



DSPACE

<https://dspace.org/>

**Etude de potentiel méthanogène des boues de la station
d'épuration de buterere**

Ndayahoze, Gréad; Sous la direction de : Dr. Pierre Ntakiyiruta

2025-03

UB, FS

<https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/2122>



UNIVERSITE DU BURUNDI

FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT DE CHIMIE

**ETUDE DE POTENTIEL METHANOGENE DES BOUES DE LA STATION
D'EPURATION DE BUTERERE**

Par:

Gréad NDAYAHOZE

MEMOIRE

présenté en vue de l'obtention

du grade de master en sciences chimiques

Spécialité : Contrôle et Analyse Chimiques

Sous la direction de :

Dr. Pierre NTAKIYIRUTA

Bujumbura, Mars 2025

Etude de potentiel méthanogène des boues de la station d'épuration de buterere

LES MEMBRES DU JURY :

Président : Prof. Steve De Cliff
Directeur : Dr Pierre NTAKIYIRUTA
Secrétaire : Dr Manassé NIHORIMBERE
Membre : Prof. Pierre-Claver MPAWENAYO

DEDICACE

A ma chère épouse :

NIRERA Mariane

A mes chers enfants :

- Don Béniste MUGISHA
- Tonny Robert MAHORO
- Ange Mylinthia MUNEZERO
- Marie Reine Elicora AKIMANA

A mes chers parents

A mes chers frères et sœurs,

Je dédie ce mémoire.

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail scientifique, je tiens tout d'abord à remercier mon Directeur de mémoire, Dr Pierre NTAKIYIRUTA, pour son immense patience et gentillesse et surtout ses conseils scientifiques durant ces deux dernières années qu'il n'a pas cessé de me témoigner. Ses compétences techniques ainsi que sa bienveillance ne sont plus à oublier.

Mes remerciements vont également s'adresser plus particulièrement aux membres du jury qui ont accepté de faire partie à l'équipe de l'évaluation de ce travail.

Mes sincères remerciements sont formulés également au responsable de master en Sciences chimiques, Prof Vestine NTAKARUTIMANA pour sa bonne sagesse, collaboration et compréhension.

En outre mes remerciements s'adressent aussi à l'équipe technique du personnel de Laboratoire de Chimie, Sciences de la Terre et de l'Environnement (LACHISTE).

Mes remerciements vont également s'adresser à tous les enseignants qui m'ont enseigné depuis l'école primaire jusqu'à l'université du Burundi et en particulier au personnel enseignant de la faculté des sciences spécialement ceux de Département de chimie, qui malgré leurs multiples responsabilités ont contribué à l'aboutissement de ce travail scientifique.

Mes remerciements sont adressés aux préparateurs des laboratoires du Département de chimie, Faculté des Sciences, Université du Burundi qui ont rendu disponible le matériel nécessaire pour faire les analyses.

Enfin, merci à toutes et à tous qui ne trouvent pas leurs noms cités nominativement alors qu'ils m'ont prêté une main-forte pour que le présent travail soit réalisé.

*Etude de potentiel méthanogène des boues de la station d'épuration de buterere***RESUME**

Dans la Zone de BUTERERE il y a une station d'épuration qui traite les eaux usées qui, après traitement laissent des boues constituées de matières organique tels que, boues primaires ; boues facultatives. La gestion de ces boues revêt un problème environnemental sévère. C'est dans cette optique qu'une étude de recherche a été menée en vue de valoriser ces boues comme énergie renouvelable. Ainsi, des échantillons de boues primaires et facultatives ont été pris en compte pour cette recherche.

Trois Scénarios ont été considérés en tenant compte des rapports des proportions de ratios entre les boues, les boues facultatifs et l'inoculum dans le digesteur anaérobie.

Les échantillons ont été collectés à partir du 6 septembre jusqu'au 31 octobre 2024 pour le 1^{er} scénario, suivi du 2^{ème} scénario qui a commencé le 19 Octobre jusqu' au 16 novembre 2024 et enfin le 3^{ème} Scénario a commencé 24 décembre jusqu'au 18 janvier 2024 des caractéristiques physico-chimiques des boues et leur potentiel méthanogène ont été évalués, puis la production de biogaz a été optimisée. Le suivi des digesteurs a duré 25 jours.

Les résultats issus de cette étude montrent que des boues primaires en réaction avec son inoculum présentent un volume de biogaz dont la composition en méthane est de 67,52%. Les estimations quantitatives en énergie est de 393,26KW/t/an. D'autres parts, en cas de mélange des boues primaires associé avec les boues facultatives ont donné des estimations quantitatives en énergie de 387,70KW/t/an soit une composition centésimale en méthane de 69,09%. En plus le rendement des boues primaires mélangé avec son inoculum a produit un rendement de 67,52% de la production en méthane avec une énergie 393,26KW/t/an. Le volume de biogaz obtenu pour le mélange boues primaire et boues facultatives était de 14860ml tandis que pour les boues primaires mélangé avec inoculum est de 15490 ml. Les meilleurs résultats sont observés pour les digesteurs de rapport substrat/inoculum (S/I) 3/1 et 4/1 respectivement pour les (BP+I) et (BP+BF). Ainsi, la quantité de biogaz produits est de (15490 ml) pour les boues primaires mélangées avec l'inoculum de la station d'épuration de BUTERERE et avait une composition centésimale de méthane de 67, 52 %. En outre une quantité en biogaz de 14860 ml pour (BP+BF) sans inoculum a été produite. Cela est fait pour voir l'influence des boues facultatives en cas du mélange avec les boues primaires et avait une composition centésimale de méthane de 69, 09 %, qui sont suffisantes à la production d'électricité.

Mots clés : digestion- Anaérobie, Biogaz, Boues, Valorisation, STEEP Buterere

ABSTRACT

In the BUTERERE area there is a treatment plant that treats wastewater which, after treatment, leaves sludge made up of organic matter such as primary sludge; facultative sludge. The management of this sludge presents a serious environmental problem. It is with this in mind that a research study was conducted with a view to valorizing this sludge as renewable energy. Thus, samples of sludge among these different types of considered were taken into account for this research. Three Scenarios were considered taking into account the following ratios of proportions: The first scenario concerns primary sludge associated with its inoculum in the ratios (S/I) of 2/1, 3/1 and 4/1 and the control; the second scenario concerns facultative sludge associated with its inoculum in the same ratios of (S/I) 2/1, 3/1 and 4/1 and the control and finally the third scenario concerns primary sludge in reaction with facultative sludge in the same ratios of 2/1, 3/1 and 4/1 and control. The samples were collected from September 6th to October 31st, 2024 for the 1st scenario, followed by the 2nd scenario which started on October 19th until November 16th, 2024 and finally the 3rd Scenario started December 24th until January 18th, 2024. Thus, the physicochemical characteristics of the sludge and their methanogenic potential were evaluated, then the biogas production was optimized. The monitoring of the digesters lasted 25 days.

The results of this study show that primary sludge in reaction with its inoculum presents a volume of biogas whose methane composition is 67.52%. The quantitative energy estimates are 393.26KW/t/year. On the other hand, in the case of mixing primary sludge associated with facultative sludge, quantitative energy estimates were 387.70KW/t/year, i.e. a percentile methane composition of 69.09%. In addition, the yield of primary sludge mixed with its inoculum produced a yield of 67.52% of methane production with an energy of 393.26KW/t/year. The volume of biogas obtained for the mixture of primary sludge and facultative sludge was 14860ml while for primary sludge mixed with inoculum is 15490ml. The best results are observed for digesters with a substrate/inoculum ratio (S/I) of 3/1 and 4/1 for (BP+I) and (BP+BF) respectively. Thus, the amount of biogas produced is (15490 ml) for primary sludge mixed with the inoculum from the BUTERERE wastewater treatment plant and had a methane percentage composition of 67.52%. In addition, a biogas quantity of 14860 ml for (BP+BF) without inoculum was produced. This is done to see the influence of facultative sludge in case of mixing with primary sludge and had a methane percentage composition of 69.09%, which are sufficient for electricity production.

Keywords: Anaerobic digestion, Biogas, Sludge, Treatment, Recovery.

TABLE DES MATIERES

LES 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
CHAP I : GENERALITE SUR LE PROCESSUS DE LA METHANISATION DES BOUES D'EPURATION	3
I.1. Généralités	3
I.1.1 Définition	3
I.1.2. Le processus de la méthanisation.....	3
I.1.3. Caractéristiques des boues d'épuration.....	3
I.1.4. Les étapes de la digestion anaérobie	4
I.2. Inhibition de la méthanisation.....	7
I.2.1. Brassage	8
I.2.2. Équilibre nutritif et compléments nutritionnels	9
I.3 .Facteurs influençant le processus de méthanisation	10
I.3.1. La température	10
I.3.2. Le pH	11
I.3.3 .L'alcalinité	11
I.3.4. Les acides gras volatiles.....	12
I.3.5 .Le rapport carbone-azote (C/N)	12
CHAP II. MATERIEL ET METHODES	13
II.1.Description du lieu d'échantillonnage	13

Etude de potentiel méthanogène des boues de la station d'épuration de buterere

II.2. Echantillonnage des substrats et Dispositif de la production du biogaz.....	13
II.2.1. Caractérisation des paramètres	14
II.2.2. Dispositifs de la production du biogaz	18
CHAPITRE III. PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS	22
III.1. Caractérisation des paramètres analysés	22
III.2. Cinétique de production du Biogaz	25
III.3. Cinétique de production du méthane.....	29
III.4. Estimation de la quantité d'énergie produite pour chaque type de substrat par tonne et par an.....	32
CONCLUSION GENERALE ET RECOMENDATIONS.....	33
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	35
ANNEXES.....	40

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Valeurs indicatives de potentiel méthanogène des différents substrats	8
Tableau 2: Composition volumique du biogaz issu de déchets organiques.....	8
Tableau 3: Synthèse des caractéristiques relatives aux micro-organismes impliqués lors de la digestion anaérobie.....	9
Tableau 4: la composition du mélange massique selon les ratios utilisés.....	21
Tableau 5: Caractérisation des paramètres analysés lors de la digestion anaérobie	23
Tableau 6: Caractéristiques de quelques paramètres analysés au début et à la fin des essais..	24
Tableau 7: Quantité cumulée et composition du biogaz produit.....	31
Tableau 8 : Estimation de la quantité d'énergie produite pour chaque type de substrat par tonne et par an	32

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Photographie des illustrations des boues biologiques issues d'une étape de traitement biologique de la STEEP de BUTERERE.	4
Figure 2 : Schémas simplifié de la digestion anaérobie	7
Figure 3: Photographie des boues primaire de la STEP BUTERERE	13
Figure 4: Dispositif de la production du biogaz	18
Figure 5 : Dispositif de quantification du biogaz	19
Figure 6: Dispositif de caractérisation du Biogaz	19
Figure 7 : Evolution journalière de la production du biogaz cumulé en mélange de deux boues (BP+I) ; (BF+ I) et (BF+ BF).....	26
<i>Figure8</i> : Evolution journalière cumulé du biogaz de (A), (B) et (C).....	29
Figure 9: Evolution journalière du méthane cumulé (A), (B), (C).....	31

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

AGV	: Acides gras volatils
TAC	: Titre Alcalimétrique Complet
C/N	: rapport carbone sur l'Azote
MO	: Matière Organique
BP	: Boue primaire
B.F	: Boue facultative
DCO	: Demande chimique en oxygène
I	: Inoculum
pH	: Potentiel en hydrogène
TH	: Taux d'humidité
TS	: Taux de suscité
COT	: Teneur en Carbone Organique Total
DA	: Digestion anaérobie
STEP	: Station d'Épuration des Eaux Polluée
DCO	: Demande chimique en oxygène
DBO	: Demande biochimique en oxygène
ODD	; Objectifs de Développement durable

AVANT-PROPOS

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre des défis actuels liés à l'assainissement durable et à la valorisation énergétique des boues de la station d'épuration de BUTERERE. Face à l'importance de réduire les émissions de gaz à effet de serre et d'exploiter au mieux les ressources disponibles, la méthanogenèse apparaît comme une voie prometteuse pour produire du biogaz à partir de boues municipales tout en améliorant leur stabilité et leur gestion. Il vise également à évaluer le potentiel méthanogène des boues issues de la station d'épuration de BUTERERE et à caractériser les paramètres clés qui influencent la production du biogaz (température, charge organique humidité) et la stabilité de boue. L'approche retenue combine une revue bibliographique ciblée et des essais expérimentaux en laboratoire afin de proposer des estimations préliminaires de production du biogaz et des indications de faisabilité pour une valorisation énergétique locale.

INTRODUCTION GENERALE

Dans le monde entier en général et au Burundi en particulier, les déchets sont des matières abandonnées, considérées comme inutilisables et sans valeur, voire même à valeur négative par une société, dans un contexte donné et à une période bien déterminée au cours de la biodégradation. Or, la matière étant elle-même source de matière, celle-ci étant constituée des déchets, composée de molécules complexes et organisées, elle représente a priori une ressource potentiellement valorisable (Joaneson, L., 2012)

Au Burundi, spécialement en mairie de Bujumbura l'urbanisation et la démographie galopante connaissent une croissance accélérée et sont accompagnées du développement des activités industrielles corrélativement des activités domestiques. A cet égard, il en résulte un fort accroissement des décharges des déchets ménagères, déchets des fosses septiques, latrines, etc.

Dans ce contexte, les zones urbanisées, les habitations sont généralement reliées au réseau d'assainissement généralisé collectif, d'autre part, des systèmes de vidange sont préconisés pour le déchargement des déchets ménagers vers la station d'épuration des eaux usées. Le point le plus en aval de ce réseau est la station d'épuration. Cette station d'épuration traite les eaux usées résiduaires urbaines issues de ces habitations. Ces eaux usées sont composées principalement des eaux noires ou eaux de vanne (toilettes) et des eaux grises (cuisine, machine à laver, douche, usines, etc.). Elles peuvent également contenir les eaux pluviales dans le cas d'un réseau unitaire (Nsavyimana, 2014)

A cet effet, dans la ville de Bujumbura, plus particulièrement dans la commune Ntakangwa, Zone de Buterere, il est installé une grande station d'épuration qui reçoit des eaux usées issues des différentes fosses septiques de ces habitations ou ménages. Après prétraitement, une quantité des boues non négligeable issue de ces déchets ménagères est recueillie et constitue par conséquent des boues, lesquels constituant une menace environnementale et ne cessent pas d'augmenter des jours aux jours, des mois en mois et des années en années. Ces boues constituent un impact environnemental très important en cours de transport, mais aussi au point de stockage dans les lits de séchage.

La digestion anaérobie (ou méthanisation) est un processus biochimiquement complexe, mis en œuvre en absence d'oxygène et faisant intervenir différentes communautés microbiennes dans la dégradation et la conversion de polymères de la matière organique en des produits finaux

Etude de potentiel méthanogène des boues de la station d'épuration de buterere

réduits, dont un biogaz à haute valeur énergétique (Adou et al., 2020). Le biogaz produit est principalement composé de méthane (55-75% v/v) et de dioxyde de carbone (25-45% v/v) (Elhabti) & Lalanne), 2014).

Ce travail vient pour contribuer au plan National de développement Orientation stratégique 3 (PND 2023-2027 révisé), à la vision Burundaise d'un pays émergent 2040 et pays développé 2060 où chacun se nourrit convenablement, chaque enfant aura accès à une éducation de qualité, chaque adulte aura accès à un emploi décent où la protection social de tous est assurée, l'économie Burundaise sera soutenue par des infrastructures de qualité et ce secteur agro-industriel compétitif sur les marchés internationaux, l'élargissement de l'accès a une énergie propre, fiable et abordable dans les zones rurales du Burundi qui constituent un puissant catalyseur aux objectifs de développement durable (ODD), numéro ODD7. Cette méthode de la digestion anaérobie pourra aider à remédier au problème du manque de courant à moindre coût.

L'objectif général de cette étude est d'évaluer le potentiel méthanogène des boues de la station d'épuration de BUTERERE afin de promouvoir une gestion rationnelle de ces boues.

Les objectifs spécifiques de cette recherche sont les suivants : (i) **caractériser les substrats et Inoculum utilisés dans la digestion anaérobie** ; (ii) **déterminer les conditions optimales de production du méthane et estimer la quantité d'énergie générer par le méthane produit.**

L'hypothèse de cette étude est que la digestion anaérobie joue un rôle dans l'élaboration des systèmes de gestion de ces boues par rapport aux liants.

Au cours de ce travail, on s'est limité aux analyses des paramètres sur lesquels on a accès à la disponibilité des matériels et produits chimiques au laboratoire, mais aussi avoir accès à l'échantillonnage avec facilité sur terrain sans trop dépenser. D'autres paramètres comme le DBO₅ et la DCO pourraient être analysé si les moyens financiers le permettaient car l'analyse de ces paramètres se réalise aux laboratoires externes de l'Université du Burundi. Le temps qu'a duré la digestion anaérobie au total était de 75 jours pour les trois scenarios.

Pour ce faire, en plus de l'introduction générale, de la conclusion générale et des recommandations, ce mémoire est subdivisé en trois chapitres à savoir : le premier qui concerne les généralités sur le sujet abordé, le deuxième chapitre est consacré au matériel et méthodes utilisés tandis que le troisième et dernier chapitre parle de la présentation et de la discussion des résultats.

CHAPI : GENERALITE SUR LE PROCESSUS DE LA METHANISATION DES BOUES D'EPURATION

I.1. Généralités

I.1.1 Définition

La méthanisation, appelée aussi digestion anaérobie (DA), est un processus naturel de minéralisation de la matière organique biodégradable en un biogaz composé principalement de méthane (CH_4) et de dioxyde de carbone (CO_2) par un consortium microbien fonctionnant en l'absence d'oxygène (anaérobiose) (Ekouedjen, 2017). Cette transformation naturelle peut s'effectuer dans tous les milieux privés d'oxygène et contenant de la matière organique tels que : les marais, les lacs ou les rizières. Les sols des zones humides tels que : les forêts tropicales, la toundra et les tourbières participent aussi à la production du méthane atmosphérique. Par ailleurs, les processus de digestion des animaux (ruminants, termites) constituent également une source de production naturelle de méthane. Enfin, les phénomènes anaérobies qui se déroulent dans les sédiments marins sont responsables d'une partie du méthane dissout dans l'eau de mer (Lacour, 2013)

I.1.2. Le processus de la méthanisation

Les performances du processus de méthanisation vont principalement dépendre de deux paramètres : les caractéristiques intrinsèques des substrats méthanisés et les conditions de mise en œuvre de la digestion (Sall, 2022)

La méthanisation des boues d'épuration fait figurer de cas particulier, les objectifs et les contraintes de traitement ne sont pas les mêmes que pour d'autres substrats. Ainsi une étude, réalisée par l'Irstea (Ex-Cemagref), révèle que 75 % des exploitants présentent la réduction de la quantité de matière sèche comme le principal avantage de la méthanisation. Alors que seulement 25 % évoque l'intérêt de produire un gaz valorisable (R. Moletta, 2002).

I.1.3. Caractéristiques des boues d'épuration

Les caractéristiques des boues primaires utilisées pour notre substrat qui peuvent être différentes en fonction de son origine existent sous différents types à savoir :

1°) les boues primaires généralement issues d'un procédé de décantation après les étapes de prétraitement (dessablage, déshuilage, dégraissage).

Etude de potentiel méthanogène des boues de la station d'épuration de buterere

2°) les boues biologiques issues d'une étape de traitement biologique (boues activées, bio filtration)

3°) les boues physico-chimiques généralement issues d'un traitement tertiaire par coagulation-floculation.

D'une manière générale les boues envoyées en digestion sont déficitaires en carbone par rapport à l'équilibre nutritif des bactéries mises en jeu lors de la méthanisation. Il est reconnu, que les boues biologiques qui font déjà état d'un important degré de minéralisation, présentent un pouvoir fermentescible inférieur à celui des boues primaires. Cependant, pour apporter une solution de traitement à la fois aux boues biologiques (généralement majoritaire) et aux boues primaires, il est courant d'introduire dans le digesteur des boues mixtes issues d'un mélange de ces deux types de boues. Ce qui permet d'obtenir un substrat avec un potentiel méthanogène plus important que des boues biologiques seules (Jawad & Bouaoun, 2021).

La figure 1 est la photo qui montre les boues biologiques issues d'une étape de traitement biologique.



Figure 1 : Photographie des illustrations des boues biologiques issues d'une étape de traitement biologique de la STEEP de BUTERERE.

I.1.4. Les étapes de la digestion anaérobie

Le processus de méthanisation a lieu sous l'action de plusieurs groupes de microorganismes. La transformation de la matière organique en méthane est généralement fractionnée en quatre phases successives : **hydrolyse, acidogenèse, acétogenèse et méthanogenèse.**

Etude de potentiel méthanogène des boues de la station d'épuration de buterere

L'hydrolyse et l'acidogénèse concernent la dépolymérisation des molécules complexes (comme les protéines, les graisses, les hydrates de carbone) par une action enzymatique, suivie de leur fermentation rapide en acides aminés, acides gras et acides organiques.

L'acétogénèse concerne la conversion de ces différents acides en acide acétique, qui est l'un des précurseurs du méthane dans la chaîne trophique. La méthanogénèse conduit à la formation de méthane soit à partir de l'acétate (voie acétotrophe) soit à partir de l'hydrogène (voie hydrogénotrophe).

Pendant ces étapes, il existe des principaux paramètres pouvant inhiber le processus de la digestion anaérobie (Nathalie, 2007) à savoir :

- Accumulation d'Acides Gras Volatils (AGV) lors de surcharges organiques : baisse du pH
- L'ammoniac avec la forme libre NH_3
- Le sulfure d'hydrogène (H_2S)

Les charges organiques sont comprises entre 2 et 40 kg (DCO) m^3/jour avec des taux d'abattements allant jusqu'à plus de 80%. Deux résidus valorisables issus de la méthanisation sont le gaz et le digestat.

Les principales formes d'azote ammoniacal inorganique produites sont les ions ammonium (NH_4^+) et libre ammoniac (NH_3).

L'azote ammoniacal libre, considéré comme la principale cause d'inhibition est prédominant à pH élevé, les microorganismes méthanogènes ne peuvent plus assurer leurs fonctions de dégradation de la matière organique (Principes et Application de la digestion anaérobie pour la production d'énergie, 2015).

La digestion anaérobie mène à la production de digestat. Celui-ci est principalement composé de matière organique non biodégradable telle que la lignine, de matière minérale (azote, phosphore) et d'eau.

I.1.4.1. L'Hydrolyse

C'est une phase où les molécules organiques de haut poids moléculaires comme les polysaccharides, les lipides, les protéines et les acides nucléiques sont hydrolysés en monomères (Monosaccharides) comme le glucose, acides gras, acides aminés et les bases azotés

Etude de potentiel méthanogène des boues de la station d'épuration de buterere

(Zinder, 1984). C'est une étape qui est lente en général en comparant à une étape déterminante qui est l'acidogénèse (Moletta, R, 2011).

I. 1.4.2. L'Acidogénèse

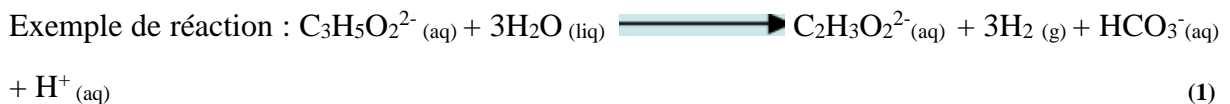
Au cours de l'hydrolyse, il y a apparition des monomères dans la dernière étape et ces dernières subissent une transformation en acides gras volatils comme par exemple : l'acide acétique, acide propénoïque, acide butyrique, acide valériques mais aussi de l'alcool éthylique et les acides organiques comme acide lactique et l'apparition de l'hydrogène sans oublier le gaz carbonique (Kouakou Eric Adou et al., 2020).

I.1. 4.3. L'Acétogénèse

Les différents composés issus des phases précédentes sont transformés en précurseurs principale du méthane comme l'acétate, l'hydrogène et le gaz carbonique et (Pavlostatics, S.G & Giraldo-gome, 1991).

Deux voies de transformation peuvent apparaitre, il s'agit de :

- La voie hétéro-fermentaire servant à la production d'hydrogène et de gaz carbonique et d'autres acides tels que le pyruvate et le butyrate.
- La voie homo-acétogène qui sert à la production exclusive de l'acétate à partir des molécules organiques (Tholen et Brune et al., 1999)



I.1.4. 4. La Méthanogène

Cette phase est la dernière qui a une grande importance capitale car c'est dans cette phase où se déroule le passage des produits de l'acétogénèse en méthane suivant deux voies de production :

A ~ 30% par les bactéries méthanogènes hydrogénophiles, le méthane est produit à partir du dioxyde de carbone et de l'hydrogène. $4H_2 (g) + CO_2(g) \longrightarrow CH_4 (g) + 2H_2O (liq)$ (2)

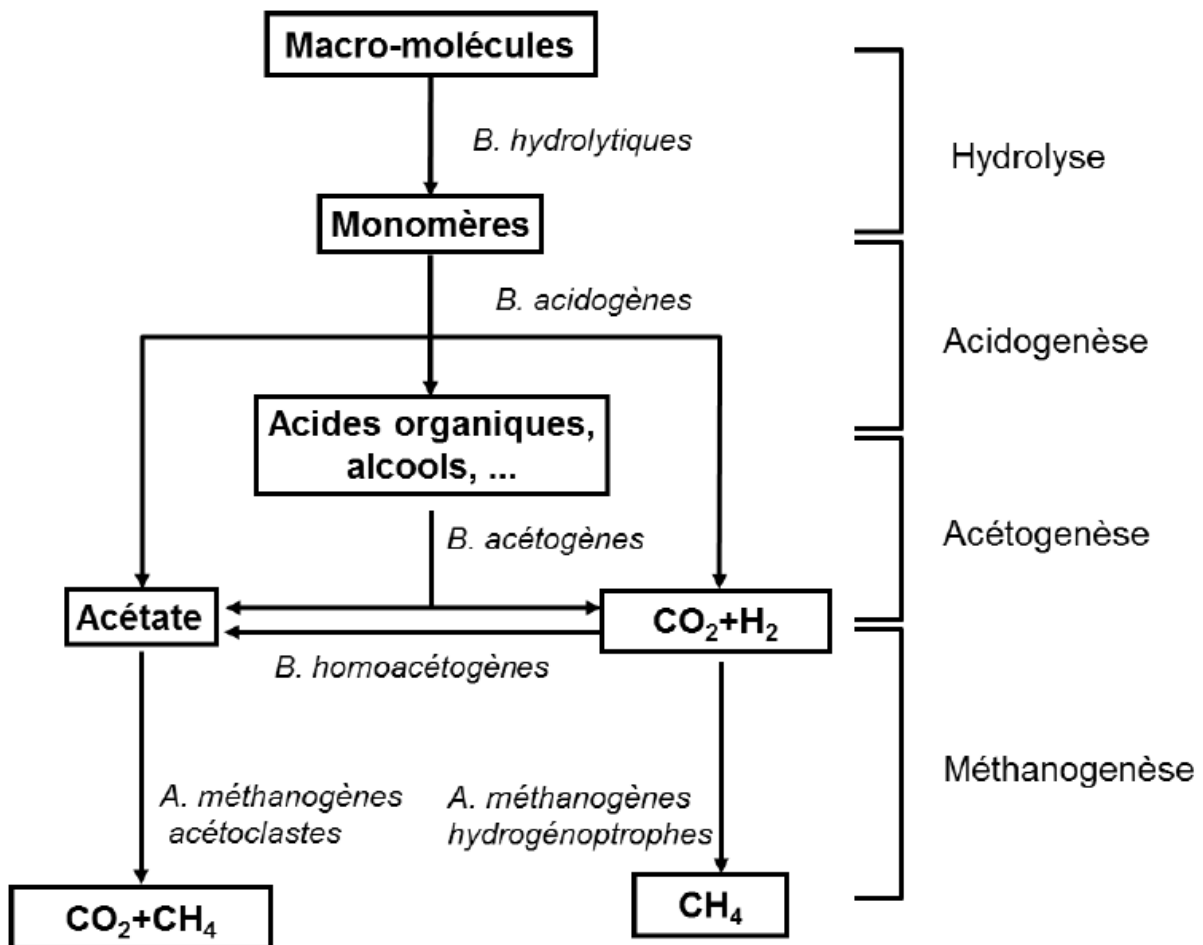
Dans cette réaction, le méthane est produit à raison de 30% à partir de l'hydrogène et le gaz carbonique, tandis que l'acétate et l'hydrogène produit le méthane à raison de 70% (Saïdi-Boulahia et al., 2018)

À ~ 70% par les bactéries méthanogènes acétoclastes, le méthane est produit à partir de l'acétate.

Etude de potentiel méthanogène des boues de la station d'épuration de buterere



La digestion anaérobie de la matière organique est un processus comportant quatre étapes biochimiques successives (hydrolyse, acidogénèse, acétogénèse et la méthanogénèse) réalisés par trois groupes de bactéries (hydrolytiques, acidogènes, acétogènes et méthanogènes : méthanogènes acétoclastes, méthanogènes hydrogénéophiles) fonctionnant en symbiose et ayant des exigences nutritives et des caractéristiques physiologiques distinctes : ces étapes sont résumé dans la figure 3.



A:archaea (microorganismes méthanogènes)

Figure 2 : Schémas simplifié de la digestion anaérobie (Nicolas, B, 2020)

I.2. Inhibition de la méthanisation

Comme pour tout processus biologique, il existe des conditions physico-chimiques qui peuvent inhiber la méthanisation, et même détruire la flore méthanogène si certaines concentrations de molécule toxique sont atteintes.

Etude de potentiel méthanogène des boues de la station d'épuration de buterere

Le contrôle de chacune des opérations du traitement était indispensable afin de maintenir un fonctionnement satisfaisant de l'installation expérimentale des digesteurs (Dunia, 2021). Ces valeurs indicatives de potentiel méthanogène des différents substrats sont indiquées dans le tableau 3

Tableau 1 : Valeurs indicatives de potentiel méthanogène des différents substrats (Lereau, 2017)

Matière organiques	Potentiel méthanogène (Nm ³ CH ₄ /t MO)
Graisse agroalimentaire	855
Déchets de restaurants	500
Ensilage de maïs	340
Matières stercoraires bovines	339
Boues biologiques de station de la STEP	250
Sang	454
Fumier de bovin	210

Ainsi donc les micro-organismes anaérobies utilisent les composés organiques (matières organiques biodégradables) comme substrat pour produire du biogaz composés majoritairement de méthane (CH₄), de dioxyde de carbone (CO₂) et d'eau (H₂O). On trouve aussi sous forme de trace l'azote (N₂), de sulfure d'hydrogène et du monoxyde de carbone comme il se présente dans le tableau 1 (J.L .Garcia, et al., 2000)

Tableau 2: Composition volumique du biogaz issu de déchets organiques(Boudabia & Dahou, 2019)

Gaz produits en condition anaérobie	Teneurs habituels en pourcentage
CH ₄	50% à 70%
CO ₂	30 à 50
H ₂ S	0 à 8%
N ₂	0 à 2%
CO	Traces

I. 2.1. Brassage

Au cours de la digestion anaérobie, le brassage est un paramètre très important pour le bon déroulement de la méthanisation. Il va permettre une bonne homogénéisation de la température, du pH et du substrat-inoculum etc. Un brassage régulier permet d'homogénéiser les substrats, de maintenir l'équilibre du digesteur et d'avoir une bonne évacuation du biogaz. La présence très importante de zone morte va entraîner des conditions défavorables pour la flore méthanogène, et peut aller jusqu'à provoquer l'arrêt du réacteur.

I.2. 2. Équilibre nutritif et compléments nutritionnels

Dans tout processus biologique, l'équilibre nutritif est un paramètre essentiel. On considère que pour une bonne mise en œuvre de la digestion anaérobie, le rapport C/N doit être compris entre 20 et 30. 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 sont toxiques pour les bactéries méthanogènes. Un rapport C/N favorable pour la digestion anaérobie peut être obtenu par le mélange des déchets à faibles et à forts C/N (Sandrine, 2019).

Les micro-organismes nécessitent, pour le bon fonctionnement de leur métabolisme, des nutriments variés. En plus de la matière organique qui sert d'apport énergétique pour la croissance, les micro-organismes ont besoin d'oligoéléments (vitamines, métaux...) (Simon Poirier, 2016).

La croissance de vitesse des bactéries pour la phase d'hydrolyse devient très rapide dans le cas de la présence des nutriments suivi avec d'autres phases. Ainsi la constante de la cinétique est montrée dans le tableau 3 selon la phase de la digestion anaérobie. Le tableau 3 indique les caractéristiques des microorganismes impliqués lors de la digestion anaérobie. La constante de la cinétique varie en fonction de la phase au cours de la digestion anaérobie.

Tableau 3 : Synthèse des caractéristiques relatives aux micro-organismes impliqués lors de la digestion anaérobie (R. Moletta, 2002)

Phases		Hydrolyse	Acidogènes	Acétogène	Méthanogène
Vitesse de croissance		Très rapide(h)	Rapide (0,01 à 2,7j)	Rapide (0,13 à 0,86 j)	Lente (4 jrs)
Constante de la cinétique (j^{-1})		0,02 à 2,88	0,51 à 70,6	7,7 à 17,1	2 à 453
pH	Optimum	-	5,2-6,2		6,5-7,6

On a classé des digesteurs suivant leur mode d'alimentation :

- 1. Le digesteur batch ou discontinu** : Il a l'avantage d'être d'une construction simple. Le mode opératoire consiste à remplir le digesteur avec les substances organiques et laisser digérer, le temps de rétention étant fonction de la température et d'autres facteurs. A la fin de la digestion, le digestat est évacué et le processus peut recommencer.

Etude de potentiel méthanogène des boues de la station d'épuration de buterere

2. **Le digesteur continu** : le substrat introduit de manière continue est digéré et déplacé soit mécaniquement, soit sous la pression des nouveaux intrants vers la sortie sous forme de digestat. Le fonctionnement en continu, est bien adapté aux installations de grande taille. Il existe trois principaux types de digesteurs continus : système à cuve verticale, système à cuve horizontale et système à cuves multiples (Bernet, 2020).

3. **Le digesteur semi-continu** : fonctionne avec une combinaison des propriétés des deux précédents afin de tirer profit des avantages des deux extrêmes (Goldenberg, 2000)

Après la digestion, le digestat est évacué du réacteur et le processus peut recommencer. Ce système est souvent utilisé pour traiter les déchets solides comme les fumiers, les ordures ménagères, les résidus agricoles etc. (Rakotondramiarana, 2004).

I.3 .Facteurs influençant le processus de méthanisation

Certains paramètres physico-chimiques sur le processus de méthanisation doivent être abordés. La température, le pH, le titre alcalimétrique complet (TAC), la concentration en AGV ou encore la quantité de biogaz produite sont autant de paramètres qui permettent de caractériser et d'évaluer le fonctionnement d'un digesteur.

I.3.1. La température

La température est un paramètre essentiel puisqu'elle conditionne le bon développement des bactéries. On rencontre trois types de digestion :

- Psychrophile, (5 à 15 °C).
- Mésophile, (15 à 45 °C) avec un optimum à 37 °C
- Thermophile, (45 à 65 °C) avec un optimum à 55 °C

L'optimum correspond à la température pour laquelle l'activité bactérienne est maximale. La digestion psychrophile se retrouve principalement lors de fermentation naturelle (lagunes, marais, rizières...). Les gammes mésophiles et thermophiles sont mises en œuvre à l'échelle industrielle (Dunia, 2021)

La régulation de ces températures est importante car certaines bactéries, en particulier les méthanogènes, sont sensibles au changement de température et peut entraîner un déséquilibre du processus de digestion.

I.3.2. Le pH

Le pH optimum pour la méthanisation est proche de la neutralité, à des valeurs comprises entre 6,5 et 7,5. Les bactéries méthanogènes sont, une fois de plus, très sensibles aux importantes variations de pH, ce qui peut se produire lorsque la charge organique introduite dans le réacteur est trop importante. La concentration en acide gras volatils (AGV) augmente rapidement la cinétique de l'acidogénèse en parallèle avec une acidification du milieu, ce qui peut inhiber les étapes d'acétogénèse et de méthanogènes et entraîner un arrêt du réacteur. En général l'abaissement du pH se produit le plus souvent lors d'hydrolyse et d'acidogénèse de la digestion anaérobie (Wail, 2022).

Si la concentration en acides gras volatile augmente, il faut ajouter dans le réacteur les produits de caractère basique pour diminuer l'acidité pendant la digestion.

Les bactéries hydrolysantes et acidogènes peuvent s'adapter aux faibles valeurs de pH tandis que les bactéries méthanogènes sont sensibles aux faibles valeurs de pH. Ainsi l'étape de méthanogénèse peut être inhibée à faible pH (Ntakiyiruta^{1,2} et al., 2024)

Au cours de ces étapes, les particules sont dégradées en composés solubles puis converties en hydrogène, dioxyde de carbone, acétate, propionate et butyrate.

De ce fait, le pouvoir tampon du milieu a un rôle important pour maintenir la stabilité du système. Il existe un certain nombre de solutions pour pallier à ces problèmes. De manière préventive, on peut mettre en place une étape de pré-acidification (séparation des étapes d'acidogénèse et d'acéto/méthanogénèse). De manière curative, par diminution de la charge appliquée et le contrôle du pH ou de l'alcalinité par ajouts de produits correcteurs (soude, chaux et éventuellement acide phosphorique).

I.3.3 .L'alcalinité

Il est important de s'assurer que le titre alcalimétrique complet (TAC) est supérieur à 1000 mg CaCO₃/L (mais inférieur à 6000 mg CaCO₃/L). En effet les hydrogénocarbonates (HCO₃⁻), l'azote ammoniacal (NH₄⁺) qui font l'alcalinité du milieu, permettent un fonctionnement plus stable du digesteur. Ils sont notamment responsables du pouvoir tampon du réacteur. Cependant, dans le cas d'un effluent d'entrée trop chargé en azote, le rapport C/N est déséquilibré.

Etude de potentiel méthanogène des boues de la station d'épuration de buterere

On peut avoir une accumulation d'ammoniac (NH_3) dans le réacteur qui se traduit par une augmentation de pH et une diminution des rendements épuratoires. On parle de dépassement alcalin.

I.3.4. Les acides gras volatiles

La concentration en AGV est un indicateur direct du fonctionnement du réacteur, son suivi permet de prévenir des phénomènes d'acidification et ainsi d'éviter une diminution trop importante des performances épuratoires. Idéalement, la concentration en AGV (exprimée en quantité d'acide acétique) doit être autour de 200-300 mg/L d'acide acétique (pour des températures mésophiles (Sall, 2022)).

I.3.5 .Le rapport carbone-azote (C/N)

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 20-30.

Concrètement, un rapport C/N élevé peut conduire à une carence en azote engendrant un ralentissement de l'activité microbienne et produit une faible quantité de biogaz. Au contraire, un rapport C/N faible peut également générer une accumulation de l'activité microbienne par toxicité due à l'azote ammoniacale et par conséquent un arrêt de la digestion anaérobie. Le mélange de substrats avec des rapports C/N différents permet de limiter les risques de carence ou de toxicité par apport d'azote ou au contraire par dilution de l'azote (Clotaire, 2014).

CHAP II. MATERIEL ET METHODES

II.1. Description du lieu d'échantillonnage

Cette étude a été réalisée sur les boues ramassées dans la station d'épuration de BUTERERE qui se situe dans la zone urbaine de BUTERRE de la ville de Bujumbura, commune NTAHANGWA située à une latitude de -3,3642054 et à une longitude de 29,3418978.

II.2. Echantillonnage des substrats et Dispositif de la production du biogaz

❖ Echantillonnage des substrats

Les échantillons des boues utilisées pour cette étude ont été ramassés à l'aide d'un sceau à l'état liquide dans les bassins primaires et bassins facultatives et puis introduit dans les bidons de 5 litres et étiquetés. Les échantillons ont été ensuite conduits au Laboratoire d'Analyse de Chimie, Sciences de la Terre et de l'Environnement (LASCHISTE). L'échantillonnage se faisait chaque fois à partir de 9h00 à 10 heures du matin pour avoir accès au site d'échantillonnage avec facilité sur terrain. La STEEP de Buterere présente trois bassins à savoir : bassin primaire, facultative est bassins de maturation. Cette station peut générer 27000 m³ des boues par semaine (Bigumandondera, 2014).

La figure 3 présente la photographie des boues primaire de la STEEP BUTERERE tout en illustrant les étapes de décantation et de prétraitement.



Figure 3 : Photographie des boues primaire de la STEP BUTERERE

Nous avons réalisé trois (3) scénarios afin de pouvoir évaluer lequel pourrait donner un rendement remarquable.

Etude de potentiel méthanogène des boues de la station d'épuration de buterere

- Le premier scénario concerne boues primaires associé à son inoculum dans les rapports (S/I) de : 2/1 ; 3/1 et 4/1 et le témoin
- Le second scénario concerne boues facultatifs associé à son inoculum dans les mêmes rapports de 2/1,3/1 et 4/1 et le témoin
- Le troisième scénario concerne les boues primaires en réaction avec les boues facultatives dans les mêmes rapports de 2/1,3/1 et 4/1 et témoin.

Après la caractérisation du biogaz, nous avons analysés certains paramètres dans le jus du digesteur comme la teneur en azote, en carbone, acides gras volatil et le titre alcalimétrique complet.

II.2.1. Caractérisation des paramètres

Les paramètres analysés lors de la caractérisation des substrats sont : La teneur en azote total, titre alcalimétrique complet (TAC), acide gras volatils (AGV), Taux d'humidité et siccité. Les procédés d'analyses utilisés sont décrits de la manière suivante :

a) Détermination de la Teneur en azote total

Elle est mesurée par la méthode Kjeldahl selon la norme AFNOR ISO 11261 sur les échantillons séchés à 105 °C puis finement broyés et tamisés à 800 µm de mailles (Reine, 2023).

c) Taux d'Humidité et siccité

Le taux de siccité est le pourcentage de la masse sèche contenue dans un échantillon donné alors que le taux d'humidité représente la teneur en eau de cet échantillon. Ces taux sont déterminés par déshydratation dans une étuve à 105°C et à pression atmosphérique jusqu'à masse constante entre deux pesées consécutives. A chaque sortie de l'étuve, l'échantillon est laissé dans le dessiccateur jusqu'au retour à la température ambiante avant la pesée. Les taux de siccité (TS) et d'humidité (TH) sont calculés respectivement suivant les équations :

$$TS (\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (4)$$

$$H (\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (\text{Jay N.Meegoda et al., s. d.2023}) \quad (5)$$

d) Détermination de la teneur en matière organique volatile

Pour déterminer la teneur en matière organique Volatile (MOV), une masse de l'échantillon obtenue après dessiccation (M1) a été introduite dans la capsule de masse M préalablement

Etude de potentiel méthanogène des boues de la station d'épuration de buterere

nettoyée et séchée et le tout a été placé dans le four à moufle réglé à 550°C pendant 10 min pour calcination. Après

Cela, la capsule et son contenu a été refroidis au dessiccateur et puis pesés encore une fois. La masse de la matière organique est obtenue par différence entre la masse de matière sèche et la masse de matière minérale (Ahmed *et al.* 2012). Le pourcentage de matière organique (MO) s'obtient selon la relation suivante :

$$MO (\%) = \frac{M_1 - [(M_1 + M) - (M_2 + M)]}{M_1} \times 100 \quad (6)$$

Où :

M : masse de la capsule ;

M1 : masse de l'échantillon après dessiccation

M2 : masse de l'échantillon après calcination

e) Titre Alcalimétrique Complet (TAC)

Le titre alcalimétrique complet permet de connaître les doses de carbonates d'hydroxydes et d'hydrogencarbonates 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. Les mesures ont été effectuées au début du cours et à la fin de la digestion.

Méthode :

A l'aide d'une burette au 1/10 ml, verser H₂SO₄ 0,1 N jusqu'à pH = 4, soit V ml H₂SO₄ 0,02N

Expression des résultats :

$$\begin{aligned} TAC &= \frac{V \times 0,1 \times 1000}{25} \text{ (méq/l)} \\ &= V \times 4, \text{ en meq.l}^{-1} \end{aligned}$$

Où

$$TAC = V \times 4 \times 0,05, \text{ en g.l}^{-1} \text{ de CaCO}_3 \quad (7)$$

f) Acide Gras Volatils (AGV) par la méthode titrimétrie

Le contrôle des acides gras volatils, stade intermédiaire obligatoire de la digestion anaérobie, est indispensable. Leur accumulation traduit un ralentissement de l'activité des bactéries

Etude de potentiel méthanogène des boues de la station d'épuration de buterere

méthanogènes et peut provoquer le blocage de processus fermentaire, raison pour laquelle le suivi de la concentration des AGV lors de la digestion devient très important.

Méthode :

1-On verse ensuite H₂SO₄ 0,1 N jusqu'à pH=3,5. Faire alors bouillir le liquide à pH=3,5 pendant 3 minutes exactement. Laisser refroidir.

2- Porter le liquide refroidi sous les électrodes du pH-mètre et verser sous agitation avec une burette au 1/10 NaOH 0,1 N jusqu'à pH=4, soit V₂ le volume obtenu.

3- Continuer à verser jusqu'à pH=7 et soit V₃ le nouveau volume.

Expression des résultats :

$$\text{AGV} = \frac{(V_3 - V_2) \times 0,1 \times 1000}{25} \text{ (mg/l éq-acétate)}$$

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

Où :

$$\text{Acidité volatile} = (V_3 - V_2) \times 4 \times 0,06, \text{ en g.l}^{-1} \text{ d'acide acétique.} \quad (8)$$

g) Calculer AGV/TAC

Il faut qu'il soit < 0,5

h) Cinétique de production biogaz

La cinétique de la production du biogaz a été réalisée par une sommation d'une évolution journalière en volume de la production du biogaz cumulé produite pendant 25 jours de la digestion anaérobie.

$$\text{Biogaz} = \sum_{i=0}^n V_n \quad (9)$$

Où :

n est le nombre de jours de la digestion anaérobie

V_n est le volume journalier

n = 25jours

i) Calcul du rendement énergétique

Les calculs de rendement énergétique se faisaient comme suit : on prenait la quantité de biogaz produit pendant 25 jours en millilitre, on la convertie en mètre cube (m³), après on fait un règle de trois simple. Comme on a utilisé 3,75kg dans chaque digesteur, cela va correspondre à la quantité de biogaz produit pour une période de 25 jours et comme ça, on extrapole pour une tonne, on multiplie par 1000 divise par 3,75.

$$\text{Biogaz/t} = \sum_{k=3,75}^{1000} \frac{\text{Bio cum} \times 1000}{3,75}$$

Où: (10)

k est la quantité de boues en kg variant de 3,75 à 1000.

Bio cum : Biogaz cumulé en m³

La quantité trouvée étant exprimée en m³/tonne. Comme on a fait une estimation par an, la quantité de biogaz en m³ trouvée est multipliée par 365 jours divisée par 25 jours. La formule étant :

$$\text{Qté/t/an} = \sum_{k=25}^{365} \frac{\text{Bio/t} \times 365}{25}$$

Où : (11)

Bio/t est la quantité produit en m³/tonne

365 est le nombre de jours annuel

25 est le temps qu'a duré la digestion anaérobie du digesteur

Comme 1m³=9,7kw/t/an, la quantité obtenue en biogaz est multiplié par 9,7.

II.2.2. Dispositifs de la production du biogaz

La figure 4 présente un dispositif expérimental utilisé dans la production du biogaz par la digestion anaérobie selon les méthodes standards. ISO 23590 : 2020, biogaz, ISO 20675 :2018, biogaz. EN 16726, 16723, 16773-2. Il s'agit d'un digesteur en batch ou discontinu.

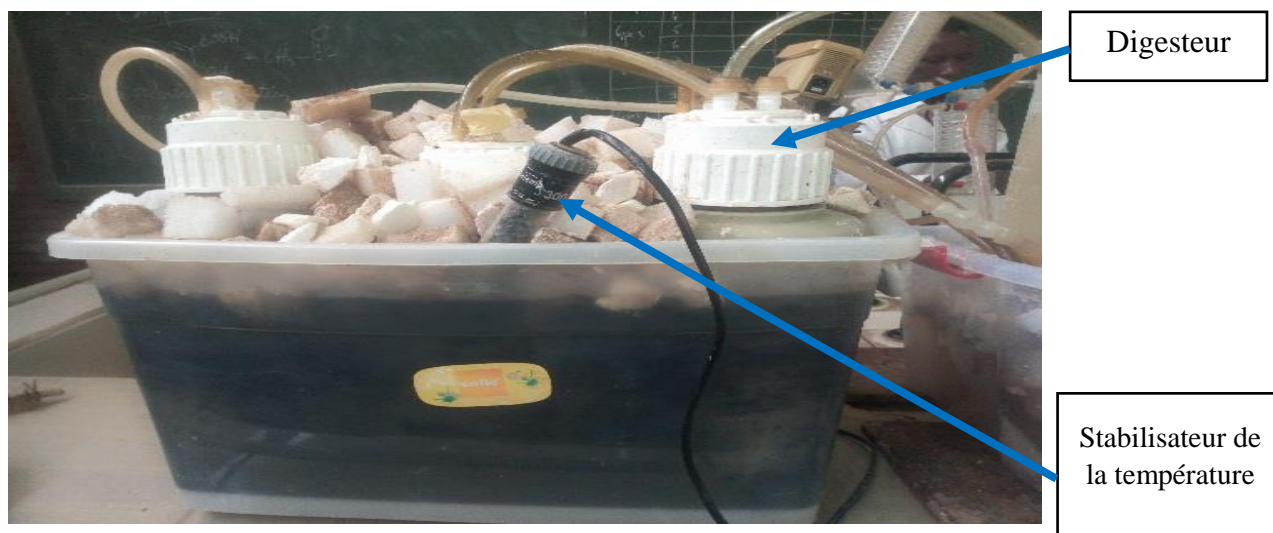


Figure 4 : Dispositif de la production du biogaz

Au cours de l'analyse, six (6) digesteurs pouvant contenir 4kg chacun ont été utilisés. Nous signalons ici que la masse des substrats que nous avons considéré au maximum est de 3,75kg dans le rapport de 2/1,3 /1 et 4/1. L'espace restante est le volume mort du digesteur.

Ces digesteurs sont fermés par des bouchons spécifiques et sont placés dans un bac de 50 L d'eau afin d'éviter toute pénétration d'oxygène. La figure 4 illustre la photo montrant ces types de digesteurs utilisés.

Ces digesteurs sont connectés à des éprouvettes graduées renversées remplis d'eau et placés dans l'eau contenant du chlorure de sodium (NaCl) pour éviter que le dioxyde du carbone (CO₂) du biogaz ne se solubilise (Nsavyimana, 2014) voir **figure 5**. Elles sont surmontées de trois ouvertures, l'une servant à la collecte du biogaz venant du digesteur et l'autre à la collecte du biogaz via un bouchon septum.

Etude de potentiel méthanogène des boues de la station d'épuration de buterere



Figure 5 : Dispositif de quantification du biogaz

Le dispositif utilisé pour la digestion anaérobie est constitué de 3 équipements dont la photo et la description ont été montrées dans les figures 4, 5 et 6.

Après le recueil du biogaz par une seringue de 50 ml on a fait passer le biogaz dans une solution de KOH 9N pour caractériser le biogaz produit, **figure 6**.



Figure 6 : Dispositif de caractérisation du Biogaz

Le principe du procédé est tel que la digestion est faite dans six (6) digesteurs biologiques de quatre (4) litres fermés hermétiquement avec des bouchons spécifiques de la section. Rappelons ici que nous avons utilisé 3,75 litres pour laisser un espace de respiration lors de la digestion anaérobie. L'expérience en cours de la digestion a duré 25 jours.

Etude de potentiel méthanogène des boues de la station d'épuration de buterere

Ces digesteurs sont déposés dans un bac de 50 L d'eau afin d'éviter toute pénétration d'oxygène. Chacun des réacteurs possède trois ouvertures dont une permet d'amener le biogaz vers le dispositif de quantification, la 2^{ème} ouverture permet d'introduire un milieu de culture favorisant la croissance des bactéries anaérobies puis de l'azote gazeux afin de chasser l'oxygène présent éventuellement dans le volume mort du digesteur. Il convient par ailleurs de signaler que ce milieu de culture représente dans chacun des digesteurs, 5 % (v/v) du volume utile de celui-ci (volume occupé par l'échantillon).

La troisième ouverture permet d'échantillonner dans le digesteur afin de déterminer l'évolution du milieu réactionnel (suivi de certains paramètres comme le pH, l'azote ammoniacal et la teneur en carbone). Le dispositif de quantification du biogaz comprend un bac d'environ 25 litres dans lequel sont disposés de manière renversée six (6) éprouvettes graduées comportant un robinet à gaz. Les éprouvettes renversées sont plongées dans une solution piège constituée d'une eau saturée en NaCl pour éviter que le dioxyde de carbone (CO₂) du biogaz ne se solubilise (Nsavyimana, 2014).

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 CH₄ et en CO₂. Pendant l'injection de cet échantillon de biogaz dans le dispositif de détermination des teneurs en CH₄ et en CO₂, le CO₂ est absorbé dans une solution de KOH 9 N se trouvant dans ce dispositif et le CH₄ n'étant pas soluble, déplace celle-ci, ce qui facilite la quantification du volume de ce gaz méthane. Le volume de CO₂ correspond à la différence entre le volume de biogaz injecté et celui de CH₄.

Pour maintenir les digesteurs à la température mésophile (35°C), des résistances de chauffage réglables étaient plongées dans le bac contenant 50 L d'eau et les six (6) digesteurs. En plus, des barreaux magnétiques ont été placés dans les digesteurs, afin de répartir de manière homogène le mélange substrat-inoculum ainsi que la température du milieu réactionnel.

Le tableau 5 nous montre les analyses des différents paramètres physico chimiques en récurrence taux humidité, le taux de suscite, le rapport C /N des boues mélangés. Ces paramètres ont été combinés dans les rapports centésimaux en trois scénarios suivant ainsi que leur témoin. Ces trois scénarios sont alternés comme suit :

Etude de potentiel méthanogène des boues de la station d'épuration de buterere

Notons que pour BP +BF, pendant le mélange des boues primaires avec boues facultatives, aucun inoculum n'a été ajouté pour voir l'influence que va jouer les boues facultatives sur boues primaires pendant la Co-digestion dans les mêmes rapports de ratios.

Le tableau 4 ci-dessous montre la composition du mélange massique selon les ratios utilisés.

Tableau 4 : La composition du mélange massique selon les ratios utilisés.

Scénarios	Digesteurs	Boues Primaire	Facultatives	Inoculum
	Rapport	(%)	(%)	(%)
BP+ I	Témoin	100	-	-
	S/l : 2/1	66	-	34
	S/l : 3/1	75	-	25
	S/l : 4/1	80	-	20
BF+I	Témoin	-	100	-
	S/l : 2/1	-	66	34
	S/l : 3/1	-	75	25
	S/l : 4/1	-	80	20
BP +BF	Témoin	100	-	-
	S/l : 2/1	66	34	-
	S/l : 3/1	75	25	-
	S/l : 4/1	80	20	-

CHAPITRE III. PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS

III.1. Caractérisation des paramètres analysés

Le tableau 6 nous montre les résultats obtenus selon les scénarios des mélanges effectués. Le taux d'humidité obtenus est respectivement 15,78% ; 18,27% et 13,85% pour BP+ I, BF+I et BP+BF. Ces résultats montrent que le mélange (BP+BF) présente une grande teneur du taux de suscite (matière sèche). Cela s'explique par le fait que ce mélange présente une grande quantité de la matière organique issu des deux types de boues.

Le mélange (BF+I) enregistre un taux d'humidité de 18,27%, un taux élevé par rapport à ces deux autres, cela pourrait se justifier par le fait que serait moins dense et pourrait facilement laisser l'humidité d'entrer et la teneur en eau serait plus grande par rapport à ces deux autres types de boues. Le mélange (BP+ Inoculum) présente un taux d'humidité de 15,78 %, cela signifie que, par combinaison, la teneur en eau dans le mélange augmente l'humidité. Le taux de suscite de 81,73 % pour le Mélange (BF +Inoculum) a été observé. Les résultats de cette étude (Tableau 6) montrent que les rapports du C/N se retrouvent dans les normes et sont compris entre 20-30 (Pierre Ntakiyiruta1, 2, et al., 2021). Les résultats de cette étude qui sont respectivement 26, 59 ; 24, 77 et 28, 21 pour le C/N dans les mélanges (BP+I), (BF+I) et (BP+BF) ont montré que les valeurs trouvés pour toutes les compositions sont dans les normes standards. Notons qu'une forte teneur en azote c'est-à-dire un ratio C/N faible (inférieur 20 ou supérieur 30) dans les substrats comme les lisiers ou les fumiers de volaille par exemple, entraîne une intoxication à l'ammoniac (alcalose) (Belmain et al., 2012). Le NH₃ est pourtant toxique pour les bactéries acidogènes et acétogène. Pour remédier à ce problème il faut apporter un substrat moins riche en protéine et fortement fermentescible (C/N > 30) pour relancer l'activité des bactéries (Irakoze, 2023). Ces valeurs montrent que l'inoculum utilisé convient pour la méthanisation des boues d'épuration afin d'augmenter la production du méthane (Ntakiyiruta1,2 et al., 2024).

*Etude de potentiel méthanogène des boues de la station d'épuration de buterere***Tableau 5** : Caractérisation des paramètres analysés lors de la digestion anaérobie

Types substrats	de Taux d'humidité	Taux suscité	de Carbone	Azote	Ratios C/N
	(%)	(%)	(%)	(%)	
BP+ I	15, 78	84, 22	8, 53	0, 32	26, 59
BF+ I	18, 27	81, 73	7, 68	0, 31	24, 77
BP+ BF	13, 85	86, 15	6, 15	0,218	28, 21

BF+I : Boues primaires + Inoculum, BF+ I : Boues FacultatIVES + Inoculum et BF+ BF: Boues primaires + boues FacultatIVES

La figure 7 montre les caractéristiques de quelques paramètres analysés au début et à la fin des essais. En analysant ce tableau, nous remarquons que les valeurs du pH dans certains digesteurs, augmentent tandis que d'autres diminuent corrélativement avec ceux du TAC et AGV. Cela s'explique par le fait que d'une manière générale le pH diminue durant l'acidogénèse au cours de laquelle il y a accumulation AGV (Joseph B et al., 2023)

Ensuite, ce pH augmente durant l'acétogénèse au cours de laquelle il y a épuisement des AGV consommés par les bactéries acétogène; et enfin dans la phase méthanogène, le pH continue à augmenter, ce qui favorise le développement des bactéries méthanogènes (Mlozi et al., 2022). Cela veut dire que la variation du pH est illustrée dans le tableau 7. Dans ce tableau, le pH varie 7,72 à 6, 54 pour BP+I, l'augmentation ou la diminution du pH peut être attribué à deux facteurs dont le pouvoir tampon (élevé ou diminué) et l'alcalinité du digesteur anaérobie. Cette diminution de pH est due au fait que les boues primaires à une forte alcalinité au départ de la digestion anaérobie. En outre les micro-

De manière générale le rapport AGV/ TAC compris organismes produisent de l'alcalinité lors de la dégradation des substrats riches en protéines (dou et al., 2020) entre 0,1 à 0,4 reflète une meilleure stabilité du procédé et si le rapport AGV/ TAC est supérieur à 0,4 cela indique une instabilité du digesteur (Lonamath, 2018). Les acides gras volatils sont des acides organiques à courtes chaînes avec un squelette de 1 à 6 atomes de carbones (acide formique, acétique, propénoïque, butyrique, iso butyrique, valérique, iso-valérique, caproïque et iso-caproïque), ces acides gras sont des métabolites intermédiaires importants de l'hydrolyse et acidogénèse pendant la digestion anaérobie. Le bon déroulement du procédé dépend de l'efficacité de la régulation entre leur formation et leur dégradation (I.Angelidaki & B.Ahring, 1995). L'accumulation des AGV est due principalement à une surcharge organique d'une présence des toxines organiques ou inorganiques et a des fluctuations de température

Etude de potentiel méthanogène des boues de la station d'épuration de buterere

(P.C.Pullammanappallil et al., 2001). Leur accumulation réduit le pouvoir tampon du digesteur et par conséquent une diminution du pH (tableau 6). Toutefois lorsqu'elle devient importante, elle entraîne une inhibition du méthanogène. Cette inhibition survient à des concentrations en AGV totaux de l'ordre de 1 à 3g/l (I.Angelidaki & B.Ahring, 1995).

Tableau 6 : Caractéristiques de quelques paramètres analysés au début et à la fin des essais

Types Substrats	Rapport SI	pH		TAC (eng.l ⁻¹ de CaCO ₃)		AGV (mg/l-éq-acétate)		AGV/ TAC	
		in	Fin	in	Fin	in	Fin	in	Fin
		BP+I	Témoin	7, 72	7, 30	392	160	196	28
	S/I:2/1	7, 65	6, 54	160	320	116	80	0,72	0,25
	S/I:3/1	7, 77	6, 68	232	296	212	88	0,91	0,29
	S/I:4/1	7, 76	6, 70	192	132	96	88	0,50	0,66
BF+I	Témoin	7, 7	7, 16	128	100	62	80	0,48	0,8
	S/I:2/1	7, 46	7, 20	140	110	68	22	0,48	0,20
	S/I:3/1	7, 35	7, 25	166	140	78	08	0,46	0,05
	S/I:4/1	7, 6	7, 48	138	136	66	16	0,47	0,11
BP+BF	Témoin	7, 33	7, 23	200	142	240	98	1,2	0,69
	S/I:2/1	7, 13	7, 30	440	214	240	46	0,54	0,21
	S/I:3/1	7, 16	7, 70	160	384	381	40	2,38	0,10
	S/I:4/1	7, 23	7, 26	120	214	214	40	1,78	0,18

S/I: Rapport substrat/inoculum; In: Initial; Fin: Final

Le tableau 7 nous montre les quantités cumulées du biogaz des différents scénarios combinés, la quantité du biogaz ainsi que leurs compositions en méthane et CO₂ sont indiqués dans ce tableau 7.

Parmi tous les Scenarios, les analyses ont montré que les rapports 3/1 du (BP+I) et 4/1 du (BP+BF) présentent des grandes valeurs en Biogaz. Ceux-ci montrent que la composition des substrats pour les digesteurs de rapport 3/1 et 4/1 suffit pour produire une énergie efficace, en termes de volume qui est respectivement de 15490 ml et 14860 ml.

Cela pourrait s'expliquer par le fait que pour (BP+BF), le mélange a augmenté la présence des bactéries méthanogènes se trouvant dans les boues primaires du digesteur en question, ce qui a provoqué une augmentation du pH de façon remarquable à la fin de la digestion anaérobie provoquant ainsi une diminution des AGV.

Dans (BP+I), les valeurs du pH ont diminué la fin de la réaction, cela pourrait signifier qu'il y a accumulation d'acides gras Volatils lors de surcharges organiques issue de l'inoculum dans les derniers jours de la digestion anaérobie.

Etude de potentiel méthanogène des boues de la station d'épuration de buterere

D'autre part pendant l'initial de la digestion le rapport d'AGV/TAC est de 1,78 ; valeur largement supérieure à la valeur limite de l'inhibition alors que les concentrations élevées des AGV réduisent le pH par conséquent le milieu de la digestion anaérobie devient toxique aux bactéries méthanogènes. Ntakiyiruta et al, (2024) a trouvé la même affirmation pour une type de boues de palmier à huile.

A la fin de la digestion anaérobie, le rapport AGV/TAC du même digesteur est de 0,18 inférieur à (0,4) qui est une valeur favorable et un indicateur à la stabilité du processus anaérobie. Ce qui a permis d'obtenir ce rendement en biogaz de meilleur qui est de 14860ml.

Pour le mélange (BP+I) de rapport 3/1, au départ (initial) le rapport AGV/TAC est de 0,9 cette valeur est aussi supérieur à la valeur limite de l'inhibition (Cazier, 2015). Cela veut dire qu'au départ les AGV des boues primaires étaient minimales (faibles) et à provoquer l'augmentation du pH. A la fin de la digestion anaérobie le pH a diminué et cela pourrait être dû à l'accumulation des AGV issues de l'inoculum, le rapport AGV/TAC est de 0,29. C'est la raison pour laquelle rendement meilleur de 15490 ml supérieur à celui de 14860ml de (BP+I) est observé.

III.2. Cinétique de production du Biogaz

La figure 7 nous montre évolution journalière de la production du biogaz en volume produite pendant les 25 jours de la digestion anaérobie. En comparant les valeurs des résultats en volume obtenus ; le digesteur de rapport 3/1 du mélange (BP+I) a produit une quantité de 15 490 ml de biogaz contre 14860 ml du mélange (BP +BF) pour le rapport 4/1. Dans le témoin un volume de 9800 ml de biogaz a été produit. Cela signifie dans les proportions du mélange sont adéquats pour la digestion anaérobie. En plus les substrats dans ces rapports contiennent de la matière carbonée suffisante riche en nutriments. Les résultats montrent que le rapport C/N a une forte influence sur le rendement de la production en biogaz. Les substrats contenant plus de la matière carbone produit un bon rendement en volume de biogaz Ekouedjen, E. K. (2017). .

Cette diversité de variation de la production du biogaz pourrait s'expliquer par le fait que dans le mélange boues primaire et boues facultatives, que les bactéries méthanogènes sont en grande quantité dans les boues primaires que dans les boues facultatives compte tenu des valeurs de biogaz obtenu dans le scénario 3 et 1 des mélanges (BP+BF) et (BP+I).

Les valeurs de rapport carbone/azote (C/N) obtenus ; qui sont respectivement de 28,21 et 26,59 (BP+I), (BP+BF) explique ce phénomène de rendement en biogaz. Ces rapports de ratios C/N

Etude de potentiel méthanogène des boues de la station d'épuration de buterere

sont dans les limites optimales de la digestion anaérobie qui est de 20 à 30 (Ntakiyiruta^{1,2} et al., 2024) .

Ces rapports indiquent que l'inoculum utilisé dans cette recherche convient pour la méthanisation des boues d'épuration afin d'augmenter la production du méthane. Enfin pour les maxima, le 1^{er} est obtenu au 4^{ième} jour pour le mélange du premier scénario (BP+I) pour le digesteur de rapport 4/1 et puis au environ du 7^{ième} jour du troisième scénario de mélange (BP+BF) de rapport 3/1. L'explication à donner ici est que l'inoculum dans le 1^{er} Scenarior (BP+I) a augmenté les bactéries méthanogènes pendant la digestion anaérobie

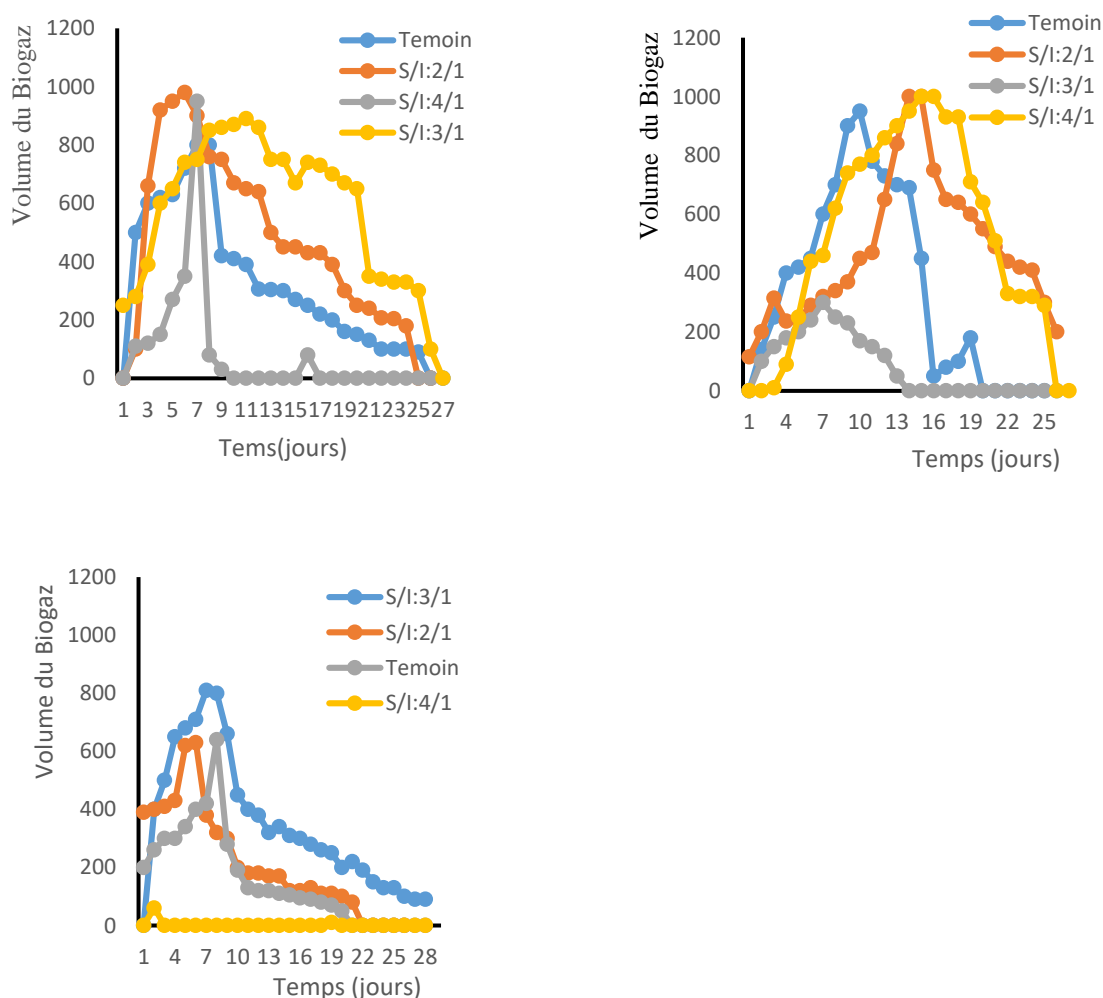


Figure 7 : Evolution journalière de la production du biogaz cumulé en mélange de deux boues (BP+I) ; (BF+ I) et (BF+ BF).

Etude de potentiel méthanogène des boues de la station d'épuration de buterere

La Figure 7 nous montre la variation (évolution) cumulé de biogaz produit durant 25 jours étant dans le processus de la digestion anaérobie. L'analyse des résultats cumulés du biogaz sont respectivement très élevé est de 15490 ml, 14860 ml et 9800m (BP+I), (BP+BF) et (BF+I) (Figure 8). Leurs rapports sont 3/1, 4/1 et 3/1. Cela peut être justifié par le fait que le rapport C/N est très proche.

Malgré que le rapport de C/N du digesteur 3/1 est inférieur à celui du digesteur 4/1, la quantité du biogaz de ce digesteur est supérieur à celui du digesteur 4/1, cela peut se justifier par la présence de microorganismes en abondance que le digesteur 4/1. Ces microorganismes pourraient être augmentés par les proportions de l'inoculum utilisé. Cela veut dire que l'inoculum était composé de 25% pour (BP+I) alors que dans le mélange (BP+BF) les boues facultatives qui étaient à 20% apportent moins de la matière carbonée.

Cette figure (7) illustre que le rapport l'inoculum du digesteur 3/1 (BP+I) et le mélange des substrats pour le digesteur 4/1 (BP+BF) ont augmenté le rendement en biogaz cumulé. Cela pourrait s'expliquer par le fait que les boues primaires contiennent une grande quantité de matière organique facilement biodégradable selon ISO 23590 : 2020, biogaz, ISO 20675 :2018, biogaz. EN 16726, 16723, 16773-2 voire même les résultats de sa composition centésimale. L'autre facteur pourrait être le rapport C/N obtenus qui est très favorable à la biodégradabilité du substrat par les microorganismes (Aoun et Bouaoun, 2015). Ce qui montre que ce mélange a produit un rendement important du biogaz riche en méthane produit (Tableau 8). Le premier maxima est obtenu au 7^{ème} jour pour le rapport 3/1 du mélange (BP+I) ; le 8^{ème} jour pour le rapport 4/1 du mélange (BP+BF) ; mais aussi 7^{ème} jour pour le témoin du mélange (BF+I). Le constat est que les bactéries sont très actives dans les 8 premiers jours du lancement du processus de gestion anaérobie. On peut généraliser que plus la valeur centésimale de l'inoculum augmente plus la quantité cumulé du biogaz augmente.

Ici la particularité qui s'observe sur le digesteur de rapport 2/1 pour le scénario (BP+BF) est une anomalie qui a été observé au 10^{ème} jour du lancement de la digestion anaérobie. Cela pourrait être dû à l'augmentation du pH qui a été observé à la fin de la digestion anaérobie (Tableau 7)

Les variations du pH suite à la méthanisation dépendent du pH avant la digestion et qui est à l'ordre de 7,16 au début et 7,7 à la fin de la digestion (Tableau 7). D'une manière globale, la valeur du pH varie très peu entre le début et la fin du processus. Cela veut dire qu'à la fin de la digestion les acides gras volatils sont consommés par les microorganismes ce qui a provoqué

Etude de potentiel méthanogène des boues de la station d'épuration de Buterere

une augmentation du pH à la fin de la réaction pour le digesteur de rapport 3/ 1 du scenario BP+BF.

La figure 8 nous montre une production du biogaz cumulé, dans ces figures en 8, le constat est le même que pour d'autres chercheurs (Ntakiyiruta1,2 et al., 2024). Les courbes de productions en biogaz cumulé évoluent de manière différente avec une faible quantité de la production en biogaz suivie d'une accélération au fur et à mesure que les jours avancent. Vers la fin de la digestion anaérobie, nous constatons qu'il y a une tendance de chute. Cela s'explique par les différentes phases ou temps que doivent passer la digestion anaérobie. Il s'agit du temps de latence, de croissance exponentielle et de maturité (Ntakiyiruta1,2 et al., 2024).

- La première phase de la latence dépend qui dépend de la nature du substrat utilisé. Ce temps a duré 4 jours pour (BP+I), 3 jours pour (BP+BF) et 1 jour (BF+I) et a produit respectivement 600ml, 10ml et enfin 400ml. Cette phase correspond à la phase de liquéfaction au cours de laquelle il y a l'hydrolyse, l'acidogenèse et l'acétogenèse (Ntakiyiruta1,2 et al., 2024).

- La deuxième phase est la phase de croissance exponentielle correspond à la partie centrale des courbes de production du biogaz. Cette phase a duré 8 jours (du 4^{ème} au 13^{ème} jour pour les boues primaires avec l'inoculum) et 13 jours (du 3^{ème} au 16^{ème} jour pour les boues primaires mélangé avec boues facultatives) enfin 6 jours (du 3^{ème} au 9^{ème} jour pour les boues facultatives mélangé avec son inoculum). Les valeurs maximales obtenues dans cette phase sont respectivement 890ml pour les boues primaires avec son inoculum, 1000 ml pour les boues primaire mélangé avec boues facultatives et 810ml pour les boues facultatives associées à son inoculum.

- La troisième phase est la phase du plateau où il y a une faible production du biogaz dû à l'épuisement des substrats (Ntakiyiruta1,2 et al., 2024).

Le rendement en biogaz le plus élevé est obtenu au mélange des boues primaires avec son inoculum avec un volume de 15490 ml soit une production journalière de 620ml suivis des boues primaires mélangés avec boues facultatives ayant un volume 14860 ml dont la production journalière était de 594 ml. Enfin vient les boues facultatives mélangé avec l'inoculum dont un rendement en biogaz le plus élevé est de 9800 ml avec une moyenne journalière de 392 ml.

Les volumes cumulés provenant de la digestion anaérobies des boues de la STEEP de Buterere des trois scenarios considérés (boues primaires +inoculum ; boues facultatives + boues

Etude de potentiel méthanogène des boues de la station d'épuration de buterere

facultatives et boues facultatives + Inoculum) en fonction des différents rapports 2/1, 3/1, 4/1 et le témoin sont représentés par la figure 8 en abrégés : A = BP+I; B=BP+BF; C= BF+I.

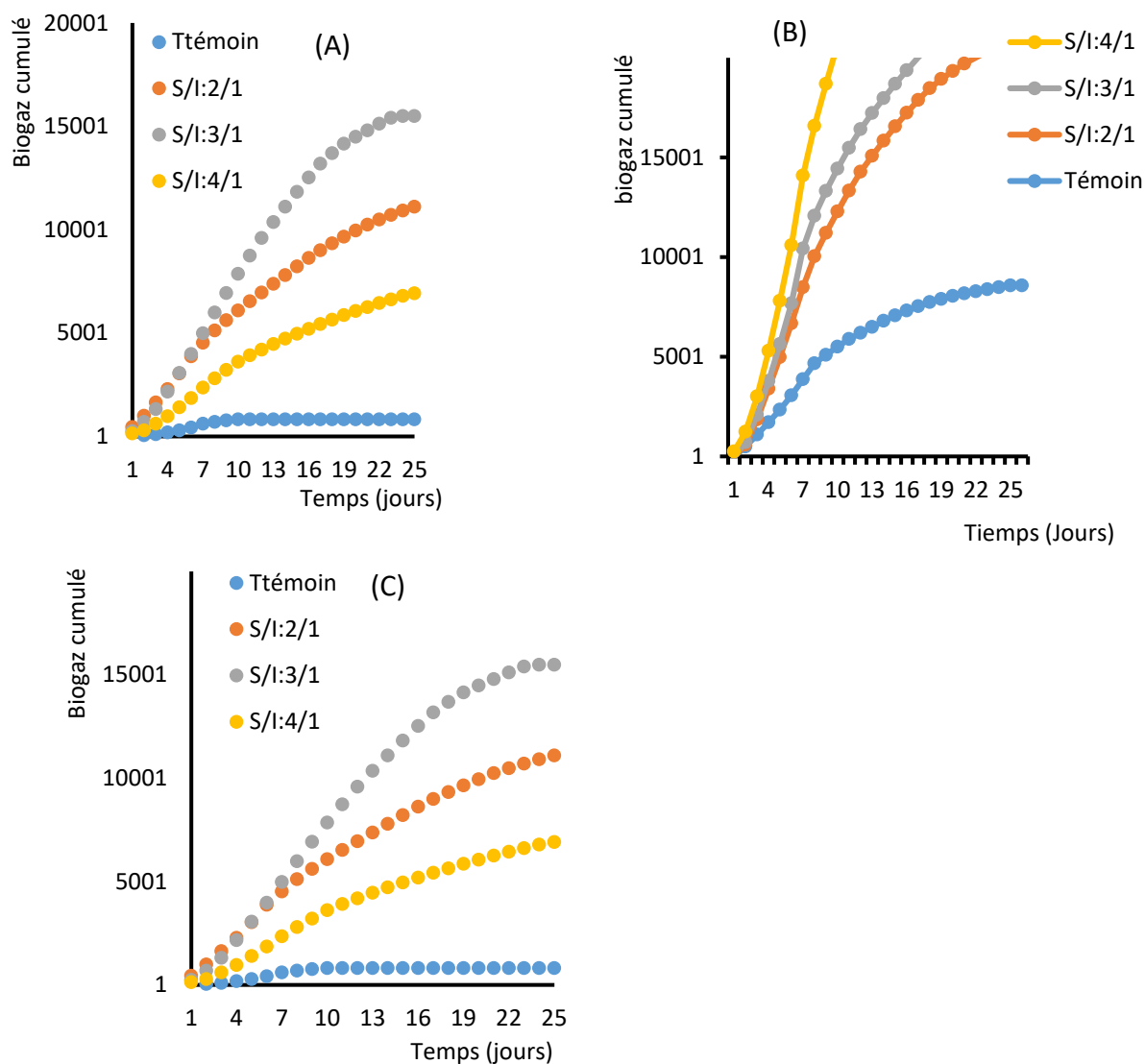


Figure 8: Evolution journalière cumulé du biogaz de (A), (B) et (C)

III.3. Cinétique de production du méthane

La Figure 9 présente la quantité cumulée de méthane (CH_4) produit durant le processus de la digestion anaérobie. En analysant les résultats obtenus du 1^{er} Scénario (BP+I), le digesteur de rapport 4/1 a produit une faible quantité du méthane cumulé par rapport aux autres digesteurs du même scénario, cela pourrait se justifier par l'augmentation des acides gras volatil dans les premiers jours du lancement de la digestion anaérobie qui a provoquée à son tour l'acidogénèse et par conséquent a inhibé la phase de). L'acidogénèse (Hori *et al.* 2006)

Etude de potentiel méthanogène des boues de la station d'épuration de buterere

Cependant ce dernier devrait bénéficier une diminution du pH pour accumuler les AGV responsable à conversion des produits de la phase d'acidogenèse, précurseurs du méthane (Hori *et al.* 2006).

Dans ces conditions les bactéries méthanogènes sont sensibles aux variations de pH. Ce qui veut dire que la concentration en AGV augmente en parallèle une acidification du milieu et inhibe les étapes de l'acétogenèse et la méthanogenèse ce qui a poussé un arrêt de la production du biogaz qui va de pair à la production du méthane dans ce digesteur (Hori *et al.* 2006).

.L'autre facteur pourrait être dû au système de l'agitation du contenu du digesteur qui est généralement très utile à favoriser le contact entre le substrat et les micro-organismes et par conséquent à renforcer l'activité méthanogène ; or les conditions d'agitations n'étaient pas satisfaisantes suite au manque d'appareils de contrôle adéquats de l'agitation dans ce système de la digestion anaérobie. Dans le scénario 2 (boues facultatives + inoculum), les résultats montrent que le digesteur de rapport 4/1 donne un rendement extrêmement faible, cela pourrait être dû au fait que l'inoculum utilisé contiendrait des bactéries méthanogènes qui ont consommé très rapidement les acides gras volatils en petite quantité se trouvant dans les boues facultatives. En plus le rendement du méthane (CH₄) le plus élevé pour les rapports 3/1 des boues primaires-Inoculum et boues primaires mélangé avec boues facultatives serait lié au rapport carbone/azote (C/N) et se trouve entre 20 et 30, valeur limite pour la digestion anaérobie (Ekouedjen, E. K. 2017).

La composition du méthane (CH₄) pour le biogaz produit est représentée dans le tableau 8. Le mélangé des boues primaires-Inoculum dans le rapport 3/1 a produit 67, 52% de méthane. Dans le cas mélangé rapport 4/1 des boues primaires-boues avec facultatives, le méthane est produit en raison de 69, 09%. Les boues facultatives avec l'inoculum quant à elle est produit a raison de 67, 96% de méthane.

Etude de potentiel méthanogène des boues de la station d'épuration de buterere

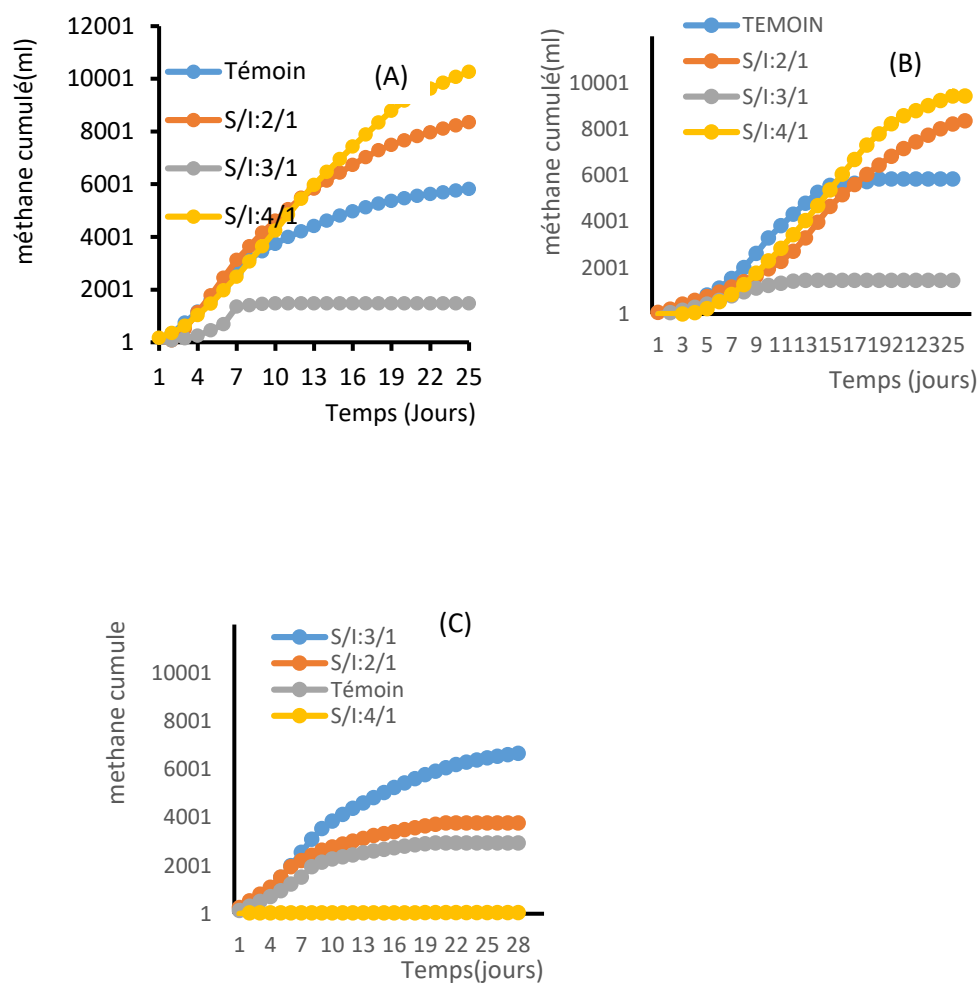


Figure 9: Evolution journalière du méthane cumulé (A), (B), (C)

Tableau 7 : Quantité cumulée et composition du biogaz produit

Types de Substrats	Types de Digesteur	Quantité cumulée En biogaz (ml)	Quantité du CH ₄ (ml)	C H ₄ %	CO ₂ %
BP+I	Témoins	8570	5865	67,35	34,65
	S/I:2/1	11100	7493	67,50	32,50
	S/I:3/1	15490	10 459	67,52	32,48
	S/I:4/1	6910	4628	66,97	33,03
BF+I	Témoins	4200	2740	65,23	34,77
	S/I:2/1	5550	3771	67,94	34,06
	S/I:3/1	9800	6661	67,96	30,04
	S/I:4/1	70	45	64,28	35,66
BP+BF	Témoins	8570	5825	67,96	32,04
	S/I:2/1	12287	8354	67,99	32,01
	S/I:3/1	2140	1478	69,06	30,94
	S/I:4/1	14860	10267	69,09	30,91

III.4. Estimation de la quantité d'énergie produite pour chaque type de substrat par tonne et par an

Le tableau 9 indique une estimation de la quantité d'énergie produite pour chaque type de substrat par tonne et par an. Sur base de ces résultats, nous affirmons que les boues de la STEEP de BUTERERE pourraient contribuer à remédier au problème du manque du courant électrique à moindre coût. Les affirmations trouvées par Ekouedjen, E. K. (2017), montrent qu'un m³ de méthane peut atteindre en brûlant une température de 1400 °C et dégage une quantité de chaleur de 8500 à 9500 kcal. De plus 1m³ de biogaz équivaut à 0,7 litre du pétrole et 0,6 litre du gaz oil. Un m³ de CH₄ est équivalent en énergie à 0,94 m³ de gaz naturel, 9,7 kWh d'électricité, 1,15 L d'essence, 2,1 kg de bois, 1 L de mazout, 1,3 kg de charbon ou 1,7 L d'alcool (Moletta, 2009). La méthanisation présente donc des rendements intéressants dans le cadre d'une valorisation des déchets ménagers, agricoles ou encore industriels (Cazier, s. d. 2020).

Dans cette recherche le mélange (BP+I) pour le digesteur de rapport 3/1 a produit une quantité en énergie très élevé par rapport à tous les autres scenarios qui est de 393,26KW/t /an. En second lieu le mélange (BP+BF) de rapport 4/1 a produit une quantité en énergie de 387,70 KW /t/an. Les résultats trouvés ici sont semblable à une affirmation confirmé par d'Ekouedjen, E. k. (2017).

Tableau 8: Estimation de la quantité d'énergie produite pour chaque type de substrat par tonne et par an

Types de Substrats	Types de Digesteur	Quantité cumulée en biogaz (ml)	CH ₄ %	CH ₄ (ml)	Quantité Biogaz (m ³)	Energie (KWh/t/an)
BP+I	Témoin	870	67.35	586	2,27	22,01
	S/l:2/1	11100	67.50	7493	29,05	81,82
	S/l:3/1	15490	67,52	10 457	40,58	393,26
	S/l:4/1	6910	66.97	4628	17,96	174,21
BF+I	Témoin	4200	65.23	2740	10,65	103,30
	S/l:2/1	5550	67.94	3771	14,68	142,39
	S/l:3/1	9800	67,96	6661	25,92	251,42
	S/l:4/1	70	64,28	45	1,75	16,99
BP+BF	Témoin	8570	67.96	5825	22,673	219,92
	S/l:2/1	12287	67,99	8354	32,514	315,38
	S/l:3/1	2140	69,06	1478	5,767	55,93
	S/l:4/1	14860	69,09	10267	39,97	387,70

1 m³ de CH₄= 8570kcal =9,7 KW, (Benyahia, 2012)

CONCLUSION GENERALE ET RECOMENDATIONS

L'objectif de notre recherche était d'évaluer le potentiel méthanogène des boues de la STEEP de BUTERERE par Co-digestion anaérobie. Les paramètres suivis pour atteindre cet objectif étaient: le pH, les acides gras volatiles (AGV), le titre alcalimétrique complet (TAC), le taux d'humidité, taux de suscité et le rapport carbone azote (C/N). Ces paramètres ont été analysés selon les méthodes standards cité précédemment. Pour bien caractériser les différents substrats organiques et leur susceptibilité à la fermentation méthanogène, il faudrait étudier le temps de latence (temps nécessaire au démarrage de la production de biogaz) et le temps de rétention (temps optimal de production).

Les résultats trouvés montrent que des boues primaires mélangées avec son inoculum produit un volume de biogaz de 15490 ml dont la composition en méthane est de 67,52%. Les estimations quantitatives en énergie est de 393,26KW/t/an. D'autres parts, en cas de mélange des boues primaires associé avec les boues facultatives ont donné des estimations quantitatives en énergie de 387,70KW/t/an. Ce dernier a une composition centésimale en méthane de 69,09%.

Ces résultats nous permettent de confirmer notre hypothèse, que la digestion anaérobie est alors un mode de traitement et de valorisation de la biomasse, riche en matière organiques pour aboutir à la production d'un biogaz riche en CH₄. En effet, un volume de biogaz obtenu pour le mélange boues primaire et boues facultatives était de 14860ml tandis que les boues primaires mélangé avec inoculum (pense) est de 15490 ml.

La digestion anaérobie est donc une très bonne alternative de traitement et de valorisation des déchets riches en matières organiques comme celle des boues de la STEEP de BUTERERE.

Les boues de la STEEP de Buterere pourraient alors aider à répondre aux besoins en énergie afin de réduire sensiblement la pollution locale et l'effet de serre. Cette technique pourrait également participer à la préservation de l'environnement, la prospection et le développement de nouvelles sources d'énergie.

De plus, au regard de la quantité en volume de boues produits et stockés hebdomadairement qui est autour de 27000m³ à la STEEP de BUTERERE, et tenant compte du problématique causé par ces boues suite à la croissance démographique et au regard de ces résultats, quelques

Etude de potentiel méthanogène des boues de la station d'épuration de buterere

perspectives sont formulées pour combler les limites de l'étude et contribuer d'avantage à l'amélioration de la production et la qualité du biogaz.

- Tenir compte dans les prochaines analyses, des paramètres physico chimiques tels que DCO et DBO₅.
- Songer au traitement du biogaz pour purifier le biogaz en le débarrassant des impuretés telles que (H₂O, H₂S, CO₂).
- Améliorer l'étanchéité des réacteurs (digesteurs), ce qui entrainerait un bon système de collecte de biogaz.
- Faire des recherches approfondis à grande échelle sur la digestion anaérobie des boues de la STEP de Buterere pour contribuer à parier aux déficits énergétiques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adou, K. E., Alle, O. A., Kouakou, A. R., Adouby, K., Drogui, P., & Tyagi, 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. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103770>
- Belmain, S. R., Amoah, B. A., Nyirenda, S. P., Kamanula, J. F., & Stevenson, P. C. (2012). Highly Variable Insect Control Efficacy of *Tephrosia vogelii* Chemotypes.
- Bernet, N. (2020). Principes et application de la digestion anaérobie pour la production d'énergie. *Heal Open Science*, hal-02743093, 1-8.
- Bigumandondera, P. (2014). Etude de l'assainissement non collectif en Afrique Subsaharienne : Application à la ville de Bujumbura. Université de Liege.
- Cazier, E. (2015). Rôle des gaz dissous dans la digestion anaérobie par voies sèche des déchets lignino-cellulosiques. Université Montpellier.
- Clotaire, N. A. M. (2014). Etude des Propriétés Physico-chimiques des Charbons obtenus après activation chimique des Résidus Ligneux du Dibetou (*Lovoa Trichiloides* Harms; de l'iroko *Milicia Excelsa* C.C.Berg; et du Moabi (*Baillonella Toxisperma* Pierre. Université de Yaoundé.
- dou, K. E., Allea, O. A., Kouakoub, A. R., Adoubya, K., & Patrick DroguiRajeshwar Dayal Tyagic. (2020). Monodigestion anaérobie des eaux usées de l'abattoir principal de Yamoussoukro (Côte d'Ivoire) : Évaluation du potentiel de production de biogaz et de l'élimination de la pollution organique. 9.
- Dunia, B. (2021). Etude des paramètres physico-chimiques de la biométhanisation des ordures ménagères. 4.0.

Etude de potentiel méthanogène des boues de la station d'épuration de buterere

- Ekouedjen, E. K. (2017). Modélisation de l'influence du ratio carbone sur azote (C/N) de la matière organique sur la composition molaire du biogaz.
- Elhabti), S. et S. (Audrey, & Lalanne), A. (Mathieu. (2014). Biologie des digesteurs Guide complet à destination des exploitants d'unités de méthanisation. Ademe Bourgogne (Bertrand Aucordonnier).
- Elisabeth. (s. d.). Rôle des gaz dissous dans la digestion anaérobie par voie sèche de déchets ligno-cellulosiques. Université de Montpellier.
- Goldemberg. (2000). World Energy Assessment : Energy and the Challenge of Sustainability. Université Quisqueya (Port-auPrince, Haïti).
- I.Angelidaki & B.Ahring. (1995). Establishment and characterization of an anaerobic thermophilic (55degrees-c) enrichment culture degrading long-chain fatty-acids,Appl. Environ. Microbiol. 61 (1995) 2442–2445. Université d'Algerie.
- Irakoze, M. – R. (2023). Etude du potentiel énergétique par conversion des macrophytes et des déchets agro-alimentaires en biogaz : Cas d'eichornia Crassipes, Pistia Stratiotes et rafles de palmier à huile. Université du Burundi.
- Jawad, A., & Bouaoun, D. (2021). Etude des paramètres physico-chimiques de la biométhanisation des ordures ménagères. Université libanaise, 4, 1-7.
- Jay N.Meegoda, N. M., Brian Li 1,2, Kush, P., & Lily, B. W. (s. d.). Un examen des processus, des paramètres et Optimisation de la digestion anaérobie. Revue internationale de Recherche environnementale et santé publique, 1-16.
- J.L .Garcia, B.K.C, & B.Olivier, P. (2000). Taxonomic, phylogenetic, and ecological diversity of Methanogenic Archae. Anaerobe. Université d'Algerie.
- Joaneson, L. (2012). Valorisation de la fraction organique de résidus agricoles et autres déchets assimilés à l'aide de traitements biologiques anaérobies. Université de Lyon (France).

Etude de potentiel méthanogène des boues de la station d'épuration de buterere

- Joseph B, S., Narcis, B., Mahamadi, N., Emilian, M., Dayéri, D., Alfred S, T., Aboubakar S., O., & Valentin, N. (2023). Anaerobic co-digestion of agro-industrial cashew nut wastes with organic matters for biogas production : Case of cashew nut hull and cashew almond skin. 31-01-2023, 14.
- Kouakou Eric Adou, Alle, O. A., Kouakou, A. R., Kopoin Adouby, Drogui, P., & Rajeshwar Dayal Tyagi. (2020). Monodigestion anaérobie des eaux usées de l'abattoir principal de Yamoussoukro (Côte d'Ivoire) : Évaluation du potentiel de production de biogaz et de l'élimination de la pollution organique. Journal du génie chimique environnemental www.elsevier.com/locate/jece, 1-11.
- Lacour, J. (2013). Valorisation de la fraction organique de résidus agricoles et autres déchets assimilés à l'aide de traitements biologiques anaérobies. L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- Lereau, L. (2017). Etude préalable – Valorisation agricole des digestat de méthanisation.
- Lonamath, R. (2018). Mazumder, Performance study on organic carbon, total nitrogen, suspended solids removal and biogas production in hybrid UASB reactor treating real slaughterhouse wastewater, J. Environ. Chem. Eng. 6 (2018) 3474-3484, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.05.031>. Journal du genie chimique environnemental, 4, 9.
- Mlozi, S. H., Mmongoyo, J. A., & Chacha, M. (2022). GC-MS analysis of bioactive phytochemicals from methanolic leaf and root extracts of *Tephrosia vogelii*.
- Moletta, R. (2011). La méthanisation » Lavoisier—Tec & Doc. 3, !1-42.
- Nathalie. (2007). Valorisation énergétique des déchets des dattes a partir de la fermentation alcoolique suivi par la digestion anaérobie.
- Nicolas, B. (2020). Principes et application de la digestion anaérobie pour la production d'énergie. Universite de Yaoundé.

Etude de potentiel méthanogène des boues de la station d'épuration de buterere

- Nsavyimana, G. (2014). Modélisation des processus physiques et biologiques dans des fosses septiques et voies de valorisation des boues de vidange. Université de Liège.
- Nsavyimana, G. (2014). Modélisation des Processus Physiques et Biologiques dans des Fosses Septiques et voies de Valorisation des boues de Vidange : Application a Bujumbura-Burundi. Université de Liège.
- Ntakiyiruta^{1,2}, P., Darya Agueh Pia Agossi², Briton², B. G. H., & Sié Alain Hien ²¹. (2024). Potentiel de biogaz des boues d'épuration d'une raffinerie d'huile de palme. Centre de Recherche en Sciences Naturelles et Environnementales (CRNSE), Université du Burundi, Faculté des Sciences 2700, Bujumbura, Burundi ² Laboratoire des Procédés de Synthèse Industrielle, Environnement et Energies Nouvelles (LAPISEN), Institut National Polytechnique Félix Houphouët Boigny, B.P :1093, Yamoussoukro-Côte d'Ivoire, 10, 1-26. <https://doi.org/10.31695/IJASRE.2024.10.1>
- Pavlostathis, S.G & Giraldo-Gomez. (1991). Kinetics of anaerobic treatment. Water Sci. Technol.
- P.C.Pullammanappallil, Chynoweth, D. P., G.L.yberatos, & S.P.Svoronos. (2001). Stable performance of anaerobic digestion in the presence of a high concentration of propionic acid, Bio resource Technology .78 (2001) 165-169. Université d'Algerie.
- Pierre Ntakiyiruta¹, ², Pierre Claver Mpawenayo², Christophe Niyungeko², Kouassi Benjamin Yao¹, & Gaspard Ntakimazi². (2021). Energetic Valorization of Eichhornia crassipes and Pistia stratiotes by Methane Production in an Anaerobic Co-digestion Process. <https://doi.org/10.11648/j.sjee.20210904.13>
- R. Moletta. (2002). Procédés biologiques anaérobies, dont Gestion des problèmes environnementaux dans les industries agroalimentaires', Technique et documentation,. Editions Lavoisier Paris, France, 7.

Etude de potentiel méthanogène des boues de la station d'épuration de buterere

- Reine, I. M. -. (2023). Etude du Potentiel Energétique par Conversion Macrophytes et des Déchets Agro-Alimentaires en Biogaz Cas d"Eichornia; Crassipes; Pista Siraitiotes et Rafles de Palmier à huile.
- Saïdi-Boulahia, A., Abada, S., & Saber, M. (2018). Valorisation des déchets organiques ménagers et les déjections bovines par la méthanisation. Centre de Développement des Energies Renouvelables, 21. <https://doi.org/DOI:https://doi.org/10.54966/jreen.v21i4.712>
- Sall, M. (2022). Étude du compost et du lixiviat obtenus par cocompostage des résidus agroalimentaires à la ferme.
- SANDRINE, L. G. (2019). Vermicompostage : Une alternative durable de valorisation des déchets organiques ménageres en maraichages périurbain à Yaoundé.
- Simon Poirier. (2016). Inhibitions de la digestion anaérobie : Dynamiques écologiques, indicateurs microbiens et stratégies de résistance. Cas du phénol et de l'azote ammoniacal. Université de Toulouse.
- Tholen et Brune, Théobald, O, Bahmani-piaseczny, & Quaak, M., Daillot, J.-J. (1999). Méthanisation solution d'avenir. ADEME 75. Université de Montpellier.
- Wail, M. M. N. (2022). Valorisation de déchets agricoles et agro-alimentaires par le procédé de digestion anaérobie. Université d'Algérie.

ANNEXES

*Etude de potentiel méthanogène des boues de la station d'épuration de buterere***Tableau 3 : Résultats cumulés du 19 Octobre au 16 novembre 2024 des boues Facultatifs en réaction Inoculum (scenario 2)**

Digesteur Témoin			Digesteur 2/1			Digesteur 3/1			Digesteur 4/1		
Biogaz	CH ₄	CO ₂	Biogaz	CH ₄	CO ₂	Biogaz	CH ₄	CO ₂	Biogaz	CH ₄	CO ₂
0	0	0	115	78	37	0	0	0	0	0	0
140	95	45	200	136	64	100	68	32	00	0	0
250	170	80	315	214	101	150	102	48	10	7	3
400	272	128	237	161	76	180	122	58	90	61	29
420	285	135	240	163	77	200	136	64	250	170	80
450	306	144	290	197	93	240	162	78	440	299	141
600	408	192	320	217	103	300	204	96	460	313	147
700	476	224	340	231	109	250	170	80	620	421	198
900	612	288	370	251	118	230	156	74	740	503	237
950	665	285	450	306	144	170	115	54	770	523	247
780	530	249	470	319	151	150	102	48	800	544	256
730	496	234	650	442	208	120	82	38	860	585	275
700	476	224	840	571	269	50	34	16	900	612	288
690	469	220	1000	680	320	0	0	0	950	646	304
450	306	144	1000	680	320	0	0	0	1000	680	340
50	34	16	750	510	240	0	0	0	1000	680	340
80	54	26	650	442	208	0	0	0	930	632	298
100	68	34	640	435	205	0	0	0	930	632	298
180	122	58	600	408	192	0	0	0	710	482	227
0	0	0	550	374	176	0	0	0	640	435	205
0	0	0	490	333	157	0	0	0	510	347	163
0	0	0	440	299	141	0	0	0	330	224	106
0	0	0	420	285	135	0	0	0	320	217	103
0	0	0	410	279	131	0	0	0	320	217	103
0			300	204	96	0	0	0	290	197	93
0			200	136	64			0	0	0	0