, refroidi dans le dessiccateur et enfin sa masse a été pesée (m^3). L'expression suivante a été utilisée pour déterminer la matière organique(MO) :

$$\boldsymbol{MOT}(\%) = \frac{\boldsymbol{m_2 - m_3}}{\boldsymbol{m_2 - m_0}} \times \mathbf{100} \quad \textit{(3)}$$

Avec MOT : matière organique totale ; m_2 : la masse de l'échantillon et du creuset après séchage à 105ºC (en g) ; m_3 : la masse de l'échantillon et du creuset après calcination à 550ºC (en g)

II.5.3. Détermination de carbone organique et azote total

a. Dosage du carbone organique total

La teneur en carbone a été déterminée dans les 2 substrats par la méthode d'oxydation ou méthode Walkley-Black (Kouassi, 2018).

Une masse de 0,065g de l'échantillon a été pesé sur une balance analytique et introduite dans une fiole conique de 250 ml dans laquelle un volume de 10 ml de bichromate de potassium 1 N a été ajouté. Puis, un volume de 20 ml d'acide sulfurique concentré à 98 % a été ajouté et un verre de montre a été placé sur la fiole conique pour couvrir. Ensuite, on a agité vigoureusement pendant 1 minute et laissé reposer pendant 30 minutes. On a rincé le verre de montre et ajouté respectivement 150 ml d'eau déminéralisée, 10 ml d'acide phosphorique concentré et 12 gouttes de la solution indicatrice de férroïne. Enfin, l'excès de bichromate de potassium a été titré avec la solution de sulfate ferreux 0,5 N. Lors de l'apparition de la coloration turquoise, nous avons titré lentement jusqu'à la coloration finale brune. On a noté le volume utilisé.

Les résultats sont exprimés en pourcentage de carbone organique total(COT). En considérant les concentrations de sulfate ferreux et du bichromate de potassium, chaque millilitre de bichromate de potassium qui réagit correspond à 4 mg de carbone. Le pourcentage de carbone dans l'échantillon est déterminé comme suit :

$$COT(\%) = \frac{(\mathrm{A}-\mathrm{B}) \times 10 \times 0{,}004 \times 100}{\mathrm{P} \times \mathrm{A}} \quad (4)$$

où COT : concentration de carbone organique total (%); 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 grammes de carbone par millilitre de bichromate; P : poids de l'échantillon titré exprimé sur base sèche (g); 100 : facteur pour obtenir un pourcentage

b. Dosage de l'azote total

Elle a été mesurée par la méthode kjeldhal selon la norme AFNOR ISO 11261 sur des échantillons séchés à 105°C puis finement broyés et tamisés à 800 µm de mailles(Issoufou et al., 2024). Le principe consiste à détruire la matière organique par l'action de l'acide sulfurique concentré à chaud en présence d'un catalyseur chimique.

L'azote organique est alors converti en azote minéral sous forme de sulfate d'ammonium. Cette minéralisation serait due à une oxydation et réduction simultanées des substances.

La solution sulfurique est rendue fortement alcaline puis l'ammoniac est déplacé par un excès de soude caustique par entraînement à la vapeur. L'ammoniac (NH_3) distillé est recueilli dans l'acide borique additionné d'indicateurs et puis titré soit directement soit en retour par l'acide sulfurique de normalité et de facteur de correction donné.

Le dosage de l'azote total par la méthode Kjeldahl comporte 3 phases à savoir : la minéralisation, la distillation et le titrage.

1° Digestion ou minéralisation par attaque acide

Dans un ballon Kjeldahl de 500 ml, 1g de poudre fine de l'échantillon a été introduit et un volume de 25 ml d'acide sulfurique concentré a été ajouté. Une cuillère d'un mélange de catalyseur chimique ($CuSO_4$, K_2SO_4, $FeSO_4$) a été introduite à la solution obtenue. Ensuite, nous avons rincé les parois du ballon au moyen d'un jet de pissette et nous avons chauffé sous hotte jusqu'à l'apparition d'une coloration bleue-verte de la solution et à la réduction au minimum de cette précédente. Cette étape se résume par la réaction chimique ci-après :

N – organique (échantillon) (s)+ H_2SO_4conc (aq) → $(NH_4)_2SO_4$ (aq) + $CO_{2\ (g)}$ + H_2O (l) (5)

2° Neutralisation et distillation

Après refroidissement et dilution avec au moins 150 ml d'eau distillée, on a ajouté à la solution obtenue 1g de thiosulfate de sodium. Ensuite, nous avons apprêté l'appareillage de distillation par entraînement à la vapeur puis en inclinant le ballon. Nous avons ajouté un excès de NaOH 50% (au minimum 75 ml) jusqu'à l'obtention du milieu basique. Nous avons connecté le ballon à l'appareil de distillation tel que l'extrémité du réfrigérant plongé dans une solution de 25 ml d'acide borique 2% à laquelle quelques gouttes d'indicateurs (méthyl rouge et vert de bromo-crésol) ont été additionnées. La distillation se fait en chauffant modérément et régulièrement. L'entraînement de l'ammoniac se produit assez rapidement et il faut continuer la distillation jusqu'à ce que le volume de la solution borate atteigne au moins 75 ml. Les réactions mises en jeu dans cette phase sont :

$$\text{N-Végétaux (s)} + H_2SO_4\,(aq) \rightarrow (NH_4)_2SO_4\,(s) \quad (6)$$

$$(NH_4)_2SO_4\,(s) + 2NaOH\,(aq) \rightarrow 2NH_4OH^+\,(aq) + Na_2SO_4\,(aq) \quad (7)$$

$$NH_4OH\,(aq) + H_2BO_5\,(aq) \rightarrow NH_4^+\,(aq) + H_2O\,(l) + H_2BO_5\,(aq) \quad (8)$$

$$2NH_4^+\,(aq) + 3H_2BO_5\,(aq) + H_2SO_4\,(aq) \rightarrow 2HBO^-_3\,(aq) + (NH_4)_2SO_4 \quad (9)$$

$$NTK(\%) = \frac{1.4008\ X\ (Y-Bl)\ X\ N\ X\ fk\ X\ \frac{V_1}{V_2}}{P} \quad (10)$$

Où v_1 est le volume (ml) du jaugé (en général 250ml) ; v_2 est le volume (ml) de prise pour analyse (en général 25ml) ; Y est le volume (ml) d'une solution titrée par H_2SO_4 0,05 N ; *fk* est le facteur correctif de H_2SO_4 0,05 N ; B est le volume moyen de H_2SO_4 0,05 N nécessaire pour titrer les blancs ; P est le poids de l'échantillon (en g) ; N est la normalité de l'acide utilisé.

3° Calcul du facteur de correction (*fk*)

3ml de la solution Na_2CO_3 a été prélevé et titré par H_2SO_4 de normalité N en présence de phénolphtaléine jusqu'à virage du rouge à l'incolore. Soit V le volume de H_2SO_4 ajouté, le facteur correctif fk est donné par la relation : $fk = \frac{3ml\ X\ 0{,}05}{v\ X\ N}$ (11)

Le calcul de ce facteur de correction a montré que fk = 1.

II.6. Paramètres de suivi du fonctionnement du digesteur

L'évolution des caractéristiques physico-chimiques des substrats au cours de la méthanisation a été suivie par le contrôle des différents paramètres de fonctionnement du système de fermentation.

II.6.1. Détermination du pH

Le pH a été déterminé au début et à la fin du processus de digestion anaérobie, à l'aide d'un pH-mètre de marque Consort C6010.

II.6.2. Détermination du titre alcalimétrique complet (TAC) par la méthode titrimétrique

Un volume de 25 ml du substrat a été titré par pH-métrie avec une solution de H_2SO_4 0,04 N en deux étapes. Dans la première étape, le dosage est effectué jusqu'à pH 5,75. Dans la dernière étape, le dosage est poursuivi jusqu'à pH 4,3.

Expression des résultats :

$$TAC = \frac{V \, X0{,}1 \, X1000}{25} \text{ (méq/l)} \qquad (12)$$

$$= V \times 4, \text{ en meq.l-1}$$

Ou $TAC = V \times 4 \times 0{,}05$, en g.l-1 de $CaCO_3$

II.6.3. Détermination d'Acides gras volatils (AGV) par la méthode titrimétrique

La mesure de la concentration totale en Acides Gras Volatils est déterminée grâce à une méthode titrimétrique: sur une prise d'essai de 25 mL d'échantillon, le pH est ajusté à 3,5 avec H_2SO_4 (0,1N). Le lixiviat est ensuite chauffé pendant 3 minutes de manière à dégazer le dioxyde de carbone. La solution est ensuite refroidie à température ambiante et le pH est ajusté à 4 avec NaOH (0,1N) (volume V_2) puis à 7 (volume V_3). L'acidité gras volatile est déterminée par différence de ces volumes(Berthe, 2006)

Expression des résultats :

$$AGV = \frac{(V3-V2)X0{,}1X\ 1000}{25} \text{ (mg/l éq-acétate)} \qquad (13)$$

$$= (V_3 - V_2) \times 4, \text{ en meq.l}^{-1}$$

Où

Acidité volatile = $(V_3 - V_2) \times 4 \times 0,06$, en $g.l^{-1}$ d'acide acétique.

Le rapport AGV/TAC a été déterminé et doit être inférieur à 0,5

II.7. Protocole expérimental de digestion anaérobie

Le procédé repose sur l'utilisation de neuf digesteurs biologiques en mode batch de quatre litres chacun, hermétiquement scellés avec des bouchons spécifiques (Figure II.2). Les digesteurs sont répartis en deux séries : une première série de six digesteurs, suivie d'une seconde série de trois digesteurs. Chaque série est expérimentée pendant une période de 42 jours. Les digesteurs sont placés dans un réservoir de 20 litres d'eau pour éviter toute entrée d'oxygène. Chaque réacteur est équipé de trois ouvertures : l'une pour acheminer le biogaz vers le dispositif de mesure, une autre pour introduire un milieu de culture stimulant la croissance des bactéries anaérobies et la troisième ouverture permet de prélever des échantillons dans le digesteur pour surveiller l'évolution du milieu réactionnel en mesurant divers paramètres tels que le pH, le TAC et les AGV.

Le système de mesure du biogaz consiste en un réservoir d'environ 15 litres, dans lequel sont placées à l'envers six éprouvettes graduées équipées de robinets à gaz. Ces éprouvettes inversées sont immergées dans une solution piège composée d'eau saturée en NaCl, afin d'éviter que le dioxyde de carbone (CO_2) du biogaz ne se dissolve dans la solution.

Un bouchon septum (préparé à cet effet) est ensuite appliqué sur chacun de ces robinets afin de prendre un échantillon de biogaz de volume connu et le faire passer dans le dispositif de détermination des teneurs en CH_4 et en CO_2. Pendant l'injection de cet échantillon de biogaz dans le dispositif de détermination des teneurs en CH_4 et en CO_2, le CO_2 est absorbé dans une solution de KOH 9 N se trouvant dans ce dispositif et le CH_4 n'étant pas soluble, déplace celle-ci, ce qui facilite la quantification du volume du méthane. Le volume de CO_2 correspond à la différence entre le volume de biogaz injecté et celui de CH_4.

Pour maintenir les digesteurs à la température mésophile (35°C), des résistances de chauffage réglables étaient plongées dans le bac contenant 20 L d'eau et les six (6) digesteurs. Le mélange pour la fermentation est composé de 2,5 kg d'un mélange de pulpes de café fraîches et des épluchures de pomme de terre. Les épluchures de pomme de terre ont été d'abord broyés à l'aide d'un mixeur Binatone Blender BLG-451 -1.5L - 350W. La boue de la station d'épuration des eaux de Buterere a été utilisée comme inoculum.

Dans ces essais, neufs scénarios différents définis sur base d'un critère « rapport Substrat /Inoculum (S/I) ont été évalués où S représente le mélange de pulpes de café fraîches et des épluchures de pomme de terre tandis que I est la boue de la station d'épuration des eaux usées (jouant le rôle d'inoculum). Les ratios S/I qui sont respectivement égaux à 3/1, 1/1 et le témoin ont été évalués comme le montre le Tableau 2. Selon la littérature la durée de suivi des digesteurs a été de 42 jours pour les scénarios 3/1, 1/1 et le témoin quel que soit le type de substrats.

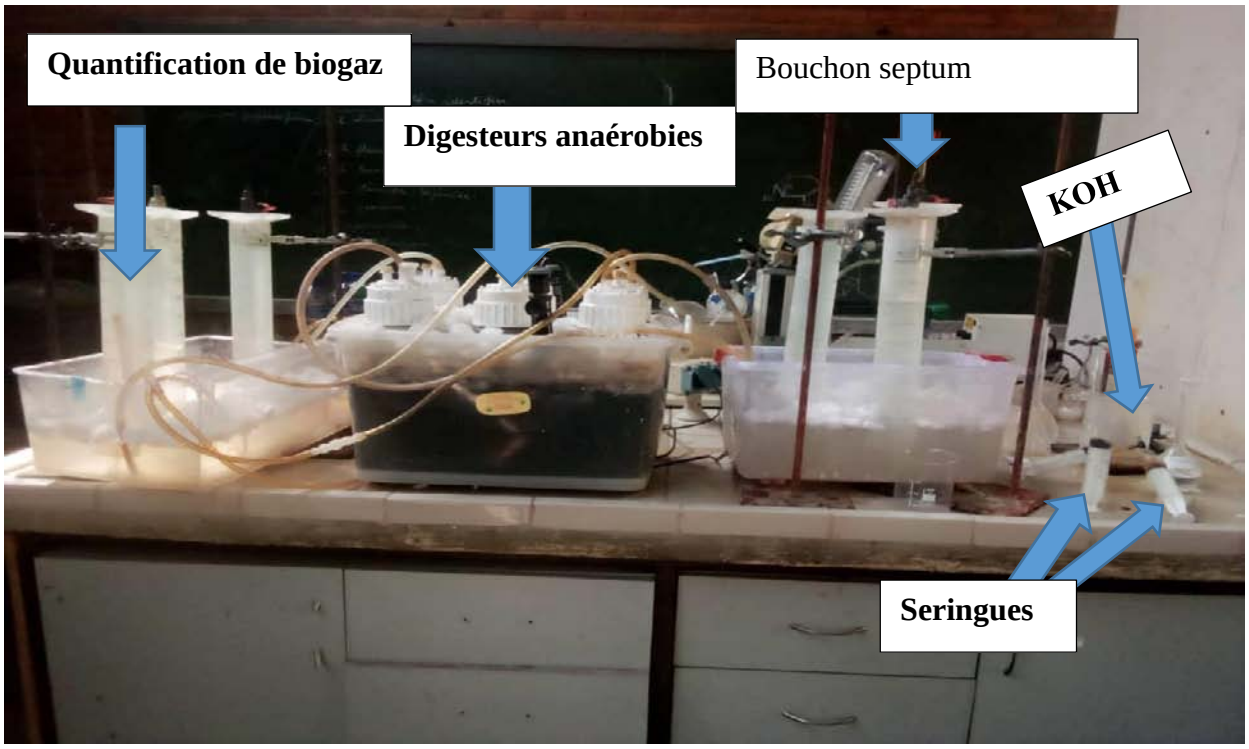


Figure II.2 : Dispositif pour la production du Biogaz.

Tableau II.1 : Composition du mélange des substrats au cours de la digestion anaérobie.

	Pulpes de café	Epluchures de pomme de terre	Inoculum	Rapport
Pulpes de café	100		-	Témoin
	75		25	3/1
	50		50	1/1
Epluchure de pomme de terre		100	-	Témoin
		75	25	3/1
		50	50	1/1
Pulpes de café et Epluchures de pomme de terre	50	50	-	Témoin
	37,5	37,5	25	3/1
	25	25	50	1/1

Après avoir mesuré les divers paramètres physico-chimiques, tels que la teneur en eau, la matière sèche, et le rapport C/N des différents substrats, nous avons déterminé les différents mélanges selon les scénarios témoin, 1/1 et 3/1. Le premier mélange comprend des pulpes de café et l'inoculum, le deuxième mélange est constitué d'épluchures de pommes de terre et d'inoculum, et le troisième mélange associe des pulpes de café, des épluchures de pommes de terre et l'inoculum. Le tableau ci-dessus présente la proportion en pourcentage de chaque substrat dans les mélanges ainsi que le scénario correspondant.

II.8. Méthodologie de calcul de rendement énergétique produit à partir du méthane

Afin d'estimer l'énergie potentielle issue du processus de co-digestion anaérobie, le volume de méthane produit a été converti en équivalents énergétiques. La conversion a été réalisée à partir d'un facteur standard basé sur le pouvoir calorifique du méthane. Selon la littérature, 1 m³ de méthane correspond à une énergie de 8570 Kcal, soit environ **9,7** kWh. Ainsi, le calcul de l'énergie produite s'effectue en utilisant les formules suivantes :

Conversion en kilocalories (Kcal) :

$E_{Kcal} = V_{CH4} \times 8570$

Conversion en kilowattheures (kWh) :

$E_{kWh} = V_{CH4} \times 9,7$

Où :

- E_{Kcal} est l'énergie produite en kilocalories,
- E_{kWh} est l'énergie produite en kilowattheures,
- V_{CH4} est le volume de méthane produit (en m^3).

Ces équivalences permettent de comparer la performance énergétique des substrats testés (pulpes de café et épluchures de pomme de terre), et d'apprécier leur potentiel dans un cadre de valorisation énergétique.

CHAPITRE III. PRESENTATION ET DISCUSSIONS DES RESULTATS

III.1. Caractéristiques des échantillons brutes

Le Tableau III.1 montre les résultats obtenus lors de la caractérisation des substrats utilisés au cours de la digestion anaérobie. Ces résultats montrent que la teneur en matière sèche des substrats est de 18,2 % et 20,4 % respectivement pour les pulpes de café et les épluchures de pomme de terre. Les résultats sont proches à ceux trouvés par (Aguirre et *al*., 2018) pour les pulpes de café (19,11−20,23 %) et ceux trouvés par (Lacour, 2012b) pour les épluchures de pomme de terre(20%). Les pulpes de café ont la teneur en eau de 81,8 %, et les épluchures de pomme de terre 79,6 %. La teneur en matière organique est respectivement de 92,19 et 90,47 % pour les pulpes de café et les épluchures de Pomme de terre. Les autres résultats du tableau sont la teneur en carbone et en azote. Ces deux paramètres nous ont permis de déterminer le rapport C/N de nos substrats. Le rapport C/N des pulpes de café est de 30,64 , comparativement à celle trouvé par (Chala et al., 2018) qui est de 25 tandis que les épluchures de pomme de terre ont un rapport C/N de 28,36, une valeur qui est semblable aux résultats du travail de Krus Carlos (2014) et celui de Rucakumugufi *et al* (2021) (respectivement 28 et 27,81 pour les épluchures de pomme de terre).

Tableau III.1 : Détermination de taux d'humidité, matière sèche, matière organique et le rapport C/N.

Types de substrats	Matière sèche(%)	Taux d'humidité(%)	MO(%ms)	COT(%)	NTK(%)	C/N
Pulpes de café	18,2	81,8	92,19	47,19	1,54	30,64
Epluchures de pomme de terre	20,4	79,6	90,47	41,7	1,47	28,36

III.2. Evolution de certains paramètres dans les digesteurs durant la digestion anaérobie

Les paramètres suivis lors de la digestion anaérobie ont augmenté en valeur à la fin des essais (Tableau III.2). Cela pourrait s'expliquer par l'activité des micro-organismes qui, en dégradant les substrats, libèrent du biogaz.

Le Tableau III.2 présente les valeurs de pH, AGV, TAC et le rapport AGV/TAC au début et à la fin des essais de digestion anaérobie. Les résultats montrent que la plupart des paramètres ont augmenté à la fin des essais. Dans certains cas, le pH a augmenté à la fin, ce qui pourrait être dû à l'action des bactéries méthanogènes qui ont consommé les acides gras volatils et l'acide acétique produits lors des étapes d'acidogènèse et d'acétogenèse . Toutefois, dans les essais où le pH est resté faible en fin de processus, cela pourrait être expliqué par une prédominance des acides gras volatils et de l'acide acétique issus de substrats riches en glucides et lipides, lesquels influencent fortement ce ratio. L'accumulation de ces acides peut inhiber la méthanogénèse en provoquant une chute du pH du milieu (Adou *et al*., 2020). Une production excessive des AGV au cours de l'hydrolyse entraîne une chute rapide du pH du milieu et par suite une inhibition de la méthanisation(Jawad & Dounia, 2021)

Tableau III. 2 : Evolution de certains paramètres dans les digesteurs durant la digestion anaérobie.

Substrats	Scénario	Ph		AGV (mgl^{-1})		TAC ($méq.l^{-1}$)		AGV/TAC	
	(Rapport S/I)	In	Fin	In	Fin	In	Fin	In	Fin
PC	T	5,12	5,29	58,6	56	187	204	0.3	0.27
	3/1	6,33	7,75	71	40	364	392	0.195	0.1
	1/1	6,08	7,7	122	94	416	500	0.29	0.188
EPT	T	5,49	4,43	88	189	269	222	0.3	0.85
	3/1	5,75	7,85	166	72	367	404	0.45	0.18
	1/1	6,5	4,4	138	323	128	48	1.07	6,72
PC + EPT	T	6,01	4,35	260	128	184	120	1,41	1.06
	3/1	6,00	4,3	112	166	104	44	1,08	3,77
	1/1	6,01	7,35	118	72	108	304	1,09	0,23

In : Initial, Fin : Final

L'augmentation du pH et la diminution du rapport AGV/TAC à la fin des essais est due à l'action des bactéries méthanogènes, qui consomment les acides gras volatils et l'acide acétique produits lors des phases d'acidogénèse et d'acétogénèse. En outre, un pH faible peut inhiber la méthanogénèse, ce qui explique l'élévation du pH observée à la fin de la digestion anaérobie (Adou *et al.*, 2020).

La diminution du rapport AGV/TAC à la fin des essais montre

III.3. Cinétique de production du Biogaz et du méthane

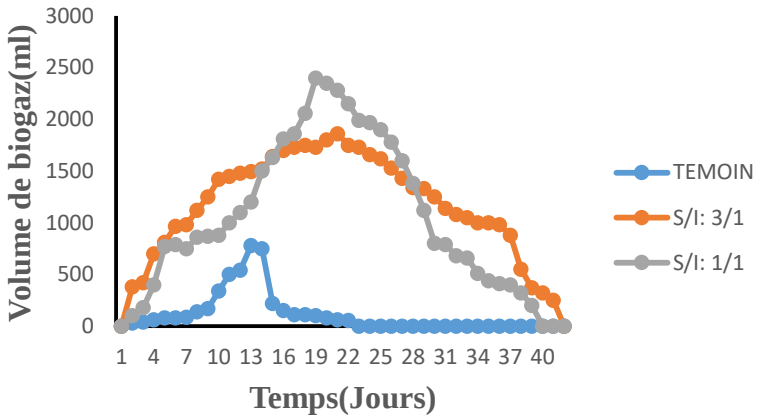
III.3.1. Cinétique de production de Biogaz

La figure III.1((a), (b) et (c)) illustre la quantité de biogaz générée lors des processus de co-digestion et de mono-digestion anaérobie. Il convient de noter que les pulpes de café seules (figure III.1(a)) génèrent une quantité de biogaz particulièrement élevée, suivies du mélange de pulpes de café - d'épluchures de pommes de terre (figure III.1(c)), et enfin des épluchures de pommes de terre seules (figure III.1(b)).

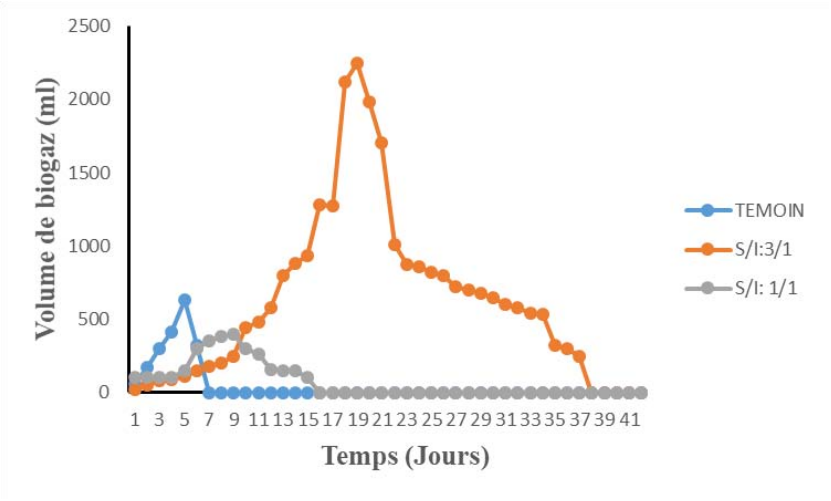
Pour les pulpes de café (figure III.1(a)), le rapport S/I 3/1 produisent une quantité de biogaz particulièrement élevée, suivie du rapport S/I 1/1 et le témoin. A cet effet, le pic le plus élevé montrant le volume maximal de production du biogaz apparait au 19ème jour pour le rapport 2/2, puis au 22ème jour pour le rapport 3/1. Mais pour le témoin, le pic apparait légèrement. Signalons également que la production de biogaz a commencé dès le 2è jour (voir figure III.1(a)) pour le rapport 3/1 et 2/2, mais pour le témoin, elle commence juste au jour 7. Tout cela pourrait être du à l'action des microorganismes méthanogènes générés par l'inoculum jouant le rôle d'activateur du processus de la digestion anaérobie (Ntakiyiruta *et al*., 2021).

Pour le cas des épluchures de pomme de terre (figure III.1(b)), seul le rapport S/I 3/1 qui génèrent un volume biogaz plus élevé que les autres. La production maximale est obtenue au jour 19 pour ce même rapport. Les autres n'ont pas produit suffisamment suite à l'inhibition du processus qui a provoqué la chute du pH (voir tableau III.2).

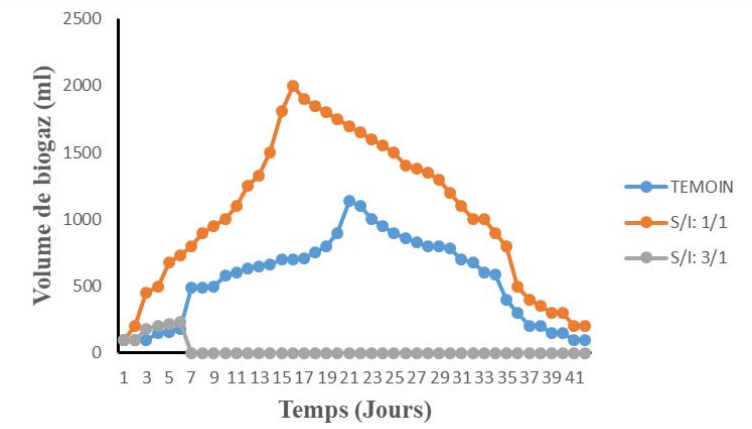
Pour le substrat du mélange pulpes de café – épluchures de pomme de terre (figure III.1(c)), la quantité de biogaz particulièrement élevée, s'observe au niveau du rapport 1/1 et du témoin. Les maxima s'observent au jour 15 pour le rapport 1/1 et au jour 21 pour le témoin. Le rapport 3/1 n'a pas produit. Cela s'explique par l'inhibition du milieu suite à l'accumulation des acides gras volatiles excessifs provoquant la chute rapide du P^{H} **(**Poirier, 2021**)**.



(a)



(b)



(c)

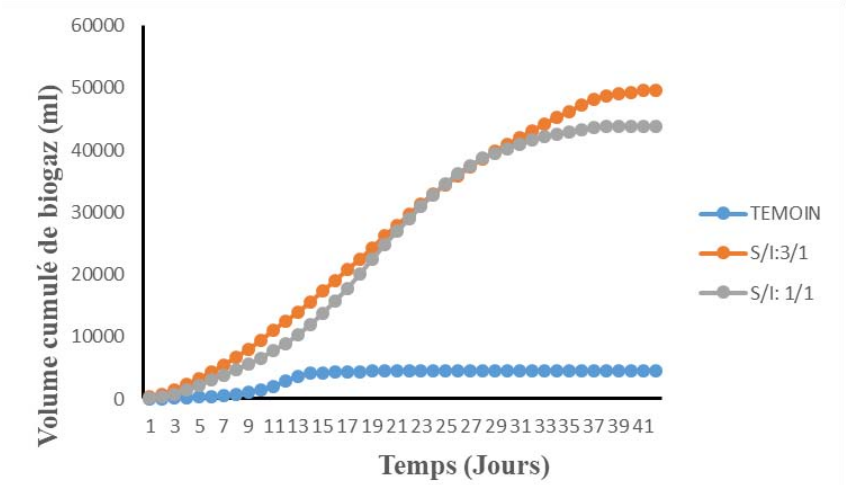
Figure III.1 : Evolution journalière de la production du biogaz pour les PC (a) ; les EPT (b) ; le mélange des PC - des EPT (c).

La figure III.2 ((**a**), (**b**) et (**c**)) illustre la quantité de biogaz cumulé générée lors des processus de co-digestion et de mono-digestion anaérobie au cours d'une période de 42 jours.

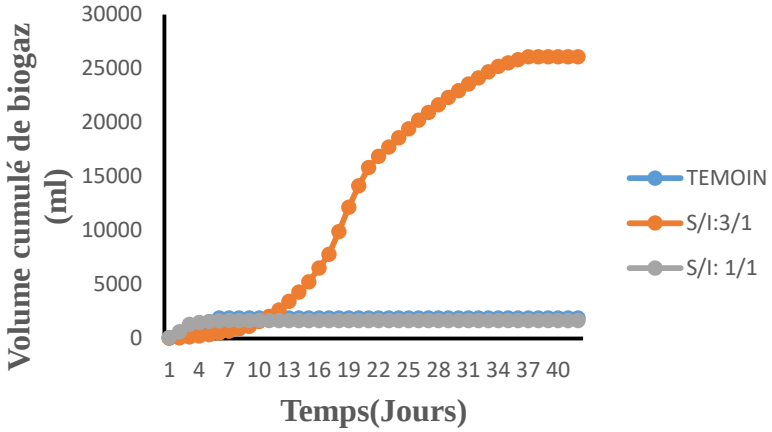
La quantité cumulée de biogaz sur 42 jours est de 49580 mL, 26070 mL et 1030mL respectivement pour les pulpes de café, épluchures de pomme de terre, et pour le mélange Pulpes de café – Epluchures de pomme de terre, dans le cadre du rapport S/I 3/1. La forte production observée avec ce rapport S/I 3/1 pourrait être attribuée à la richesse en matières organiques et à une quantité adéquate d'inoculum, ce qui favorise le développement des micro-organismes responsables de la digestion anaérobie. Par ailleurs, pour le même rapport S/I 3/1, les pulpes de café génèrent plus de biogaz que les autres substrats. Cette étude indique qu'un bon choix de substrats peut améliorer le rendement en biogaz et sa teneur en méthane. La faible production du biogaz observée avec ce rapport S/I 3/1 pour le mélange Pulpes de café – Epluchures de pomme de terre pourrait être attribuée à l'inhibition du processus de la digestion anaérobie suite à l'augmentation des acides gras volatils et de l'acide acétique causant une diminution du pH. Signalons également qu'on a produit 44280 ml, 43890 ml, 3100 ml de biogaz respectivement pour le mélange pulpes de café – Epluchures de pomme de terre, les pulpes de café, Epluchures de pomme de terre au niveau du scénario S/I 2/2. Pour ce même rapport 2/2, la production plus importante du biogaz s'observe au niveau du mélange Pulpes de café – Epluchures de pomme de terre, suivi par les pulpes de café.

La faible production s'observe au niveau des épluchures de pomme de terre suite à l'inhibition du milieu provoquant la diminution du pH.

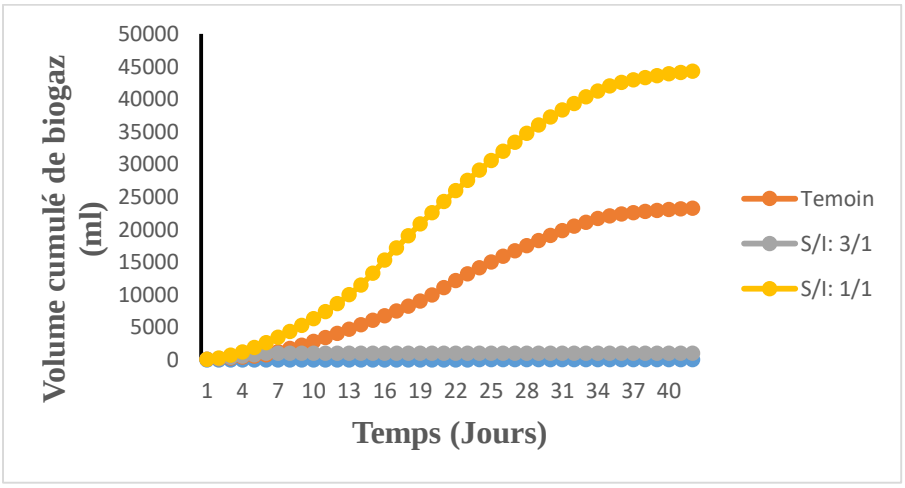
Enfin, une production de biogaz de 23280 ml s'observe au niveau du rapport Témon , pour le mélange pulpes de café – Epluchures de pomme de terre. Pour les autres substrats, on a un rendement plus faible.



(a)



(b)

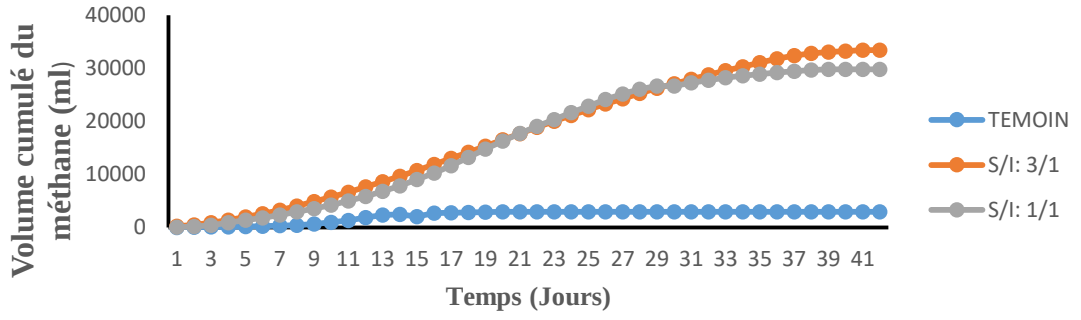


(c)

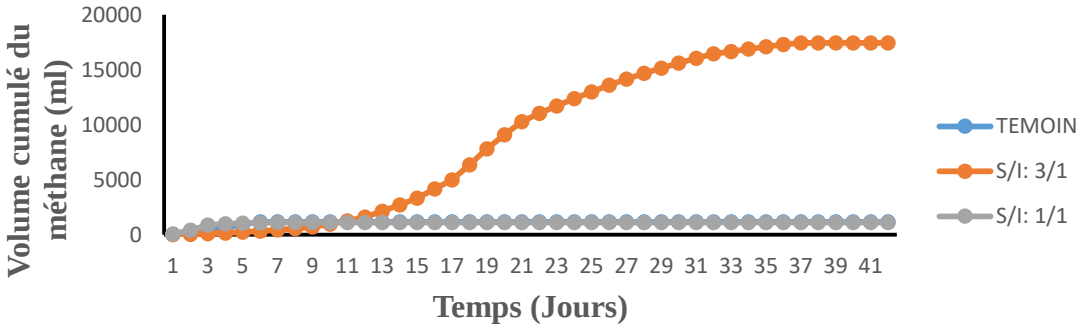
Figure III.2 : Evolution journalière de la production cumulée du biogaz pour les PC (a), les EPT terre (b), le mélange des PC- des EPT(c).

III.3.2. Cinétique de production du méthane

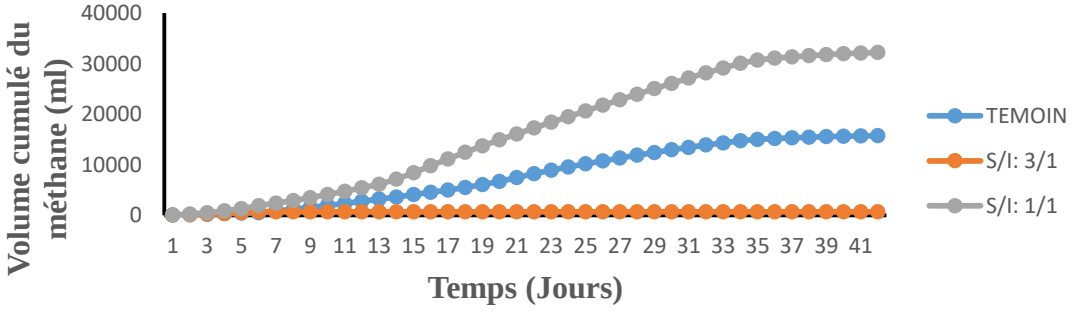
La figure III.3 ((a),(b),(c)) illustre l'évolution de la production de méthane au cours d'une digestion anaérobie de divers substrats. Les résultats indiquent que le rapport S/I 3/1 (figure 6 (a)) est le plus efficace pour générer du méthane par rapport aux autres ratios. La pulpe de café seul produit plus de méthane, ce qui peut être attribué à la richesse en matière organique (MO) (voir Tableau III.1).



(a)



(b)



(c)

Figure III.3 : Evolution journalière de la production cumulée du méthane pour les PC (a), les EPT(b), le mélange PC− EPT(c).

Le biogaz généré selon les différents scénarios de méthanisation présentés dans le Tableau 5 est principalement composé de méthane (CH4) et de dioxyde de carbone (CO_2).

Pourtant, le rapport 3/1 produit une quantité de biogaz plus importante que les autres scénarios. Les rendements en méthane de ce mélange atteignent 77,57 %, 67,4 % et 66,9 % respectivement pour les substrats du mélange Pulpes de café − Epluchures de pomme de terre, les pulpes de café seuls et les épluchures de pomme de terre seules. Pourtant, un biogaz de meilleure qualité doit contenir entre 55 % et 85 % de méthane (Benyahia, 2012).

Tableau III.3 : Quantité cumulée et composition du Biogaz produit.

Substrats	Types de digesteur	Quantité cumulée de biogaz (ml)	Quantité cumulée de CH_4 (ml)	% CH_4	% CO_2
PC	Témoin	4480	2957	66	34
	Rapport S/I (3/1)	49580	33419	67,4	32,6
	Rapport S/I (1/1)	43890	29804	67,9	32,1
EPT	Témoin	1890	1183	66,8	33,2
	Rapport S/I (3/1)	26070	17445	66,9	33,1
	Rapport S/I (1/1)	3100	2085	67,25	32,75
PC + EPT	Témoin	23280	15785	67,8	32,2
	Rapport S/I (3/1)	1030	799	77.57	23.43
	Rapport S/I (1/1)	44280	32237	72,8	27.2

Le tableau III. 4 illustre les pourcentages exprimant le rendement du méthane de cette étude respectivement pour les pulpes de café seules et les épluchures de pomme de terre seules (On a considéré les rapports qui ont produit une quantité élevé de méthane c'est à dire le rapport 2/2). Ils sont présentés comparativement à ceux de (Azeitona, 2012), (Krus Carlos, 2014), (Santos, 2013) respectivement 58%, 63%, 78,3% pour les épluchures de pomme de terre et ceux de (Chala *et al.*,2018),(Rojas-Sossa *et al.*, 2017),(Samira et *al.*, 2023) respectivement 70%,56,8%,52,61% pour les pulpes de café.

En plus de pourcentage en CH_4, on a présenté le rapport C/N comparativement à ceux trouvés par les autres chercheurs.

Tableau III.4 : Comparaison des résultats par rapport à ceux des autres chercheurs.

	Substrat	%CH_4	C/N
Cette étude	**PC**	**67,9**	**30,64**
	EPT	**67,25**	**28, 36**
(Rucakumugufi et al., 2021)	**PC**	**-**	**-**
	EPT	**-**	27,81
(Azeitona, 2012)	**PC**	**-**	**-**
	EPT	**58**	**19,8**
(Santos, 2013)	**PC**	**-**	**-**
	EPT	**63**	**19,76**
(Krus Carlos, 2014)	**PC**	**-**	**-**
	EPT	**78,3**	**28**
(Samira et al., 2023)	**PC**	52,61	**19,56**
	EPT	**-**	**-**
(Chala et al., 2018)	**PC**	56,8	**25**
	EPT	**-**	**-**
(Rojas-Sossa et al., 2017)	**PC**	70	**16,5**
	EPT	**-**	**-**

III.4. Estimation de la quantité d'énergie produite

Le tableau III. 5 présente une estimation de l'énergie électrique générée par la digestion anaérobie de divers substrats, calculée pour une tonne par an. D'abord, selon les estimations du scénario du rapport S/I 3/1, la digestion d'une tonne de pulpes de café peut produire jusqu'à 1126.84 kWh d'énergie électrique par an, tandis que la digestion d'une tonne des épluchures de pomme de terre peut atteindre 588.2 kWh par an.

Ensuite, selon les estimations du scénario du rapport S/I 2/2, la digestion d'une tonne de pulpes de café peut produire jusqu'à 1004.92 kWh d'énergie électrique par an et celle de la codigestion des PC - EPT peut aller jusqu'à 1086.98 par an. Enfin, d'après, les estimations du scénario du Témoin, la codigestion des pulpes de café et des épluchures de pomme de terre peut aller jusqu'à 532.23KWh par an.

En définitif, la digestion anaérobie de divers substrats se présente comme une solution à la fois rentable et durable pour produire de l'énergie électrique, tout en participant à la réduction des déchets organiques et la protection contre la pollution de l'environnement.

Tableau III.5 : Estimation de la quantité d'énergie pour chaque type de substrat par tonne et par an.

Substrats	Types de digesteur	Quantité cumulée de biogaz (ml)	Quantité cumulée de CH_4 (ml) dans 42 jours	Volume CH4 (m3 /T/an)	Energie (kWh)
PC	Témoin	4480	2957	10,27	99.61
	Rapport S/I (3/1)	49580	33419	116,17	**1126.84**
	Rapport S/I (2/2)	43890	29804	103,6	**1004.92**
EPT	Témoin	1890	1183	4,11	39.86
	Rapport S/I (3/1)	26070	17445	60,64	**588.20**
	Rapport S/I (2/2)	3100	2085	7,24.	70.23
PC+ EPT	Témoin	23280	15785	54,87	532.23
	Rapport S/I (3/1)	1030	799	2,77	26.86
	Rapport S/I (2/2)	44280	32237	112,06	**1086.98**

$1m^3$ de CH4 = 8570 Kcal = 9,7 Kwh (Benyahia, 2012)

CONCLUSION GENERALE ET SUGGESTIONS

Cette étude montre que la Co-digestion anaérobie des déchets organiques, réalisée par l'ajout de la boue de la station d'épuration comme inoculum, peut générer un rendement plus important de biogaz. Bien évidemment, les résultats ont montré que les pulpes de café donnent le meilleur résultat en termes de volume de biogaz. En termes de la qualité de méthane, c'est le mélange Pulpes de café −Epluchures de pomme de terre qui produit un pourcentage élevé de méthane. Les scenarios (3/1, 2/2, témoin) du rapport S/I ont été introduits dans les digesteurs pendant le processus de la digestion anaerobie. Les pulpes de café dans un rapport substrat/ inoculum 3/1, produisent un volume de 49580 ml de biogaz dont sa composition en méthane vaut 67,4%. Avec ce même rapport un volume de 26070ml de biogaz a été produit dont sa composition en méthane vaut 66,9% pour le substrat d'épluchures de pomme de terre. Le rapport S/I 1/1 donne 44280 ml de biogaz dont le pourcentage en méthane vaut 72,8% pour le mélange PC – EPT. Avec ce même rapport un volume de 43890ml de biogaz a été produit dont sa composition en méthane vaut 67,9% pour le substrat de pulpes de café. Le mélange PC– EPT avec le ratio témoin, donne 23280ml de biogaz dont le pourcentage en méthane vaut 67,8%. Cette méthode de gestion conjointe de deux types de déchets organiques présente des avantages tant sur le plan environnemental qu'économique, car elle permet de diminuer la quantité de déchets, de lutter contre la pollution et les émissions de gaz à effet de serre, tout en générant une source d'énergie renouvelable. Ces résultats pourraient être utiles pour l'élaboration de stratégies de gestion des déchets et contribuer à la réduction des déficits énergétiques.

Ce travail a été réalisé dans un contexte marqué par plusieurs contraintes, notamment le manque de matériel de laboratoire, des limitations financières, des coupures fréquentes d'électricité et des difficultés techniques liées à la panne de l'ordinateur utilisé pour la rédaction. Ces facteurs ont restreint le suivi expérimental à quelques paramètres (pH, TAC, AGV) et perturbé la gestion des références bibliographiques via le logiciel Zotero. Malgré ces obstacles, le projet a été mené à terme grâce à une forte capacité d'adaptation et une gestion rigoureuse des moyens disponibles.

Compte tenu des résultats obtenus, nous proposons comme suggestions à l'endroit de(s) :

❖ Chercheurs :

- De mener des recherches approfondies sur le digestat issu de la mono et co-digestion anaérobie des substrats (Epluchures de pomme de terre, Pulpes de café et leur mélange) afin d'envisager la possibilité d'être utilisée comme un amendement des sols.
- De faire une étude sur la Co-digestion anaérobie des substrats (pulpes de café et épluchures de pomme de terre) avec d'autres déchets agroalimentaires.
- De faire une purification du biogaz produit.

❖ L'Etat :

- De promouvoir des recherches approfondis sur la Co-digestion anaérobie des déchets à grande échelle pour contribuer à résoudre les problèmes de l'énergie au Burundi.
- De proposer une étude sur la quantité d'énergie en biogaz nécessaire pour un ménage rural dans le but de substituer le courant électrique par le biogaz.
- De promouvoir la gestion des déchets par Co-digestion anaérobie des autres déchets organiques
- De fournir des données statistiques sur les PC et les EPT produits chaque année

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Achinas, S., Li, Y., Achinas, V., & Euverink, G. J. W. (2019). Biogas potential from the anaerobic digestion of potato peels. *energies*. https://doi.org/10.3390/en12122311

Adou, K. E., Okon, A. A., Adjoumani, R. K., Adouby, K., Droguic, P., & Tyagic, R. D. (2020). Anaerobic mono-digestion of wastewater from the main slaughterhouse in Yamoussoukro (Côte d'Ivoire) : Evaluation of biogas potential and removal of organic pollution. P6. https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103770

Aguirre, L. A., Zoraya, R., & Apolo, V. (2018). Bromatological characterization of coffee (Coffea arabica L.) pulp for animal feeding purposes. *52*(2), 165-172.

Aina, L. O. (2006). Information Provision to Farmers in Africa *: The LibraryExtension Service Linkage*. University of Botswana.

Al Seadi, T. (2008). Biogas handbook.

Angeli, J.-R. B. (2019). Etude de faisabilité de la micro-méthanisation par co-digestion à l'échelle des quartiers [Ecole nationale supérieure. Mines-Télécom Atlantique]. https://theses.hal.science/tel-02118401v1

Azeitona, D. C. L. (2012). Efeitos de pré-tratamentos térmicos na digestao anaerobia termofila de residuos de casca de batata.

Bamouh, A. (1999). Techniques de production de la pomme de terre au Maroc. 4.

Bensmail, L., & Touzi, A. (2012). Valorisation de la biomasse à des fins énergétiques : Contribution de la production de biogaz au développement durable. 19-23.

Benyahia, B. (2012). Modeling and observation of membrane bioprocesses : Application to the anaerobic digestion [Université de Tlemcen, Algérie et Université de Montpellier, France].

Bernet, N. (2020). Principes et application de la digestion anaérobie pour la production d'énergie. 8.

Berthe, C. (2006). Etude de la Matière Organique contenue dans des lixiviats issus de différentes filières de traitement des déchets ménagers et assimilés.

Billy, O. H. (2015). Digestion anaérobie sur une ferme : Évaluation du pouvoir méthanogène de substrats et étude de micropolluants. Université de Lorraine.

Buffiere, P., Carrere, M., Lemaire, O., & Vasquez, J. (2007). Methodologyforoperatingsolidwaste anaerobicdigestionunits.

Cazier, E. (2015). Rôle des gaz dissous dans la digestion anaerobie par voie sèche de déchets ligno-cellulosiques.

Chala, B., Hans, O., Sajid, L., & Müller, J. (2018). Biogas Potential of Coffee Processing Waste in Ethiopia. https://doi.org/10.3390/su10082678

Chauhan, A., Fakhar, I., Ali I, mran, Ali, I., Tahir, Z., Sadaf, K., & Mohd, A. S. (2023). A review on waste valorization, biotechnological utilization, and management of potato. https://doi.org/10.1002/fsn3.3546

Da Silveira, J. S. (2019). Extraction et separation de biomolecules à haute valeur ajoutée à partir de pulpe de cerises de café.

Domingo, J. L., & Nadal, M. (2008). Domestic waste composting facilities : A review of human health risks. https://doi.org/10.1016/j.envint.2008.07.004

FAO. (s. d.). World Food and Agriculture – Statistical Yearbook 2022. https://doi.org/10.4060/cc2211en

Gashaw, A. (2016). Co-digestion of municipal organic wastes with night soil and cow dung for biogas production : A Review. *15*(C7FD78256989), 32-44. https://doi.org/10.5897/AJB2015.14705

Getachew, M., Hiruy, A. M., Mazharuddin, M. M., & Mekonnen, Y. S. (2023). Effet des additifs chimiques et biologiques sur la production de biogaz à p artir de l'ensilage de pulpe de café. https://doi.org/10.1038/s41598-023-39163-w

Godon, J.-J. (2011). Aspects biochimiques et microbiologiques de la méthanisation (p. 61-85).

Gunaseelan, V. N. (2007). Regression models of ultimate methane yields of fruits and vegetable solid wastes, sorghum and napiergrass on chemical composition. *Bioresource Technology*, *98*,1270-1277. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.05.014

Halmaciu, I.-A., Ionel, I., & Miutescu, M.-C. (2024). Influence upon Biogas Production of the C/N Ratio and the Heavy Metal Incidence in the Manure Composition. 14. https://doi.org/10.20944/preprints202402.0949.v1

Harahagazwe, D. (2006). Nouveau Catalogue des variétés de pomme de terre au Burundi (p. 25). ISABU.

Issoufou, M. A., Yahaya, B. H., Tchicama, M. M., & Adamou, Z. (2024). Etude des caractéristiques physico-chimiques d'un compost élaboré par une technique de

compostage innovante à Madaoua, Niger. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, *18*(3), 1166-1179.

JAUNARD, D. (2010). Contribution à l'évaluation et à la caractérisation de variétés de pommes de terre (Solanum sp.) des régions semi-arides des Andes boliviennes.

Jawad, A., & Dunia, B. (2021). Etude des paramètres physico-chimiques de la biométhanisation des ordures ménagères. 8.

Jean Luc, F. (2009). Fabrication du compost : De l'industriel à l'artisanal.

Kabanyegeye, H. (2009). Analyse du système de gestion des déchets ménagers de la ville de Bujumbura (Burundi) : Propositions d'améliorations. Université Senghor, Université du Burundi.

Karol Ekouedjen, E. (2017). Modélisation de l'influence du ratio carbone sur azote (C/N) de la matière organique sur la composition molaire du biogaz [Mémoire de Master de Recherche / Efficacité Energétique et Energies Renouvelables]. Université d'Abomey-calavi.

Kaur, J., Rani, G., & Yogalakshmi, K. N. (2020). Problems and issues of food waste-based biorefineries. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818353-3.00016-X

Kessoum, A., & Lougliti, R. A. (2021). *U*tilisation du phosphogypse dans la fabrication des briques cuites.

Khanal, S., Karimi, K., Sneha, M., Kumar, V., Verma, R., Bhatia, S. K., Kuca, K., Esteban, J., & Kumar, D. (2023).
Valorisation et utilisation durables des déchets de pommes de terre : État de l'art, défis et perspectives. https://doi.org/10.1007/s13399-023-04521-1

Kouassi, E. (2018). Contribution à la valorisation des sous-produits agricoles en bioproduits.

Krus Carlos, G. L. (2014). Biogas Production from Potato Peel Waste.

Lacour, J. (2012a). Valorisation de résidus agricoles et autres déchets organiques par digestion anaérobie en Haïti [Ph.D., Université Quisqueya]. https://doi.org/10.54226/uniq.edse.28312

Lacour, J. (2012b). Valorisation de résidus agricoles et autres déchets organiques par digestion anaérobie en Haïti.

Lacour, J., Bayard, R., Emmanuel, E., & Gourdon1, R. (2011). Evaluation du potentiel de valorisation par digestion anaérobie des gisements de déchets organiques d'origine agricole et assimilés en Haïti.

Manigomba, J. A., Chichirova, N. D., & Gruzdev, V. B. (2019). Research of natural biomass conversion in the Republic of Burundi. 8. https://doi.org/10.1088/1755-1315/288/1/012105

Manigomba, J. A., Chichirova, N. D., Gruzdev, V. B., Ndikumana, E., & Lyapin, A. I. (2019). Prospects for energy use in the republic of Burundi. 10, 1371-1382,.

Manirakiza, N., Ndikumana, T., & Jung, C. G. (2020). Towards The Promotion Of Fuel Briquettes Using Municipal Solid Waste And Residual Biomass In Burundi. 9. https://doi.org/10.3126/ije.v9i1.27428

Montilla, J. P., Arcila-Pulgarín, J., Aristizábal-Loaiza, M., Montoya-Restrepo, E. C., . Puerta-Quintero, G. I., Oliveros-Tascón, C. E., & Cadena-Gómez, G. (2008). Caracterización de algunas propiedades físicas y factores de conversión del café durante el proceso de beneficio húmedo tradicional. 120-142.

Munguía Ameca, G. (2015). Productive performance and carcass characteristics in pelibuey sheep feed pulp of coffee.

Murthy, P. S., & Naidu, M. M. (2012). Sustainable management of coffee industry by-products and value addition—A review. 45-58. http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.06.005

Naoual, H. (2021). Synthèse bibliographique sur la lutte biologique par les huiles essentielles contre la teigne de la pomme de terre Phthorimaea operculella Zeller (Lepidoptera : Gelechiidae).

Nawel, M. B. (2015). Valorisation des résidus agro-industriels.

Ntakiyiruta, P., Bi Gouessé, H. B., Mpawenayo, P. C., Nahimana, D., Niyungeko, C., Yao, K. B., & Ntakimazi, G. (2021). Energetic Valorization of Eichhornia crassipes and Pistia stratiotes by Methane Production in an Anaerobic Co-digestion Process. 59-69.

Nurfeta, A. (2010). Feed intake, digestibility, nitrogen utilization, and body weight change of sheep consuming wheat straw supplemented with local agricultural and agro-industrial by-products. 815-824. https://doi.org/10.1007/s11250-009-9491-8

Padovan, M. P., Cortez, V. J., Navarrete, L. F., Navarrete, E. D., Deffner, A. C., Centeno, L. G., Munguı´a, R., Barrios, M., Vı´lchez-Mendoza, J. S., Vega-Jarquı´n, C., Costa, A. N., Brook, R. M., & Rapidel, B. (2015). Root distribution and water use in coffee shaded with Tabebuia rosea Bertol. And Simarouba glauca DC. compared to full sun coffee in sub-optimal environmental conditions. https://doi.org/10.1007/s10457-015-9820-z

Pandey, A., Soccol, C. R., Nigam, P., Brand, D., Mohan, R., & Roussos, S. (2000). Biotechnological potential of coffee pulp and coffee husk for bioprocesses. 153-162.

Pinto-Ruiz, R., Guevara-Hernández, F., Alfredo Medina2, J., Hernández-Sánchez, D., Ley-de Coss, A., & Guerra-Medina, E. (2017). Intake behavior and preference of cattle by Pennisetum silage mixed with coffee pulpa. 59-67. https://doi.org/doi:10.15517/am.v28i1.23120

Poirier, S. (2021). Inhibitions de la digestion anaérobie : Dynamiques écologiques, indicateurs microbiens et stratégies de résistance. Cas du phénol et de l'azote ammoniacal. 293.

Poulleau, J. (2002). Caractérisation des biogaz (p. 31). Ineris.

Prévot, H. (2000). La récupération de l'énergie issue du traitement des déchets. Ministère de l'Economie, des finances et de l'industrie.

Rathinavelu, R., & Graziosi, G. (2005). Potential alternative use of coffee wastes and by-products. *International Coffee Organization*, 4.

République du Burundi. Ministère de l'agriculture et de l'élevage. (2017). Guide sur la gestion durable d'une exploitation caféicole au Burundi.

Rojas-Sossa, J. P., Murillo, M., Uribe, L., Uribe-Lorio, L., Marsh, T., Larsen, N., Chen, R., Miranda, A., Solís, K., Werner, R., Kirk, D., & Liao, W. (2017). Effects of coffee processing residues on anaerobic microorganisms and corresponding digestion performance. http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.098

Rucakumugufi, D., Dieng, M., Ntakarutimana, V., Sambe, F. M., Bigumandondera, P., & Diop, C. M. (2021). Co-compostage des déchets solides ménagers avec les déjections d'élevage : Optimisation du rapport C/N des substrats de départ. *Afrique SCIENCE*, 94-107.

Sagar, A. D. (2005). Alleviating energy poverty for the world's poor. 1367-1372. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2004.01.001

Saïdi-Boulahia, A., Abada, S., & Saber, M. (2018). Valorisation des déchets organiques ménagers et les déjections bovines par la méthanisation. *21*(4), 537-543. https://doi.org/10.54966/jreen.v21i4.712

Salazar, A. N., Acuña, R. S., & Moraima, G. de S. (2008). Révision Utilisation de la pulpe de café dans l'alimentation animale. *Zootecnia tropicale*, *26*(4), 411-419.

Salazar, A. N., Acuña, R. S., & Moraima, G. de S. (2009). Composition chimique de la pulpe de café à différents temps d'ensilage pour son utilisation potentielle en alimentation animale. 27(2), 135-141.

Samira, A. L. L., Said, I. A., Lahboub, N., & Hassan, E. B. (2023). Energetic Potential of Coffee Waste from Anaerobic Digestion and Combustion.

Sandra, L. (2021). Projet de création d'une unité de méthanisation à Fontaine-Le-Dun (76*)* (111546/version A). BioNorrois. www.anteagroup.fr/fr

Santos, J. D. N. (2013). Efeito de Pré-tratamentos Térmicos, à Pressão Atmosférica, na Digestão Anaeróbia Mesófila e Termófila de Resíduos de Casca de Batata.

Sarmah, A. K., Müller, K., & Ahmad, R. (2004). Fate and behaviour of pesticides in the agroecosystem—A review with a New Zealand perspective.

Torres-Valenzuela, L. S., Serna-Jiménez, J. A., & Martínez, K. (2019). Coffee By-Products : Nowadays and Perspectives. 18. https://doi.org/http:/ dx.doi.org/ 10 .5772/ intechopen.89508

Traore1, D., Nikiema, M., Somda, M. K., Sawadogo, J. B., Dayeri, D., & Traore, A. S. (2016). Contribution à la biométhanisation de la biomasse végétale : Cas des résidus de légumes au Burkina Faso. 35-47.

Vyizigiro, E., Inamahoro, M., Niyonzima, P., & Nsabimana, M. (2014). Enquête de diagnostic sur l'engouement des agriculteurs de la région de basse altitude par rapport à la culture de pomme de terre.

World Bank. (2018). What a waste 2.0 : A global snapshot of solid waste management to 2050. 295. https://doi.org/10.1596/978-1-4648 -1329-0

Wu, D. (2016). Recycle technology for potato peel waste processing : A review. 103-107. https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.02.014

Yasmine, S., Meha, A., & Wissem, M. (2018). Étude chimique et biologique des déchets organiques de Huiles de friture et graisses de bœuf : Valorisation pour l a production de biodiesel. 6248047, 9. https://doi.org/org/10.1155/2018/6248047

Yemane, H., & Chen, W. (2018). Utilization of potato peel as eco-friendly products : A. https://doi.org/10.1002/fsn3.691

ANNEXES

Annexe 1 : Production journalière de biogaz et du méthane pour les P.C

Jours	Biogaz			Méthane		
	Témoin	S/I : 3/1	S/I : 2/2	Témoin	S/I : 3/1	S/I : 2/2
1	0	0	0	0	0	0
2	30	380	100	19	220	68
3	40	420	180	25	253	101
4	60	700	400	40	406	224
5	80	810	770	50	513	471
6	80	965	790	50	590	489
7	85	980	750	54	597	464
8	140	1120	860	87	685	550
9	170	1250	870	106	750	558
10	340	1420	880	223	852	601
11	500	1450	1000	330	880	676
12	540	1480	1100	356	903	770
13	780	1495	1200	514	977	840
14	750	1520	1500	494	993	965
15	220	1640	1630	144	1039	1076
15	150	1700	1810	114	1096	1194
17	110	1730	1860	76	1115	1227
18	110	1750	2060	76	1128	1359
19	100	1730	2400	70	1147	1580
20	80	1800	2350	56	1159	1547
21	60	1860	2280	38	1193	1520
22	55	1750	2150	35	1190	1433
23	0	1730	1990	19	1185	1326
24	0	1660	1970	25	1123	1313
25	0	1620	1900	40	1120	1285
26	0	1530	1780	50	1072	1241
27	0	1430	1600	50	1065	1230
28	0	1340	1380	54	1020	1070
29	0	1330	1120	87	1012	860
30	0	1250	800	106	940	620
31	0	1140	790	223	860	580
32	0	1080	680	330	850	506
33	0	1050	660	356	810	484
34	0	1000	510	514	794	360
35	0	1000	440	494	750	310
36	0	980	410	144	750	280
37	0	880	400	114	730	273
38	0	550	320	76	650	218
39	0	370	200	76	370	135
40	0	320	0	70	249	68
41	0	250	0	56	215	101
42	0	0	0	38	168	224

Annexe 2 : Production journalière de biogaz et du méthane pour les EPT

Jours	Biogaz			Méthane		
	Témoin	S/I : 3/1	S/I : 2/2	Témoin	S/I : 3/1	S/I : 2/2
1	60	20	100	40	12	68
2	170	50	100	110	35	68
3	300	80	100	195	50	68
4	410	90	100	279	62	68
5	630	110	150	324	71	100
6	320	150	300	235	96	204
7	0	180	350	0	114	233
8	0	200	380	0	133	250
9	0	250	400	0	147	272
10	0	440	300	0	259	200
11	0	480	260	0	283	176
12	0	580	160	0	342	108
13	0	800	150	0	528	100
14	0	880	150	0	578	100
15	0	930	100	0	623	70
15	0	1280	100	0	838	0
17	0	1270	100	0	819	0
18	0	2120	100	0	1367	0
19	0	2250	100	0	1451	0
20	0	1980	150	0	1277	0
21	0	1700	300	0	1179	0
22	0	1010	350	0	780	0
23	0	870	380	0	670	0
24	0	860	400	0	649	0
25	0	820	300	0	620	0
26	0	800	260	0	610	0
27	0	720	160	0	540	0
28	0	700	150	0	530	0
29	0	680	150	0	485	0
30	0	650	100	0	460	0
31	0	600	100	0	420	0
32	0	580	100	0	405	0
33	0	540	100	0	222	0
34	0	530	100	0	217	0
35	0	320	150	0	205	0
36	0	300	300	0	200	0
37	0	250	350	0	168	0
38	0	0	380	0	0	0
39	0	0	400	0	0	0
40	0	0	300	0	0	0
41	0	0	260	0	0	0
42	0	0	160	0	0	0

Annexe 3 : Production journalière de biogaz et du méthane pour le mélange PC+ EPT

Jours	Biogaz			Méthane		
	Témoin	S/I : 3/1	S/I : 2/2	Témoin	S/I : 3/1	S/I : 2/2
1	100	100	100	64	70	64
2	100	100	200	65	70	136
3	100	180	450	66	149	297
4	150	200	500	96	160	340
5	160	220	680	102	170	449
6	180	230	730	116	180	581
7	490	0	800	343	0	525
8	490	0	900	343	0	524
9	500	0	950	350	0	544
10	580	0	1000	394	0	612
11	600	0	1100	396	0	646
12	630	0	1250	416	0	680
13	650	0	1330	429	0	726
14	660	0	1500	436	0	1000
15	700	0	1810	462	0	1267
15	700	0	2000	462	0	1400
17	710	0	1900	468	0	1365
18	750	0	1850	494	0	1295
19	800	0	1800	544	0	1260
20	900	0	1750	630	0	1225
21	1140	0	1700	798	0	1155
22	1100	0	1650	726	0	1155
23	1000	0	1600	700	0	1155
24	950	0	1550	645	0	1122
25	900	0	1500	630	0	1115
26	860	0	1400	584	0	1129
27	830	0	1380	564	0	1088
28	800	0	1350	544	0	1106
29	800	0	1300	544	0	1085
30	780	0	1200	530	0	1064
31	700	0	1100	490	0	1020
32	680	0	1000	476	0	1020
33	600	0	1000	410	0	986
34	590	0	900	401	0	938
35	400	0	800	282	0	660
36	300	0	500	192	0	340
37	200	0	400	132	0	280
38	200	0	350	132	0	234
39	150	0	300	99	0	190
40	150	0	300	99	0	192
41	100	0	200	65	0	135
42	100	0	200	66	0	132

Annexe 4 : Montage de distillation lors de la détermination de NTK

