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

La production de biogaz par méthanisation de la panse des bovins : Effet d'addition de balles de riz

Nduwimana, Audifax; Sous la direction de : Directeur : Dr Rosine Ahishakiye; Pr Patrice Bigumandondera

2026-06

UB,IPA

https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/2447

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

UNIVERSITE DU BURUNDI

INSTITUT DE PEDAGOGIE APPLIQUEE

DEPARTEMENT DE BIOLOGIE-CHIMIE

LA PRODUCTION DE BIOGAZ PAR METHANISATION DE LA PANSE DES BOVINS : EFFET D'ADDITION DE BALLES DE RIZ

Par :

Audifax NDUWIMANA

Mémoire présenté et soutenu publiquement en vue de l'obtention du Diplôme de Master en Sciences, Spécialité: Enseignement de la Chimie

<u>Sous la direction de</u> :

Directeur : Dr Rosine AHISHAKIYE

Co-directeur : Pr Patrice BIGUMANDONDERA

Bujumbura, juin 2026

IDENTIFICATION DES MEMBRES DU JURY

Président : Dr Rémy Marie NKURUNZIZA

Secrétaire : Dr François NITEREKA

Directeur : Dr Rosine AHISHAKIYE

Co-directeur : Pr Patrice BIGUMANDONDERA

DEDICACE

Avec une profonde émotion, un immense respect et une grande reconnaissance, je dédie ce modeste travail :

À mon cher père NTAHONDEREYE Lin ;

À ma très chère mère HAVYARIMANA Virginie ;

À toute ma famille ;

À mes enseignants ;

Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude et de ma sincère reconnaissance.

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail de recherche, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes et institutions qui, par leur soutien multiforme, ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Nos sincères remerciements s'adressent en premier lieu à notre Directeur de recherche, Dr Rosine AHISHAKIYE, dont la disponibilité, les conseils avisés, la rigueur scientifique et l'encadrement méthodologique ont été déterminants tout au long de cette étude. Ses orientations pertinentes et ses encouragements constants ont grandement contribué à l'aboutissement de ce travail.

Nous exprimons également notre profonde gratitude à notre Co-directeur, Prof. Patrice BIGUMANDONDERA, pour son accompagnement, ses conseils pertinents et sa contribution précieuse à la réalisation de ce travail.

Nous remercions également l'ensemble des enseignants de l'Université du Burundi, en particulier ceux de l'Institut de Pédagogie Appliquée, pour la qualité de la formation scientifique et pédagogique reçue, qui a constitué une base solide pour la conduite de cette recherche.

Notre reconnaissance va aussi aux agents de l'abattoir de Kigobe qui ont facilité la collecte des données et l'accès aux matières premières nécessaires à cette étude, notamment dans le cadre des travaux expérimentaux liés à la méthanisation de la panse des bovins et à l'utilisation des balles de riz. Leur collaboration et leur disponibilité ont été d'un apport précieux.

Nous tenons à exprimer nos remerciements à l'institution APEE, qui a apporté un appui matériel et technique à la réalisation de ce travail, contribuant ainsi au bon déroulement des activités de recherche.

Nous n'oublions pas nos collègues étudiants et amis pour leur soutien moral, leurs échanges constructifs et l'esprit de solidarité qui ont marqué notre parcours académique.

Enfin, nous remercions très sincèrement notre famille pour son soutien indéfectible, ses encouragements constants et les sacrifices consentis tout au long de nos études. Leur appui moral a été une source permanente de motivation.

À toutes ces personnes, nous disons merci.

RESUME

Ce travail porte sur la production de biogaz par digestion anaérobie de la panse bovine, avec l'ajout de balles de riz comme Co-substrat, dans le but d'optimiser le rendement méthanique et d'évaluer le potentiel énergétique du procédé. L'expérimentation a été réalisée à l'aide de cinq digesteurs batch de 4 L fonctionnant en conditions mésophiles (35–37 °C) pendant une période de 36 jours. Les digesteurs ont été alimentés avec différentes proportions de substrat et de Co-substrat, correspondant à des rapports carbone/azote (C/N) variant de 20 à 30.

La production de biogaz a été suivie quotidiennement par la méthode de déplacement d'eau, tandis que la composition du biogaz a été déterminée par absorption du dioxyde de carbone (CO_2) dans une solution d'hydroxyde de potassium (KOH), permettant d'estimer la teneur en méthane (CH_4). Les résultats ont montré que la cinétique de production du biogaz suit un profil sigmoïde typique, caractérisé par une phase de latence (jours 1–3), une phase exponentielle (jours 4–10), une phase stationnaire (jours 11–25) et une phase de décroissance (jours 26–36).

Le digesteur D3, correspondant à un rapport C/N de 25, a présenté les meilleures performances avec une production cumulée de biogaz de 21471mL et de méthane de 15357mL, soit un rendement méthanique de 71%. Les digesteurs D5 (C/N = 30) et D4 (C/N = 27,5) ont montré des performances intermédiaires, tandis que les digesteurs D1 et D2 (C/N = 21,6 et 20) ont présenté des rendements plus faibles. Ces résultats confirment que les rapports C/N proches de 25–30 favorisent une meilleure activité microbienne et une production accrue de méthane.

Ces résultats démontrent que la digestion anaérobie des déchets organiques constitue une source d'énergie renouvelable exploitable. À plus grande échelle, ce procédé présente un potentiel significatif pour contribuer à la production d'électricité et à la valorisation énergétique des déchets.

En conclusion, l'étude démontre que la Co-digestion de la panse bovine avec les balles de riz permet d'optimiser la production de biogaz et de méthane, en particulier pour un rapport C/N proche de 25. Cette approche constitue une solution durable pour la gestion des déchets organiques et la production d'énergie renouvelable.

Mots clés : Biogaz, Co-digestion, Biométhanisation, Panses de bovins, Balles de riz.

ABSTRACT

This study investigates biogas production through the anaerobic digestion of bovine rumen content, using rice husks as a co-substrate, with the aim of optimizing methane yield and evaluating the energy potential of the process. The experiment was conducted using five batch digesters of 4 L capacity operated under mesophilic conditions (35–37 °C) over a period of 36 days. The digesters were fed with different proportions of substrate and co-substrate, resulting in carbon-to-nitrogen (C/N) ratios ranging from 20 to 30.

Biogas production was monitored daily using the water displacement method, while biogas composition was determined by carbon dioxide (CO_2) absorption in a potassium hydroxide (KOH) solution, allowing the estimation of methane (CH_4) content. The results showed that biogas production followed a typical sigmoidal pattern, characterized by a lag phase (days 1–3), an exponential phase (days 4–10), a stationary phase (days 11–25), and a decline phase (days 26–36).

Among the tested digesters, D3 with a C/N ratio of 25 exhibited the best performance, producing a cumulative biogas volume of 21,471mL and methane volume of 15,357mL, corresponding to a methane yield of 71.5%. Digesters D5 (C/N = 30) and D4 (C/N = 27,5) showed moderate performance, while D1 and D2 (C/N = 21.6 and 20) yielded lower results. These findings confirm that C/N ratios in the range of 25–30 enhance microbial activity and methane production.

These results demonstrate that anaerobic digestion of organic waste constitutes a viable source of renewable energy. At a larger scale, this process shows significant potential to contribute to electricity production and the energy recovery of waste.

In conclusion, the co-digestion of bovine rumen content with rice straw significantly improves biogas and methane production, particularly at an optimal C/N ratio of around 25. This approach represents an effective and environmentally friendly solution for waste valorization and energy generation.

Keywords: Biogas, Co-digestion, Biomethanization, Bovine rumen contents, Rice husks.

TABLE DES MATIERES

IDENTIFICATION DES MEMBRES DU JURY i
DEDICACE ii
REMERCIEMENTS iii
RESUME iv
ABSTRACT v
TABLE DES MATIERES vi
LISTE DES TABLEAUX ix
LISTE DES FIGURES x
LISTE DES ACRONYMES xi
AVANT-PROPOS xii
0. INTRODUCTION GÉNÉRALE 1
0.1. Problématique 3
0.2. Objectifs de l'étude 4
0.2.1. Objectif global 4
0.2.2. Objectifs spécifiques 4
0.3. Intérêts de l'étude 4
0.3.1. Intérêt environnemental 4
0.3.2. Intérêt énergétique 5
0.3.3. Intérêt socio-économique 6
0.3.4. Intérêt scientifique et pédagogique 6
CHAPITRE 1: REVUE DE LA LITTERATURE 8
1.1. Définition de la méthanisation 8
1.2. Généralités sur la Panse de bovins : définition, caractéristiques et potentiel méthanogène 8
1.3. Généralités sur les Balles de riz : définition, composition et rôle comme Co-substrat 9
1.4. Étapes biochimiques de la méthanisation 9
1.4.1. Hydrolyse 10
1.4.2. Acidogenèse 11
1.4.3. Acétogenèse 11
1.4.4. Méthanogenèse 11
1.5. Produits de la digestion anaérobie 11
1.5.1. Biogaz: produit énergétique principal 11

1.5.2. Le digestat: coproduit organique valorisable 12
1.6. Facteurs influençant la production de biogaz 13
1.6.1. Température 13
1.6.2. pH 14
1.6.3. Rapport Carbone/Azote (C/N) 14
1.6.4. Charge organique (OLR) 14
1.6.5. Temps de rétention hydraulique (TRH) 14
1.6.6. Matière sèche (MS) 14
1.6.7. Oligo-éléments et nutriments 14
1.6.8. Inhibiteurs 15
1.7. Co-digestion et substrats organiques 15
1.7.1. Avantages de la Co-digestion 15
1.7.2. Revue des recherches similaires 16
CHAPITRE 2 : ETUDE EXPERIMENTALE 17
2.0. Introduction sur la méthodologie 17
2.1. Matériel et équipements 17
2.1.1. Matériel de caractérisation physico-chimique 18
2.1.2. Dispositif expérimental de méthanisation 19
2.2. Préparation des substrats 20
2.2.1. Panse de bovins 20
2.2.2. Balles de riz 21
2.3. Description du kit et des dispositifs utilisés pour la digestion anaérobie 23
2.3.1. Digesteurs de type batch 23
2.3.2. Système de collecte et de quantification du biogaz 23
2.3.3. Dispositif de caractérisation du biogaz 23
2.4. Caractérisation des paramètres physico-chimiques 23
2.4.1. Détermination de la matière sèche (MS) 24
2.4.2. Détermination des cendres et de la matière volatile (MV) 25
2.4.3. Détermination du pH 25
2.4.4. Détermination de l'azote total (Méthode de Kjeldahl) 26
2.4.5. Détermination du carbone organique 27
2.4.6. Détermination de la matière organique 28
2.5. Quantités de substrat et Co-substrat utilisées dans la digestion anaérobie et le rapport C/N correspondant 29

2.6. Conditions expérimentales 30
2.7. Protocole expérimentale de la digestion anaérobie 30
2.7.1. Chargement des digesteurs 31
2.7.2. Mise en place du système de collecte du biogaz 31
2.7.3. Conditions d'incubation 32
2.7.4. Suivi de la production de biogaz 32
2.7.5. Détermination de la composition du biogaz 32
CHAPITRE 3 : PRÉSENTATION, INTERPRÉTATION ET DISCUSSION DES RÉSULTATS 33
3.1. Présentation des résultats 33
3.1.1. Résultats de caractérisation physico-chimique des substrats 33
3.1.2. Résultats de production journalière de biogaz et de méthane 34
3.1.3. Résultats de production cumulée de biogaz et de méthane 37
3.1.4. Évolution du pH 41
3.2. Interprétation des résultats 42
3.2.1. Cinétique de production de biogaz 42
3.2.2. Comparaison entre digesteurs et influence du Co-substrat pour le biogaz 43
3.2.3. Influence de la température 43
3.2.4. Cinétique de production de méthane (CH_4) 44
3.2.5. Comparaison entre digesteurs et influence du C/N pour le méthane 45
3.2.6. Rendement méthanique 45
3.3. Discussion des résultats 46
3.3.1. Influence du rapport C/N sur la production de biogaz et de méthane 46
3.3.2. Effet de la Co-digestion sur la production de biogaz 46
3.3.3. Cinétique de production et comportement du système 47
3.3.4. Influence de la température 47
3.3.5. Rendement méthanique et qualité du biogaz 48
3.3.6. Implications énergétiques et environnementales 48
CONCLUSION GENERALE ET SUGGESTIONS 50
1. Conclusion générale 50
2. Suggestions 51
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 53

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Quantités de substrat et Co-substrat utilisées dans les digesteurs et le rapport C/N correspondant 30
Tableau 3.1 : Résultats de la caractérisation physicochimique de la panse de bovins 33
Tableau 3.2: Résultats de la caractérisation physicochimique de balles de riz 34
Tableau 3.3 : Résultats journaliers de Production de Biogaz (36 Jours) 35
Tableau 3.4 : Production cumulée de biogaz et de méthane par digesteur sur 36jours 38
Tableau 3.5 : Valeurs mesurées du pH au début et à la fin de l'expérimentation 41

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Schéma des grandes étapes de la digestion anaérobie 10
Figure 2.1 : Panse des bovins collectés à l'abattoir de KIGOBE 20
Figure 2.2 : Broyage et tamisage de panse des bovins 21
Figure 2.3 : Balles de riz collectées à KIREKURA 21
Figure 2.4 : Broyage de balles de riz 22
Figure 2.5 : Montage de kit d'expérimentation 31
Figure 3.1 : Courbes de cinétique de production journalière de biogaz en fonction du temps 37
Figure 3.2 : Courbes de cinétique de production journalière de CH_4 en fonction du temps.... 37
Figure 3.3 : Courbes de cinétique de production cumulée de biogaz en fonction du temps 40
Figure 3.4 : Courbes de cinétique de production cumulée de CH_4 en fonction du temps 40
Figure 3.5 : Courbes de proportion de méthane (%) dans le biogaz au fil des 36 jours pour cinq digesteurs batch 41

LISTE DES ACRONYMES

1. **AGV** : Acides Gras Volatils
2. **C.O** : Carbone Organique
3. **ISABU** : Institut des Sciences Agronomiques du Burundi
4. **MS** : Matière Sèche
5. **MV** : Matière Volatile
6. **OLR**: Organic Loading Rate (Charge OrganiqueAppliquée)
7. **pH** : Potentiel Hydrogène
8. **TRH** : Temps de Rétention Hydraulique
9. **D** : Digesteur
10. $\boldsymbol{PCI}$: Pouvoir Calorifique Inférieur
11. **C/N**: Rapport Carbone/Azote
12. **APEE** : Association pour la Promotion de l'Education et de l'Entrepreneuriat

AVANT-PROPOS

La question de la gestion durable des déchets organiques constitue aujourd'hui un enjeu majeur tant sur le plan environnemental qu'énergétique, particulièrement dans les pays en développement. Face à l'augmentation des déchets issus des activités humaines et animales, des solutions innovantes et durables sont nécessaires pour limiter les impacts négatifs sur l'environnement tout en valorisant ces ressources. Parmi ces solutions, la digestion anaérobie apparaît comme une technologie prometteuse, capable de transformer les déchets organiques en biogaz, une source d'énergie renouvelable, et en digestat, un fertilisant naturel.

C'est dans ce contexte que s'inscrit le présent travail, qui porte sur la production de biogaz par méthanisation de la panse des bovins : effets d'addition de balles de riz, un déchet abondant dans les abattoirs, souvent mal géré et source de pollution. L'originalité de cette étude réside dans l'utilisation des balles de riz comme Co-substrat, dans le but d'optimiser le processus de méthanisation, notamment à travers l'ajustement du rapport carbone/azote (C/N), un paramètre clé influençant l'efficacité de la digestion anaérobie.

Ce mémoire a été réalisé dans le cadre du Master en Sciences, spécialité enseignement de la chimie, à l'Université du Burundi. Il vise à contribuer à la fois à l'avancement des connaissances scientifiques dans le domaine de la valorisation des déchets organiques, et à la promotion de solutions énergétiques durables adaptées au contexte local.

Au-delà de son intérêt scientifique, ce travail ambitionne également de sensibiliser à l'importance de la gestion rationnelle des déchets et à l'utilisation des technologies propres, dans une perspective de développement durable et de transition énergétique.

0. INTRODUCTION GÉNÉRALE

Au Burundi, la croissance démographique, l'urbanisation rapide et l'intensification des activités agro-alimentaires ont entraîné une augmentation considérable de la production de déchets organiques, posant de sérieux problèmes environnementaux et sanitaires. Parmi ces déchets, la panse des bovins est généré quotidiennement en quantités significatives et occupent une place importante en raison de sa forte charge organique et de son potentiel polluant lorsqu'il est abandonné à l'air libre ou rejeté sans traitement approprié. Cette pratique entraine multiples conséquences néfastes : pollution des sols et des eaux de surface, émissions des odeurs désagréables, prolifération de mouches et des microorganismes pathogènes, ainsi que dégradation du cadre de vie des populations riveraines. A long terme, ces rejets incontrôlés contribuent à la détérioration de l'environnement et posent un véritable problème de santé publique.

Parallèlement, le Burundi fait face à un défi énergétique majeur. L'approvisionnement en énergie domestique repose encore largement sur le bois de chauffage et le charbon de bois, ce qui accentue la pression sur les ressources forestières et favorise la déforestation. Cette forte dépendance au bois-énergie traduit un déficit en solutions énergétiques alternatives accessibles, durables et adaptées aux réalités locales.

Pourtant, la panse des bovins est riche en matières organiques facilement biodégradables et présente, de ce fait, un potentiel méthanogène élevé, qui reste largement sous-exploité dans le contexte local (Dowd et al., 2025).

Dans ce contexte, la digestion anaérobie, encore appelée méthanisation, s'impose comme une technologie efficace permettant à la fois la valorisation énergétique des déchets organiques et la réduction de leur impact environnemental. Ce procédé biologique repose sur l'action concertée de microorganismes qui dégradent la matière organique en absence d'oxygène pour produire du biogaz, principalement composé de méthane, et un résidu stabilisé appelé digestat. De nombreuses études récentes soulignent l'intérêt de la méthanisation dans la gestion intégrée des déchets et la production d'énergie renouvelable, notamment en milieu rural et périurbain(Y. Li et al., 2019).

Les déchets d'abattoirs, et plus particulièrement la panse des bovins, présentent un potentiel méthanogène élevé du fait de leur richesse en matière organique facilement biodégradable. Le contenu ruminal est constitué de résidus végétaux partiellement digérés, de microorganismes et de composés organiques favorables à la fermentation anaérobie.

Des travaux récents ont montré que la panse des bovins peut produire des quantités appréciables de biogaz lorsqu'elle est utilisée comme substrat de méthanisation (Ihoeghian et al., 2022). Toutefois, la mono-méthanisation de ce type de substrat pose souvent des problèmes de stabilité du procédé.

En effet, la panse des bovins est caractérisée par une teneur élevée en azote, issue principalement des protéines, ce qui conduit à un rapport Carbone/Azote (C/N) relativement faible. Or, un déséquilibre du rapport C/N est reconnu comme l'un des facteurs majeurs d'inhibition du processus de méthanisation. Une dégradation excessive des composés azotés entraîne la formation d'ammoniac libre, toxique pour les bactéries méthanogènes, provoquant une baisse du rendement en méthane et parfois l'arrêt du processus (Yang et al., 2025a). Ces contraintes ont conduit de nombreux chercheurs à explorer des stratégies visant à améliorer la stabilité de la digestion des déchets riches en azote.

La Co-digestion apparaît alors comme une solution pertinente pour optimiser le processus. Elle consiste à digérer simultanément plusieurs substrats complémentaires afin d'équilibrer leur composition nutritionnelle, d'améliorer la biodégradabilité globale et d'augmenter la production de biogaz. L'association d'un substrat riche en azote avec un Co-substrat carboné permet notamment d'ajuster le rapport C/N à des valeurs optimales généralement comprises entre 20 et 30. Plusieurs études ont démontré que la Co-digestion améliore la stabilité du procédé, limite les phénomènes d'inhibition et augmente significativement les rendements méthanogènes(Ma et al., 2020).

Dans cette perspective, les balles de riz constituent un Co-substrat particulièrement intéressant. Résidu agricole abondant dans les zones rizicoles, les balles de riz sont riche en carbone et en composés lignocellulosiques, ce qui lui confère un rapport C/N élevé. Bien que sa structure fibreuse limite sa biodégradabilité lorsqu'elle est utilisée seule, son incorporation en Co-digestion avec des substrats azotés s'est révélée bénéfique dans plusieurs travaux récents. Des études ont montré que l'ajout de balle de riz ou d'autres résidus lignocellulosiques permet d'améliorer le rendement en biogaz et de stabiliser le pH du milieu réactionnel (Meneses Quelal & Pilamunga Hurtado, 2023).

Cependant, malgré l'abondance de ces deux substrats panse de bovins et balles de riz leur Co-digestion reste encore peu étudiée dans le contexte africain, et particulièrement au Burundi, où les conditions climatiques, les pratiques de gestion des déchets et les moyens technologiques diffèrent de ceux des pays industrialisés. Cette situation met en évidence un manque de données

expérimentales locales permettant d'orienter efficacement la mise en œuvre de la méthanisation à partir de ressources disponibles sur place.

C'est dans ce cadre que s'inscrit la présente étude, qui s'intéresse à la **production de biogaz par méthanisation de la panse des bovins avec addition de balles de riz**. La problématique centrale de ce travail réside dans la recherche d'un compromis entre valorisation énergétique, stabilité du procédé et adaptation aux réalités locales.

0.1. Problématique

Dans le contexte burundais, l'abandon ou le rejet sans traitement approprié de la panse des bovins, constitue une source importante de pollution environnementale et de risques sanitaires. Malgré leur richesse en matière organique biodégradable, ces déchets demeurent sous-valorisés et représentent davantage une contrainte qu'une ressource.

Dans le même temps, la dépendance persistante au bois de chauffage comme principale source d'énergie domestique accentue la dégradation des écosystèmes forestiers et souligne l'insuffisance des alternatives énergétiques renouvelables.

La méthanisation apparaît comme une technologie susceptible de transformer cette contrainte environnementale en opportunité énergétique. Toutefois, la mono-méthanisation de la panse des bovins présente des limites liées à son déséquilibre nutritionnel, notamment un rapport C/N faible pouvant compromettre la stabilité du processus.

Ainsi, deux contraintes majeures se posent simultanément :

- La gestion inadéquate des déchets d'abattoirs ;
- La dépendance au bois-énergie.

Ces deux problématiques, bien que distinctes en apparence, peuvent être abordées de manière intégrée à travers la valorisation énergétique des déchets organiques.

Dans le cadre de cette étude, les questions suivantes se posent :

- Quelles sont les caractéristiques physico-chimiques de la panse des bovins et des balles de riz utilisées comme substrats ?
- L'addition de balles de riz améliore-t-elle la production de biogaz issue de la méthanisation de la panse bovine ?
- Quelle proportion de balles de riz permet d'obtenir un rendement optimal en biogaz ?

Ces questions appellent des réponses anticipées sous forme d'hypothèse scientifique : L'ajout de balles de riz améliore l'efficacité de la méthanisation de la panse des bovins en optimisant le rapport C/N.

0.2. Objectifs de l'étude

0.2.1. Objectif global

Optimiser la production de biogaz par digestion anaérobie de la panse des bovins, en utilisant les balles de riz comme Co-substrat, afin d'optimiser le rendement méthanique.

0.2.2. Objectifs spécifiques

- Étudier l'influence des paramètres physicochimiques (pH, température, temps de rétention) sur le rendement du biogaz ;
- Comparer la production de biogaz avec et sans Co-substrat
- Évaluer l'effet de l'ajout de balles de riz sur la production de biogaz ;
- Déterminer le rapport C/N optimal pour maximiser la méthanisation ;
- Déterminer le rapport C/N optimal pour maximiser la méthanisation ;

0.3. Intérêts de l'étude

Avant de présenter les différents intérêts de cette étude, il est important de rappeler que la gestion des déchets organiques et la recherche de sources d'énergie alternatives constituent aujourd'hui des préoccupations majeures dans de nombreux pays, en particulier dans les pays en voie de développement. La croissance démographique, l'augmentation des activités d'élevage et des abattoirs ainsi que la forte dépendance aux sources d'énergie traditionnelles comme le bois de chauffage entraînent des conséquences importantes sur l'environnement, l'économie et la santé publique. Dans ce contexte, la valorisation des déchets organiques par des technologies appropriées, telles que la méthanisation, apparaît comme une solution durable permettant à la fois de réduire la pollution et de produire de l'énergie renouvelable.

Ainsi, la présente étude portant sur la production de biogaz par méthanisation de la panse des bovins avec addition de balles de riz présente plusieurs intérêts majeurs sur les plans environnemental, énergétique, socio-économique ainsi que scientifique et pédagogique.

0.3.1. Intérêt environnemental

Ce travail présente un grand intérêt environnemental car il contribue à la gestion durable des déchets organiques. Dans de nombreux abattoirs, les déchets d'origine animale comme la panse des bovins sont souvent abandonnés dans la nature ou rejetés sans traitement préalable.

Cette pratique entraîne plusieurs problèmes :

- Pollution des sols et des eaux par les matières organiques en décomposition.
- Mauvaises odeurs et prolifération des insectes et micro-organismes pathogènes.
- Risques sanitaires pour les populations et les animaux.
- Émission de gaz à effet de serre lors de la décomposition naturelle des déchets.

La méthanisation permet de transformer ces déchets en ressources utiles. Grâce à ce procédé biologique, la matière organique est dégradée par des micro-organismes en absence d'oxygène pour produire du biogaz et du digestat(Ibrahim et al., 2025). Ainsi, ce travail contribue à :

- Réduire la pollution environnementale liée aux déchets d'abattoirs.
- Valoriser les déchets organiques au lieu de les laisser se décomposer dans l'environnement.
- Produire un digestat utilisable comme fertilisant agricole, ce qui réduit l'usage des engrais chimiques.

Par conséquent, cette étude participe à la protection de l'environnement et à la promotion d'une gestion durable des déchets organiques.

0.3.2. Intérêt énergétique

L'étude présente également un intérêt énergétique important, surtout dans les pays en voie de développement où l'accès à l'énergie reste limité. Dans beaucoup de ménages, la principale source d'énergie pour la cuisson est le bois de chauffage ou le charbon de bois.

Cette forte dépendance entraîne plusieurs conséquences :

- Déforestation due à l'exploitation excessive du bois.
- Augmentation du coût de l'énergie domestique.
- Pollution de l'air liée à la combustion du bois ou du charbon.

La méthanisation permet de produire du biogaz, un combustible renouvelable constitué principalement de méthane (CH_4)(Qian et al., 2025). Ce gaz peut être utilisé pour :

- La cuisson des aliments,
- L'éclairage,
- Ou même la production d'électricité dans certains cas.

Ainsi, ce travail montre que les déchets organiques disponibles localement (panse des bovins et balles de riz) peuvent être transformés en source d'énergie renouvelable, contribuant à :

- Réduire la dépendance au bois de chauffage,
- Promouvoir les énergies propres,
- Soutenir la transition énergétique.

0.3.3. Intérêt socio-économique

Sur le plan socio-économique, cette étude peut contribuer à améliorer les conditions de vie des populations.

La production de biogaz à partir de déchets organiques peut :

- Réduire les dépenses énergétiques des ménages pour la cuisson,
- Favoriser la création d'activités économiques locales liées à la gestion des déchets et à la production d'énergie,
- Améliorer l'hygiène publique autour des abattoirs et des zones d'élevage.

De plus, le digestat issu du processus de méthanisation peut être utilisé comme engrais organique en agriculture(Song et al., 2021). Cela permet :

- D'améliorer la fertilité des sols,
- D'augmenter la productivité agricole,
- De réduire l'achat d'engrais chimiques coûteux.

Ainsi, cette étude peut contribuer au développement durable, en combinant gestion des déchets, production d'énergie et amélioration de l'agriculture.

0.3.4. Intérêt scientifique et pédagogique

Cette étude présente également un intérêt scientifique et pédagogique, notamment dans le domaine de la recherche et de l'enseignement.

Sur le plan scientifique, le travail permet :

- D'étudier le processus de méthanisation de la panse des bovins,
- D'analyser l'effet de l'addition des balles de riz comme Co-substrat,
- D'optimiser certains paramètres importants comme le rapport carbone/azote (C/N) pour améliorer la production de biogaz.

Les résultats obtenus peuvent enrichir les connaissances scientifiques sur la Co-digestion des déchets organiques et servir de référence pour d'autres recherches.

Sur le plan pédagogique, cette étude est particulièrement importante car elle permet :

- D'intégrer des applications concrètes de la chimie et de la biochimie dans l'enseignement,
- De sensibiliser les étudiants et les apprenants aux problèmes environnementaux et énergétiques,
- De promouvoir une éducation scientifique orientée vers les solutions durables.

En tant qu'enseignant de chimie en formation, ce travail constitue aussi un outil pédagogique pour illustrer les transformations chimiques et biologiques impliquées dans la production d'énergie à partir de déchets.

CHAPITRE 1: REVUE DE LA LITTERATURE

1.1. Définition de la méthanisation

La méthanisation, ou digestion anaérobie, est un processus biologique naturel au cours duquel des microorganismes dégradent des matières organiques en absence d'oxygène pour produire du biogaz (principalement CH_4 et CO_2) et un résidu stabilisé appelé digestat (Shamsuddin et al., 2022). Ce procédé valorise les déchets organiques tout en réduisant les impacts environnementaux négatifs liés à leur accumulation (Scarlat et al., 2018). Il constitue une voie durable de production d'énergie renouvelable et de gestion intégrée des déchets organiques, notamment en milieu rural et périurbain

1.2. Généralités sur la Panse de bovins : définition, caractéristiques et potentiel méthanogène

La panse des bovins est un déchet organique issu des abattoirs, constitué de matière organique partiellement digérée provenant du rumen des bovins**,** principalement de fibres végétales non dégradées, de liquide ruminal, de microorganismes actifs et de produits intermédiaires de fermentation**.** Il se caractérise par une forte teneur en azote organique et en composés ammoniacaux susceptibles d'inhiber la méthanogenèse lorsque le substrat est digéré seul.

En revanche, la présence : d'enzymes, de bactéries hydrolytiques, d'une matière organique déjà prédigérée, favorise une hydrolyse rapide et une conversion efficace des substrats facilement fermentescibles (Ossa Henao et al., 2023).

Cependant, son rapport C/N faible conduit souvent à l'accumulation d'ammoniac libre, provoquant une inhibition partielle ou totale de la production de méthane. D'où la nécessité de l'associer à un substrat carboné afin de restaurer l'équilibre nutritionnel du milieu (Mao et al, 2015).

Dans le cadre de cette étude, la panse bovine représente donc :

- Une source de microorganismes actifs,
- Un substrat méthanogène à haut potentiel mais nécessitant une Co-digestion correctrice.

1.3. Généralités sur les Balles de riz : définition, composition et rôle comme Co-substrat

Les balles de riz correspondent à l'enveloppe externe dure qui entoure le grain de riz, constituée de matériaux résistants comme la silice et la lignine, et éliminée lors de la transformation du riz. Elles constituent un résidu lignocellulosique abondant dans les zones rizicoles. Elles sont majoritairement composées de cellulose, d'hémicellulose et de lignine, avec une teneur élevée en carbone organique et en silice.

Malgré leur forte teneur en matière sèche, leur biodégradabilité est limitée par la structure lignifiée qui rend la matière peu accessible aux microorganismes méthanogènes (Nguyen et al, 2019).

Cependant, lorsqu'elles sont utilisées comme Co-substrat, elles présentent plusieurs avantages :

- Augmentation du rapport C/N,
- Dilution de l'ammoniac et d'autres inhibiteurs,
- Apport de structure favorisant le mélange,
- Amélioration de la stabilité chimique et biologique du digesteur (Saubade, 1981).

Ainsi, associées à un substrat riche en azote comme la panse, elles permettent d'obtenir un milieu plus équilibré et mieux adapté à la croissance des archées méthanogènes.

1.4. Étapes biochimiques de la méthanisation

La méthanisation se déroule en quatre grandes étapes biochimiques successives, assurées par des groupes spécifiques de microorganismes.

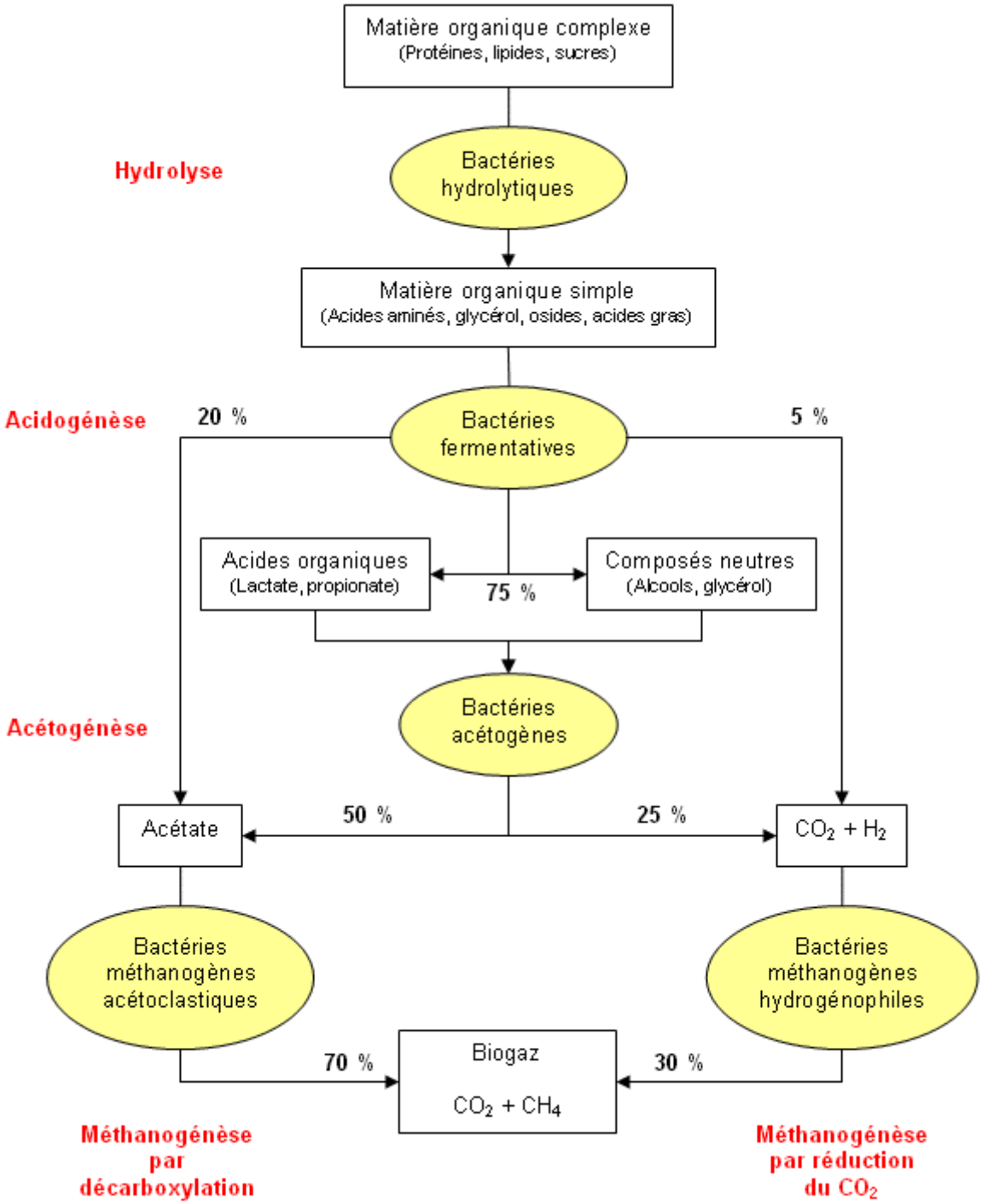


Figure 1.1 : Schéma des grandes étapes de la digestion anaérobie (Shrestha et al.2017)

1.4.1. Hydrolyse

La matière organique complexe (protéines, glucides, lipides) est décomposée en unités plus simples (acides aminés, sucres, acides gras) par des enzymes hydrolytiques. Cette étape est souvent le facteur limitant lorsqu'il s'agit de substrats lignocellulosiques tels que les balles de riz(Shrestha et al., 2017).

1.4.2. Acidogenèse

Les produits de l'hydrolyse sont fermentés en acides gras volatils (AGV), hydrogène (H_2), alcool et CO_2. Une accumulation excessive d'AGV peut mener à une acidification du milieu , ce qui peut inhiber les étapes suivantes si non contrôlé (Zhao et al., 2020).

1.4.3. Acétogenèse

Les acides gras à chaîne plus longue sont transformés en acétate, H_2 et CO_2 par des bactéries acétogènes. Cette étape est essentielle car elle alimente directement les archées méthanogènes en substrats pour la production de méthane (Sun et al., 2022).

1.4.4. Méthanogenèse

Les archées méthanogènes produisent du méthane à partir de l'acétate ou de CO_2 +H_2. Cette étape est la plus sensible du processus, étant fortement inhibée par des conditions défavorables telles que un pH trop bas ou une température inappropriée (Kalamaras et al., 2021)

1.5. Produits de la digestion anaérobie

1.5.1. Biogaz: produit énergétique principal

Le biogaz est le produit gazeux issu de la digestion anaérobie. Il résulte de la dégradation de la matière organique par des microorganismes en absence d'oxygène

1.5.1.1. Composition et caractéristiques

Le biogaz est constitué principalement selon(Al, 2025), de :

- Méthane (CH_4: 50–70 %
- Dioxyde de carbone (CO_2) : 30–50 %
- Traces:H_2S, NH_3, vapeur d'eau

Le méthane est la fraction énergétique essentielle, responsable du pouvoir calorifique du biogaz.

1.5.1.2. Propriétés énergétiques

Le biogaz est considéré comme une énergie renouvelable capable de remplacer les combustibles fossiles. Des travaux récents montrent qu'il peut être utilisé directement pour la cuisson, le chauffage ou la production d'électricité, après épuration, il devient du biométhane injectable dans les réseaux ou utilisable comme carburant(Negro et al., 2025).

1.5.1.3. Intérêt environnemental

Le biogaz présente plusieurs avantages :

- Réduction des émissions de gaz à effet de serre,
- Valorisation des déchets organiques,
- Substitution des energies fossiles.

Ainsi, la digestion anaérobie constitue une technologie clé de la transition énergétique durable(Houben, 2024).

1.5.2. Le digestat: coproduit organique valorisable

Le digestat est le résidu solide et/ou liquide obtenu après digestion anaérobie. Il correspond à la matière organique partiellement stabilisée.

1.5.2.1. Composition et propriétés

Le digestat est riche en:

- Azote (N),
- Phosphore (P),
- Potassium (K),
- Matière organique stabilisée,
- Micronutriments essentiels à la fertilité des sols.

Il constitue un engrais organique de grande valeur agronomique (Czekała, 2022).

De plus, la digestion transforme une partie de l'azote organique en azote minéral assimilable par les plantes, augmentant sa disponibilité(Álvarez-Alonso et al., 2022).

1.5.2.2. Types de digestat

Le digestat peut être séparé en :

- Fraction solide (riche en matière organique),
- Fraction liquide (riche en nutriments solubles).

Cette séparation permet d'adapter son utilisation (fertilisation,compostage, irrigation)(Font-Pomarol et al., 2026).

1.5.2.3. Valorisation agronomique

Le digestat, selon(Martín-Sanz-Garrido et al., 2025), est utilisé comme:

- Biofertilisant,
- Amendement organique,
- Substitut aux engrais chimiques.

Des études récentes (Czekała, 2022) montrent qu'il contribue à :

- Améliorer la structure du sol,
- Augmenter la productivitéagricole,
- Réduire l'usage d'engraisminéraux.

1.5.2.4. Limites et précautions

Malgré ses avantages, certaines contraintes existent :

- Présence possible de pathogènes,
- Accumulation de métaux lourds ou contaminants,
- Risque de surcharge en nutriments.

Ainsi, son utilisation nécessite un contrôle réglementaire et des traitements appropriés(Sobhi et al., 2024).

1.6. Facteurs influençant la production de biogaz

1.6.1. Température

La production de biogaz dépend fortement de la température. Trois plages sont généralement reconnues :

- Psychrophile (< 25°C) : réactions lentes,
- Mésophile (30–40°C) : conditions fiables et stables,
- Thermophile (50–60°C) : production plus rapide mais plus instable(Steiniger et al., 2023) .

Pour notre travail de recherche, nous avons préféré d'utiliser les digesteurs à température mésophile en raison de leur robustesse.

1.6.2. pH

Le pH optimal pour une méthanisation efficace se situe entre 6,8 et 7,5 (Cioabla et al., 2012). Un pH trop bas (hyperacidification) ou trop élevé (ammoniaque libre) inhibe les archées méthanogènes.

1.6.3. Rapport Carbone/Azote (C/N)

Le rapport C/N est crucial. Un rapport optimal permet un métabolisme stable des microorganismes méthanogènes. Si le C/N est trop faible, l'excès d'azote conduit à une accumulation d'ammoniac inhibiteur ; s'il est trop élevé, la carence en azote ralentit le métabolisme bactérien. Des rapports compris entre 20 et 30 sont généralement recommandés(El Nemr et al., 2022).

1.6.4. Charge organique (OLR)

Une charge organique trop élevée surcharge les microorganismes et conduit à une accumulation d'AGV, perturbant le pH et inhibant la méthanogenèse(Park et al., 2018).

1.6.5. Temps de rétention hydraulique (TRH)

Le temps de séjour des substrats dans le digesteur doit être suffisant pour que les étapes biochimiques puissent se dérouler complètement. Un TRH trop court diminue la dégradation et la production de biogaz (Zhu et al., 2025).

1.6.6. Matière sèche (MS)

La matière sèche influence la configuration du système :

< 15 % MS : digestion humide,

> 20 % MS : digestion semi-solide ou sèche (W. Li et al., 2023).

Des substrats très secs (comme les balles de riz) peuvent nécessiter humidification ou dilution pour optimiser les échanges microbien/sous-substrat.

1.6.7. Oligo-éléments et nutriments

Des éléments comme le nickel, le cobalt, le fer ou le sélénium sont essentiels pour l'activité enzymatique des archées méthanogènes (Paulo et al., 2017). Leur absence peut limiter la production de méthane.

1.6.8. Inhibiteurs

Plusieurs substances peuvent inhiber les microorganismes :

- Ammoniac libre,
- Sulfure,
- Métaux lourds,
- résidus chimiques (Yang et al., 2025b).

Le prétraitement et la Co-digestion peuvent réduire ces effets.

1.7. Co-digestion et substrats organiques

1.7.1. Avantages de la Co-digestion

La Co-digestion consiste à méthaniser simultanément deux ou plusieurs substrats organiques afin d'améliorer l'équilibre nutritionnel du mélange et la stabilité du procédé. Elle permet de corriger les carences d'un substrat par les qualités d'un autre, notamment en ajustant le rapport C/N, en diluant les composés toxiques et en améliorant la biodégradabilité globale (Karki et al., 2021).

Plusieurs études ont montré que la Co-digestion augmente :

- La production spécifique de méthane,
- La stabilité microbiologique,
- La dégradation de la matière organique,
- La tolérance aux charges organiques élevées,
- La qualité agronomique du digestat (Zamanzadeh et al., 2017).

Dans le contexte de la gestion des déchets des abattoirs, la Co-digestion avec des résidus agricoles constitue une option particulièrement intéressante car elle réduit les risques de pollution, tout en générant une énergie renouvelable accessible et décentralisée (Meneses Quelal & Pilamunga Hurtado, 2023).

La combinaison panse bovine (riche en azote) et balles de riz (riches en carbone et lignocellulose) représente ainsi un choix pertinent pour optimiser le rapport C/N et améliorer la stabilité méthanogène.

1.7.2. Revue des recherches similaires

Plusieurs travaux récents confirment l'efficacité de la Co-digestion entre résidus animaux et lignocellulosiques.

Par exemple :

- La Co-digestion de la panse des bovins avec des résidus végétaux a montré une augmentation significative du rendement en méthane et une réduction des effets inhibiteurs liés à l'ammoniac (Guo et al., 2021) ;
- Des études sur la Co-digestion de substrats riches en protéines tels que les fumiers, les lisiers animaux et les déchets d'abattoirs avec des résidus lignocellulosiques ont révélé une amélioration du rapport C/N et une meilleure stabilité du procédé(Shamsuddin et al., 2022);
- L'ajout de biomasses végétales telles que les balles de riz, les résidus de maïs ou les feuilles sèches à des déchets animaux comme le fumier bovin, le lisier porcin ou les fientes de volaille a permis de réduire l'acidification et de limiter la production de composés toxiques tels que le sulfure d'hydrogène (Esposito et al., 2016).

Ces résultats soutiennent l'hypothèse selon laquelle la combinaison panse de bovins + balles de riz constitue une stratégie efficace pour optimiser la méthanisation, particulièrement dans les contextes agricoles et ruraux.

CHAPITRE 2 : ETUDE EXPERIMENTALE

2.0. Introduction sur la méthodologie

La méthodologie adoptée dans ce travail vise à évaluer la production de biogaz issue de la Co-digestion de la panse de bovins et des balles de riz. Elle décrit successivement le matériel utilisé, la préparation des substrats, la configuration du digesteur, les conditions expérimentales appliquées ainsi que les méthodes d'analyse.

L'objectif est de disposer d'un protocole rigoureux, reproductible et scientifiquement fiable pour interpréter les résultats obtenus.

2.1. Matériel et équipements

Pour réaliser cette étude sur la production de biogaz par méthanisation de la panse des bovins avec addition de balles de riz, il a été nécessaire de disposer d'un ensemble de matériels et d'équipements adaptés, permettant à la fois la préparation des substrats, le suivi du processus de digestion anaérobie et la caractérisation physico-chimique des échantillons.

Le choix des matériels a été guidé par les besoins expérimentaux spécifiques :

- Assurer l'homogénéisation et la réduction granulométrique des substrats,
- Maintenir des conditions anaérobies et une température stable dans les digesteurs batch,
- Collecter et mesurer le volume de biogaz produit,
- Et réaliser les analyses physico-chimiques fiables au laboratoire, notamment la matière sèche, la matière volatile, les cendres, le carbone organique, l'azote total et le pH.

Tous les équipements et matériels de caractérisation ont été utilisés conformément aux protocoles standards en vigueur à l'Institut des Sciences Agronomiques du Burundi (ISABU) et aux bonnes pratiques de laboratoire, afin d'assurer la sécurité et la fiabilité des résultats expérimentaux.

La section suivante présente la liste complète du matériel et des équipements utilisés, avec le rôle spécifique de chacun dans le cadre de cette étude.

2.1.1. Matériel de caractérisation physico-chimique

1. Balance analytique : Permet la pesée précise des échantillons pour les analyses de matière sèche, cendres, azote et carbone organique.

2. Creusets en porcelaine : Utilisés pour le séchage et la calcination des échantillons (matière sèche et cendres).

3. Capsules métalliques : Alternative aux creusets pour le séchage des échantillons à l'étuve.

4.Étuve réglable à 105 °C : Sert au séchage des échantillons pour la détermination de la matière sèche.

5. Dessiccateur : Permet le refroidissement des échantillons à l'abri de l'humidité avant pesée.

6. Spatule : Utilisée pour manipuler et transférer les échantillons solides.

7. Pinces métalliques : Permettent de manipuler les creusets chauds en toute sécurité.

8. Broyeur : Réduction granulométrique des substrats pour homogénéiser les échantillons.

9. Four à moufle (550 °C): Utilisé pour la calcination afin de déterminer la teneur en cendres.

10. pH-mètre électronique : Mesure précise du pH des substrats avant et après incubation.

11. Électrode combinée : Capteur relié au pH-mètre permettant la mesure électrochimique du pH.

12. Béchers : Contenants pour la préparation des suspensions et solutions.

13. Agitateur magnétique : Assure l'homogénéisation des solutions et suspensions.

14. Appareil de digestion Kjeldahl: Permet la minéralisation de l'azote organique.

15. Bloc digesteur chauffant : Fournit la chaleur nécessaire à la digestion acide.

16. Ballons Kjeldahl: Contenants spécifiques pour la digestion de l'azote.

17. Appareil de distillation Kjeldahl: Permet la distillation de l'ammoniac libéré.

18. Burette graduée : Utilisée pour les titrations lors du dosage de l'azote et du carbone.

19. Erlenmeyers: Utilisés pour les réactions chimiques et les titrations.

20. Hotte aspirante : Assure la sécurité lors de la manipulation des acides concentrés.

2.1.2. Dispositif expérimental de méthanisation

1. Digesteurs anaérobies de type batch : Réacteurs hermétiques utilisés pour la fermentation anaérobie des substrats.

2. Dispositif de collecte du biogaz par déplacement d'eau (seringues, aiguilles) : Permet la mesure du volume de biogaz produit.

2. Thermomètre : Contrôle la température interne du système expérimental.

3. Bain-marie thermostatique : Maintient une température constante (conditions mésophiles).

4. Balance électronique de précision : Utilisée pour peser les substrats avant leur introduction dans les digesteurs.

5. Mortier et pilon : Broyage complémentaire des balles de riz.

6. pH- mètre : mesure le pH.

7.Éprouvettes graduées : Mesure des volumes dans le dispositif de collecte du gaz.

8. Blouses de laboratoire : Protection corporelle contre les projections chimiques.

9. Gants de protection : Protection des mains lors de la manipulation des substrats et réactifs.

10. Masques de protection : Protection contre les vapeurs acides et bioaérosols.

11. Dispositif de mesure du volume de gaz (cylindre inversé gradué): Permet la quantification précise du biogaz produit au cours du temps.

2.2. Préparation des substrats

2.2.1. Panse de bovins

2.2.1.1. Collecte des échantillons



Figure 2.1 : Panse des bovins collectés à l'abattoir de KIGOBE(Auteur)

Les échantillons ont été collectés à l'abattoir de Kigobe en Commune Ntahangwa province Bujumbura, après abattage dans des conditions hygiéniques adéquates.

2.2.1.2. Séparation et préparation initiale

Les gros débris solides (os, gros morceaux de végétaux non digérés) sont retirés manuellement.

Le contenu est homogénéisé à l'aide d'un pilon pour obtenir une fraction représentative de chaque échantillon.

2.2.1.3. Séchage des échantillons

Les échantillons homogénéisés sont ensuite séchés pour l'analyse physico-chimique à l'air libre jusqu'à poids constant pour éviter la dégradation thermique des composés.

Cette étape permet d'éliminer l'eau et de standardiser la base des échantillons pour la comparaison des paramètres chimiques (matière sèche, azote, carbone, cendres, etc.).

2.2.1.4. Broyage et tamisage



Figure 2.2 : Broyage et tamisage de panse des bovins(Auteur)

Après séchage, les échantillons ont été broyés finement à l'aide d'un moulin et ont été passés au tamis pour obtenir une poudre homogène.

Cette étape assure une bonne représentativité pour toutes les analyses physico-chimiques suivantes.

2.2.1.5. Stockage avant analyse

Les échantillons secs et broyés sont conservés dans des contenants hermétiques à l'abri de l'humidité et de la lumière jusqu'au moment de l'analyse.

2.2.2. Balles de riz



Figure 2.3 : Balles de riz collectées à KIREKURA(Auteur)

2.2.2.1. Collecte des échantillons

Les balles de riz sont collectées à Kirekura, en Commune Mutimbuzi Province Bujumbura. Elles sont stockées dans des sacs propres et secs pour éviter toute contamination par la poussière, l'humidité ou des insectes.

2.2.2.2. Nettoyage

Après la collecte, elles sont éliminées des impuretés grossières, comme la poussière, les cailloux ou les grains résiduels, afin de travailler uniquement avec la matière végétale pure.

Cette étape permet d'éviter que des contaminants faussent la caractérisation physico-chimique.

2.2.2.2.1. Séchage

Bien que les balles de riz soient généralement déjà sèches, nous avons pu les sécher légèrement au soleil jusqu'à ce qu'elles atteignent un poids constant, afin d'éliminer toute humidité résiduelle.

Cette étape garantit que les mesures de matière sèche, cendres, carbone, azote**,** soient fiables et comparables.



Figure 2.4 : Broyage de balles de riz (Auteur)

Les balles de riz sèches ont été ensuite broyées en poudre fine à l'aide d'un Pilon.

Ce broyage assure une homogénéité de l'échantillon, ce qui est essentiel pour la précision des analyses physico-chimiques, notamment pour la détermination du carbone, de l'azote et de la matière organique.

2.2.2.2.3. Stockage

Les échantillons broyés sont conservés dans des contenants hermétiques à l'abri de l'humidité et de la lumière jusqu'au moment de l'analyse.

2.3. Description du kit et des dispositifs utilisés pour la digestion anaérobie

Pour l'étude de la digestion anaérobie, un système expérimental complet a été mis en place afin de réaliser la Co-digestion et de quantifier le biogaz produit.

2.3.1. Digesteurs de type batch

Nous avons utilisé cinq digesteurs batch en plastique indépendants de 4 litres chacun, conçus pour le traitement de petites quantités de substrats. Chaque digesteur sert à contenir le mélange de substrats (par exemple Panse de bovins et balles de riz), permettant la fermentation anaérobie en conditions contrôlées.

2.3.2. Système de collecte et de quantification du biogaz

Chaque digesteur est relié à une éprouvette graduée en plastique de 1000 ml, servant à mesurer le volume de biogaz produit.

Ces éprouvettes sont équipées de bouchon septum permettant des prélèvements de gaz avec des seringues et des tuyaux fins et flexibles relient chaque digesteur aux éprouvettes de collecte, assurant le transfert du biogaz sans perte ni contamination.

Ce système permet de quantifier précisément le volume de biogaz produit au fil du temps, en observant le volume de l'eau déplacée dans les éprouvettes graduées.

2.3.3. Dispositif de caractérisation du biogaz

Pour la mesure de la quantité en méthane ou en dioxyde de carbone, nous avons utilisé une éprouvette graduée en plastique de 100 ml pour recueillir de petites portions de gaz et des seringues graduées pour prélever des volumes précis de biogaz à injecter dans cette éprouvette.

2.4. Caractérisation des paramètres physico-chimiques

Les analyses suivantes ont été réalisées :

- Matière sèche,
- Matière volatile,
- Cendre,
- Carbone organique,
- Azote total (pour le calcul du C/N),
- pH au début et en fin d'incubation.

Ces analyses ont été réalisées au laboratoire de l'Institut des Sciences Agronomiques du Burundi (ISABU), en suivant les protocoles standards en vigueur dans ce laboratoire pour l'analyse des substrats organiques. Les méthodes appliquées sont conformes aux procédures analytiques couramment utilisées en agronomie et en sciences environnementales pour la caractérisation des matières organiques destinées à la biométhanisation.

Ces analyses nous ont permis d'évaluer la qualité initiale du substrat, son évolution au cours du processus de méthanisation et d'interpréter les performances de production de biogaz en fonction de ses caractéristiques physico-chimiques.

2.4.1. Détermination de la matière sèche (MS)

Procédure expérimentale

Pour déterminer la matière sèche, nous avons commencé par homogénéiser soigneusement nos échantillons.

Nous avons ensuite pesé environ 5 g d'échantillon sec dans un creuset préalablement lavé, séché et taré.

Nous avons placé les échantillons dans une étuve réglée à 105 °C pendant 24 heures, jusqu'à obtention d'une masse constante. Cette température permet d'éliminer toute l'eau contenue dans l'échantillon sans altérer la matière organique.

Après séchage, nous avons refroidi les creusets dans un dessiccateur afin d'éviter l'absorption d'humidité atmosphérique, puis nous les avons pesés à nouveau.

La matière sèche a été calculée selon la relation : $\%\mathbf{MS}=\frac{m_2-m_0}{m_1-m_0}.\mathbf{100}$

Avec m_0 : Masse du creuset(g) ;

m_1 : Masse du creuset+ échantillon avant séchage à l'étuve ;

m_2 : Masse du creuset+ échantillon à près séchage à l'étuve

Cette étape nous a permis d'évaluer la teneur en eau du substrat, paramètre essentiel dans les procédés de méthanisation.

2.4.2. Détermination des cendres et de la matière volatile (MV)

Procédure expérimentale

Après détermination de la matière sèche, nous avons utilisé les échantillons secs pour mesurer la teneur en cendres.

Nous avons introduit les creusets contenant l'échantillon sec dans un four à moufle réglé à 550 °C pendant 2 heures. À cette température, toute la matière organique est brûlée, ne laissant que la fraction minérale (cendres).

Après calcination, nous avons laissé refroidir les creusets dans un dessiccateur, puis nous avons effectué la pesée finale.

La teneur en cendres a été calculée comme suit : $\mathbf{\%Cendres}=\frac{M_{cendres}}{M_{sec}}\mathbf{\times 100}$

La matière volatile (qui représente principalement la matière organique biodégradable) a été obtenue par différence :$\mathbf{\%MV=\%MS-\%}\boldsymbol{Cendres}$

Ce paramètre est particulièrement important dans notre étude, car il représente la fraction organique susceptible d'être convertie en biogaz.

2.4.3. Détermination du pH

Procédure expérimentale

Réactifs

•Eau distillée

•Solutions tampons pour l'étalonnage

Pour mesurer le pH, nous avons préparé une suspension en mélangeant 10 g d'échantillon avec 100mL d'eau distillée.

Nous avons agité le mélange pendant 5 minutes, puis laissé reposer quelques instants afin de permettre la stabilisation.

Le pH a été mesuré à l'aide d'un pH-mètre préalablement calibré avec des solutions tampons.

Nous avons réalisé cette mesure au début de l'incubation et à la fin du processus de méthanisation.

Le suivi du pH nous a permis d'évaluer la stabilité du processus biologique, car une variation importante du pH peut inhiber l'activité des bactéries méthanogènes.

2.4.4. Détermination de l'azote total (Méthode de Kjeldahl)

Procédure expérimentale

Réactifs :

•Acide sulfurique concentré (H_2SO_4)

•Catalyseur (K_2SO_4 + $CuSO_4$)

•Hydroxyde de sodium ($NaOH$ 40 %)

•Solution d'acide borique (4 %)

•Indicateur coloré

•Solution standard d'HCl (0,1 N)

Pour la détermination de l'azote total, nous avons utilisé la méthode de Kjeldahl.

Nous avons pesé environ 1g d'échantillon sec broyé, puis nous l'avons introduit dans un ballon de digestion avec de l'acide sulfurique concentré et un catalyseur (mélange sulfate de potassium + sulfate de cuivre).

Nous avons procédé à la digestion à chaud jusqu'à obtention d'une solution claire, indiquant la minéralisation complète de la matière organique.

Après digestion :

- Nous avons neutralisé la solution par addition d'une base forte (NaOH).
- Nous avons distillé l'ammoniac libéré.
- L'ammoniac a été recueilli dans une solution d'acide borique.
- Nous avons effectué un titrage avec une solution standard d'acide chlorhydrique.

Le pourcentage d'azote total a été calculé à partir du volume d'acide utilisé lors du titrage.

Cette valeur nous a permis de déterminer le rapport C/N du substrat, paramètre fondamental pour l'optimisation de la méthanisation.

2.4.5. Détermination du carbone organique

Principe de la méthode

Nous avons déterminé la teneur en carbone organique selon la méthode de Walkley et Black, basée sur l'oxydation du carbone organique par une solution de dichromate de potassium ($Cr_2K_2O_7$) en milieu fortement acide (H_2SO_4 concentré).

Le carbone organique présent dans l'échantillon est oxydé en dioxyde de carbone (CO_2), tandis que le dichromate est réduit. L'excès de dichromate non consommé est ensuite dosé par titrage à l'aide d'une solution de sulfate ferreux ($FeSO_4$).

La quantité de dichromate consommée est proportionnelle à la teneur en carbone organique de l'échantillon.

Réactifs :

•Solution de dichromate de potassium ($K_2Cr_2O_7$ 1 N)

•Acide sulfurique concentré (H_2SO_4)

•Solution de sulfate ferreux ($FeSO_4$ 0,5 N)

•Indicateur (ferroïne)

•Eau distillée

Nous avons prélevé 1 g d'échantillon sec et finement broyé, que nous avons introduit dans un erlenmeyer propre et sec.

Nous avons ajouté 10mL de solution de dichromate de potassium (1 N).

Ensuite, nous avons ajouté lentement 20mL d'acide sulfurique concentré, en agitant doucement afin d'assurer un mélange homogène et une bonne oxydation.

Nous avons laissé la réaction se dérouler pendant environ 30 minutes à température ambiante.

Après refroidissement, nous avons ajouté environ 100mL d'eau distillée pour diluer le mélange.

Nous avons ajouté quelques gouttes d'indicateur, puis nous avons titré l'excès de dichromate avec la solution de sulfate ferreux (0,5 N) jusqu'au changement de coloration (virage du violet au vert).

Nous avons réalisé un blanc dans les mêmes conditions, sans échantillon, afin de corriger les calculs.

Calcul du carbone organique

La teneur en carbone organique a été calculée selon la formule :

$$CO(\%)=\frac{(V_b)-(V_e)\times N\times 0{,}003\times 100\times 1{,}33}{m}$$

Où:

V_b= volume de $FeSO_4$ utilisé pour le blanc (mL)

V_e = volume de $FeSO_4$ utilisé pour l'échantillon (mL)

N = normalité du $FeSO_4$

0,003 = équivalent gramme de carbone

1,33 = facteur de correction (car l'oxydation n'est pas totale)

m= masse de l'échantillon (g)

2.4.6. Détermination de la matière organique

Mode opératoire

Nous avons pesé5g d'échantillon et la placer dans un creuset propre et sec.

Nous avons noté la masse initiale du creuset + échantillon **: M_1**

Nous avons ensuite placé le creuset dans un four à moufle préchauffé à 550 °C pendant 4heures, jusqu'à ce que tout le carbone organique soit brûlé.

Nous avons laissé refroidir le creuset dans un dessiccateur pour éviter l'absorption d'humidité et en suite nous l'avons pesé et noté :M_2

Les cendres correspondent à la fraction minérale incombustible, c'est-à-dire la matière inorganique.

Calcul de la matière organique

$$\mathbf{MO\ (\%)=\frac{M_1-M_2}{M_1-M_0}.100}$$

Où:

M_0 = masse du creuset vide

M_1= masse du creuset + échantillon sec avant calcination

M_2 = masse du creuset + cendres après calcination

2.5. Quantités de substrat et Co-substrat utilisées dans la digestion anaérobie et le rapport C/N correspondant

Pour étudier l'effet de l'addition de balles de riz sur la production de biogaz, cinq digesteurs ont été préparés avec des proportions différentes de substrat principal (panse de bovins) et de Co-substrat (balles de riz).

Les rapports C/N ont été déterminés à partir des analyses physicochimiques préalables réalisées à l'ISABU. Les valeurs obtenues sont de 21,6 pour la panse de bovins et de 70,4 pour les balles de riz.

Le rapport C/N du mélange a été déterminé en utilisant une relation de moyenne pondérée des rapports C/N des substrats, en fonction de leurs proportions massiques dans le digesteur (Mata-Alvarez et al., 2014; Li et al., 2011). Cette relation est donnée par l'équation suivante:

$$R = \frac{R_1 X + R_2 Y}{X + Y}$$

Où:

- R est le rapport C/N visé du mélange,
- R_1et R_2 sont les rapports C/N respectifs de la panse de bovins et des balles de riz,
- X et Y représentent les masses correspondantes (kg) de chaque substrat.

Dans le cadre de cette expérimentation, la masse totale de substrat introduite dans chaque digesteur a été fixée à 1 kg, soit:

$$X + Y = 1$$

En remplaçant cette condition dans l'équation précédente, on obtient:

$$R = R_1 X + R_2(1 - X)$$

Après réarrangement, la proportion de chaque substrat peut être déterminée à partir de l'expression suivante:

$$X = \frac{R_2 - R}{R_2 - R_1}$$

Le digesteur 1 a servi de témoin, ne contenant que le substrat principal, tandis que les digesteurs 2 à 5 contiennent des proportions croissantes de balle de riz.

Le tableau ci-dessous présente les quantités exactes utilisées et le rapport C/N correspondant à chaque digesteur.

Tableau 2.1 : Quantités de substrat et Co-substrat utilisées dans les digesteurs et le rapport C/N correspondant

Digesteur	Substrat(g)	Co-substrat(g)	Rapport C/N
D1	1000	0	21,6
D2	967,3	32,7	20
D3	930,4	69,6	25
D4	880	120	75
D5	828	175	30

2.6. Conditions expérimentales

Les principales conditions opératoires étaient :

- Température : régime mésophile (environ 35–40 °C) ;
- Durée d'incubation : (36jours) déterminée en fonction de l'évolution de la production de gaz ;
- Rapport C/N : ajusté à partir des caractéristiques de la panse et des balles de riz ;
- pH initial et final: (tableau 3.5)
- Teneur en eau : adaptée pour assurer une bonne fermentation ;
- Agitation : légère et périodique afin d'éviter la décantation des matières.

Des essais comparatifs ont été réalisés :

- Panse bovine seule,
- Panse bovine + balles de riz avec différents ratios.

2.7. Protocole expérimentale de la digestion anaérobie

La digestion anaérobie est un procédé biologique complexe permettant la dégradation de la matière organique en absence d'oxygène, conduisant à la production de biogaz riche en méthane. Dans cette étude, l'objectif est d'optimiser la production de biogaz par Co-digestion de la panse de bovins et des balles de riz, en comparant différents mélanges afin de déterminer le rapport C/N le plus favorable. Plusieurs travaux récents ont montré que l'association de substrats complémentaires améliore significativement les performances méthanogènes grâce à un meilleur équilibre nutritionnel et à une synergie microbienne (Martín-Sanz-Garrido et al., 2025).

2.7.1. Chargement des digesteurs



Figure 2.5: Montage de kit d'expérimentation (Auteur)

Après la préparation des substrats, les mélanges obtenus ont été introduits dans cinq digesteurs de type batch d'une capacité de 4 litres chacun. Chaque digesteur a été chargé avec une quantité définie de substrat en respectant les proportions établies pour les essais comparatifs, notamment un digesteur témoin contenant uniquement la panse de bovins et les autres contenant des mélanges de panse et de balles de riz à différents ratios (**tableau 2.**). Une attention particulière a été accordée à ne pas remplir complètement les digesteurs afin de laisser un espace libre destiné à l'accumulation du biogaz. Après le chargement, les digesteurs ont été fermés hermétiquement pour garantir des conditions strictement anaérobies et éviter toute fuite de gaz (Kainthola et al., 2019).

2.7.2. Mise en place du système de collecte du biogaz

Chaque digesteur a été relié à une éprouvette graduée de 1000 mL à l'aide de tuyaux flexibles étanches, constituant ainsi un système de mesure du biogaz par déplacement d'eau. Ce dispositif permet de quantifier le volume de biogaz produit au cours du temps en observant le volume d'eau déplacé dans les éprouvettes. Ce type de montage est largement utilisé dans les études expérimentales de digestion anaérobie en raison de sa simplicité, de sa fiabilité et de sa précision (Habara et al., 2025).

2.7.3. Conditions d'incubation

Les digesteurs ont été placés dans des conditions mésophiles, avec une température maintenue entre 35 et 40 °C, favorable à l'activité des micro-organismes méthanogènes. La durée d'incubation était 36 jours, période généralement suffisante pour observer la production de biogaz dans les essais en mode batch (Holliger et al., 2016). Le pH initial des mélanges a été mesuré avant incubation et se situait dans une plage comprise entre 6,74 et 6,90, ce qui correspond à la zone optimale pour la digestion anaérobie, et après incubation en raison du type de digesteur utilisé. Une agitation légère et périodique a été réalisée afin d'éviter la décantation des matières et d'améliorer le contact entre les micro-organismes et le substrat, favorisant ainsi la dégradation de la matière organique (Chincoun & Bagan, 2025).

2.7.4. Suivi de la production de biogaz

La production de biogaz a été suivie quotidiennement tout au long de la période d'incubation. Le volume de gaz produit a été mesuré à l'aide du système de déplacement d'eau, en relevant régulièrement le volume d'eau déplacé dans les éprouvettes graduées. Ces mesures ont permis de suivre l'évolution de la production de biogaz en fonction du temps et de comparer les performances des différents digesteurs. Cette méthode de mesure est reconnue comme fiable pour les essais de laboratoire et largement utilisée dans les études récentes (Hajjaji et al., 2010).

2.7.5. Détermination de la composition du biogaz

La composition du biogaz produit a été déterminée par une méthode volumétrique basée sur l'absorption du dioxyde de carbone. Un volume de 50ml de biogaz a été prélevé à l'aide d'une seringue graduée, puis introduit dans une éprouvette contenant une solution d'hydroxyde de potassium (KOH). Le CO_2 présent dans le biogaz est absorbé par la solution, tandis que le méthane reste non dissous. La différence entre le volume initial et le volume final permet ainsi de déterminer la proportion de CO_2, et par complémentarité celle du CH_4. Cette technique constitue une méthode classique et fiable pour l'analyse de la composition du biogaz en laboratoire (Rusanowska et al., 2023).

CHAPITRE 3 : PRÉSENTATION, INTERPRÉTATION ET DISCUSSION DES RÉSULTATS

Ce chapitre présente les résultats obtenus lors des essais de digestion anaérobie réalisés en laboratoire, visant à étudier l'effet de la Co-digestion de la panse des bovins et des balles de riz sur la production de biogaz.

Les résultats sont organisés en trois parties principales :

- La présentation des résultats (données expérimentales),
- Leur interprétation (analyse scientifique),
- Et la discussion (mise en relation avec la littérature).

3.1. Présentation des résultats

3.1.1. Résultats de caractérisation physico-chimique des substrats

Les analyses physico-chimiques réalisées à l'Institut des Sciences Agronomiques du Burundi (ISABU) sur la panse de bovins et les balles de riz ont permis de déterminer la matière sèche, la matière organique, et le rapport C/N de chaque substrat. Ces paramètres constituent une base essentielle pour ajuster les proportions de substrat et de Co-substrat dans les digesteurs et évaluer leur potentiel de production de biogaz (Tableaux 3.1 et 3.2).

Tableau 3.1 : Résultats de la caractérisation physicochimique de la panse de bovins

Paramètres	Valeur obtenue en%
Matière sèche (MS)	92,52
Matière organique (MO)	69,8
Teneuren eau	7,48
Cendres	30,21
Carbone organique (CO)	29,6
Azote total(N)	1,37
C/N	21,6:1

Tableau 3.2: Résultats de la caractérisation physicochimique de balles de riz

Paramètre	Valeur obtenue en%
Matière sèche	93
Matière organique	79
Teneuren eau	7%
Cendres	15
Carbone organique	33,6
Azotetotal	0,477
C/N	70,4:1

3.1.2. Résultats de production journalière de biogaz et de méthane

Les volumes journaliers de biogaz et de méthane produits par les cinq digesteurs ont été suivis quotidiennement pendant 36 jours. Ces mesures permettent d'observer l'évolution de la production au fil du temps, de comparer l'efficacité des différents rapports C/N et proportions de Co-substrat, et d'identifier les phases clés de la digestion anaérobie (Tableau 3.3).

Tableau 3.3 : Résultats journaliers de Production de Biogaz (36 Jours)

Jour	D1 Biogaz (mL)	D1 CH4(mL)	D2 Biogaz(mL)	D2 CH4(mL)	D3 Biogaz(mL)	D3 CH4(mL)	D4 Biogaz(mL)	D4 CH4(mL)	D5 Biogaz(mL)	D5 CH4(mL)	Température
1	70	28	80	32	75	30	85	51	75	45	35
2	110	50	130	59	120	54	130	65	115	52	35
3	160	80	190	95	170	85	180	90	170	85	35.5
4	220	121	260	143	240	152	250	125	240	132	35
5	290	168	330	192	310	180	320	190	310	180	35.7
6	360	216	410	246	390	254	400	240	390	234	36
7	430	258	490	294	470	292	480	285	470	282	36.4
8	800	480	950	706	1120	782	560	350	900	600	35
9	908	504	1107	865	1250	899	1206	850	1002	702	35
10	730	430	1026	685	1288	990	1289	910	900	400	36
11	720	460	1300	800	1356	1013	1350	960	850	550	37
12	900	500	890	50	1385	1060	1204	860	840	546	36.5
13	830	480	910	600	1390	1001	1288	920	840	598	36.8
14	880	520	960	640	1392	1000	1200	880	940	576	36
15	920	610	990	660	1405	1010	1000	720	970	650	35
16	880	535	950	630	1420	1025	1010	680	930	320	34.5
17	820	500	890	590	1420	1025	1000	650	870	300	34.8
18	750	425	820	540	1308	1001	1012	640	800	520	35
19	680	420	750	495	1010	740	850	560	730	470	36

20	600	350	670	435	820	620	660	460	650	410	37
21	420	200	500	350	560	394	500	340	400	390	36
22	450	283	500	325	500	320	480	300	420	300	36.5
23	380	237	420	273	420	300	400	250	320	200	36.8
24	320	208	350	215	330	228	300	190	300	215	35
25	260	159	290	189	290	195	270	160	250	175	35
26	210	127	230	150	220	153	200	120	220	140	36
27	170	90	180	117	170	120	150	90	170	110	36.4
28	120	70	140	91	150	104	100	60	90	56	36.5
29	90	49	100	65	95	65	90	48	95	62	36.4
30	60	32	70	46	65	43	50	40	65	42	35
31	54	30	58	39	63	41	60	47	56	38	37.2
32	51	30	55	37	60	40	57	42	53	36	38
33	46	27	50	34	55	36	52	38	48	33	36
34	43	25	47	32	52	35	49	35	45	31	36.5
35	42	22	46	31	51	35	48	34	44	30	35
36	42	22	46	31	51	35	48	34	44	30	35.5

Afin de mieux visualiser l'évolution de la production journalière de biogaz, les données sont représentées graphiquement à la figure 3.1 et à la figure 3.2

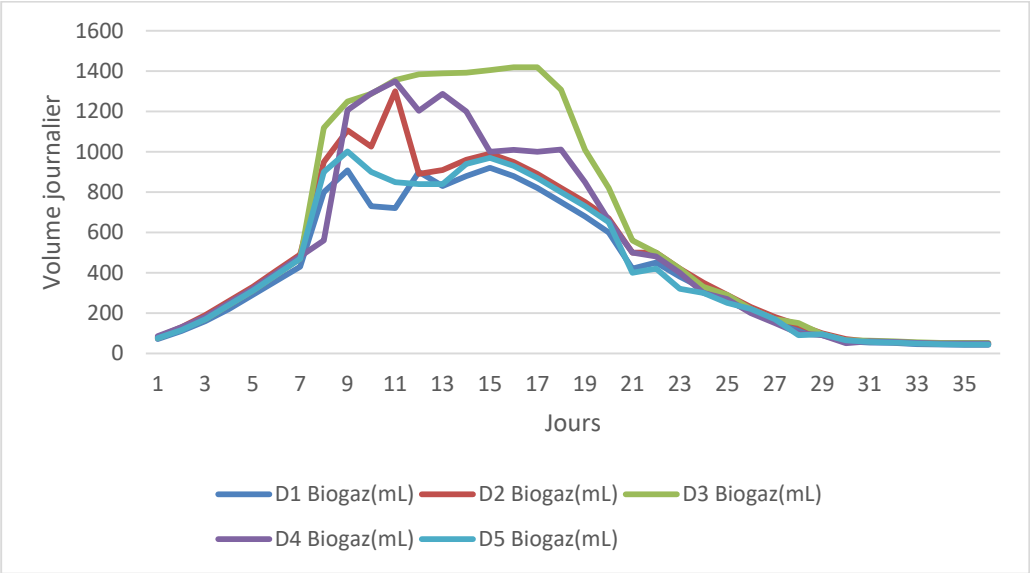


Figure 3.1 : Courbes de cinétique de production journalière de biogaz en fonction du temps

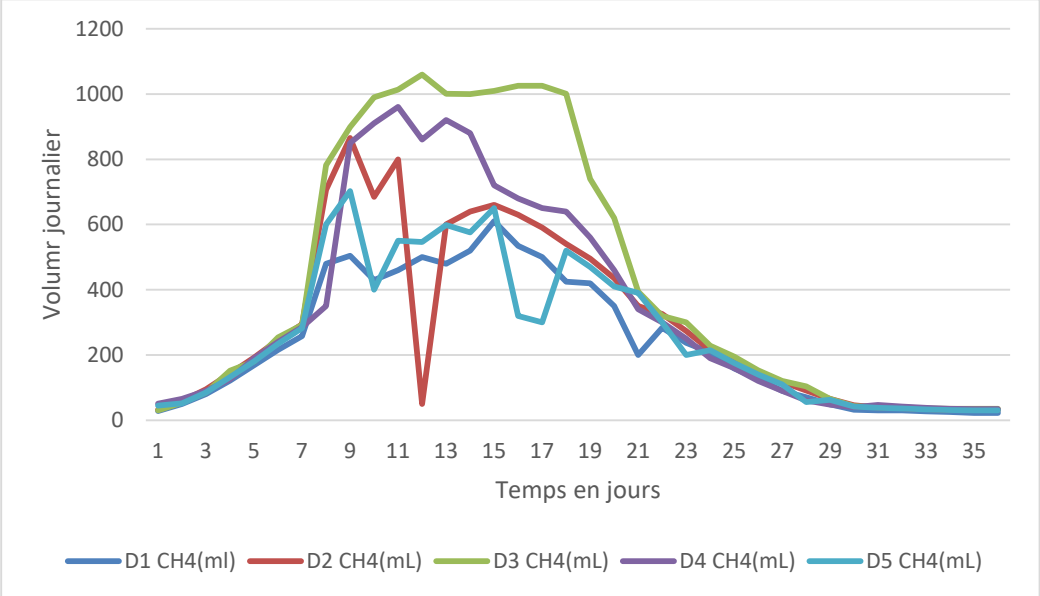


Figure 3.2 : Courbes de cinétique de production journalière de $CH4$ en fonction du temps

3.1.3. Résultats de production cumulée de biogaz et de méthane

La production cumulée de biogaz et de méthane a été calculée pour évaluer la performance globale de chaque digesteur sur l'ensemble de la période expérimentale. Ces résultats mettent en évidence l'effet du rapport C/N et de la proportion de Co-substrat sur la quantité totale de gaz produit et sur le rendement méthanique (Tableau 3.4).

Tableau 3.4 : Production cumulée de biogaz et de méthane par digesteur sur 36jours

Jour	D1 Biogaz(mL)	D1 CH4(mL)	D2 Biogaz(mL)	D2 CH4(mL)	D3 Biogaz(mL)	D3 CH4(mL)	D4 Biogaz(mL)	D4 CH4(mL)	D5 Biogaz(mL)	D5 CH4(mL)
1	70	28	80	32	75	30	85	51	75	45
2	180	78	210	91	195	84	215	116	190	97
3	340	158	400	186	365	169	395	206	360	182
4	560	279	660	329	605	321	645	331	600	314
5	850	447	990	521	915	501	965	521	910	494
6	1210	663	1400	767	1305	755	1365	761	1300	728
7	1640	921	1890	1061	1775	1047	1845	1046	1770	1010
8	2440	1401	2840	1767	2895	1829	2405	1396	2670	1610
9	3348	1905	3947	2632	4145	2728	3611	2246	3672	2312
10	4078	2335	4973	3317	5433	3718	4900	3156	4572	2712
11	4798	2795	6273	4117	6789	4731	6250	4116	5422	3262
12	5698	3295	7163	4167	8174	5791	7454	4976	6262	3808
13	6528	3775	8073	4767	9564	6792	8742	5896	7102	4406
14	7408	4295	9033	5407	10956	7792	9942	6776	8042	4982
15	8328	4905	10023	6067	12361	8802	10942	7496	9012	5632
16	9208	5440	10973	6697	13781	9827	11952	8176	9942	5952
17	10028	5940	11863	7287	15201	10852	12952	8826	10812	6252
18	10778	6365	12683	7827	16509	11853	13964	9466	11612	6772
19	11458	6785	13433	8322	17519	12593	14814	10026	12342	7242

20	12058	7135	14103	8757	18339	13213	15474	10486	12992	7652
21	12478	7335	14603	9107	18899	13607	15974	10826	13392	8042
22	12928	7618	15103	9432	19399	13927	16454	11126	13812	8342
23	13308	7855	15523	9705	19819	14227	16854	11376	14132	8542
24	13628	8063	15873	9920	20149	14455	17154	11566	14432	8757
25	13888	8222	16163	10109	20439	14650	17424	11726	14682	8932
26	14098	8349	16393	10259	20659	14803	17624	11846	14902	9072
27	14268	8439	16573	10376	20829	14923	17774	11936	15072	9182
28	14388	8509	16713	10467	20979	15027	17874	11996	15162	9238
29	14478	8558	16813	10532	21074	15092	17964	12044	15257	9300
30	14538	8590	16883	10578	21139	15135	18014	12084	15322	9342
31	14592	8620	16941	10617	21202	15176	18074	12131	15378	9380
32	14643	8650	16996	10654	21262	15216	18131	12173	15431	9416
33	14689	8677	17046	10688	21317	15252	18183	12211	15479	9449
34	14732	8702	17093	10720	21369	15287	18232	12246	15524	9480
35	14774	8724	17139	10751	21420	15322	18280	12280	15568	9510
36	14816	8746	17185	10782	21471	15357	18328	12314	15612	9540

La figure 3.3, 3.4 et la figure 3.5 illustrent la cinétique de production cumulée de biogaz et de méthane au cours des 36 jours d'expérimentation, permettant d'évaluer le rendement méthanique des digesteurs.

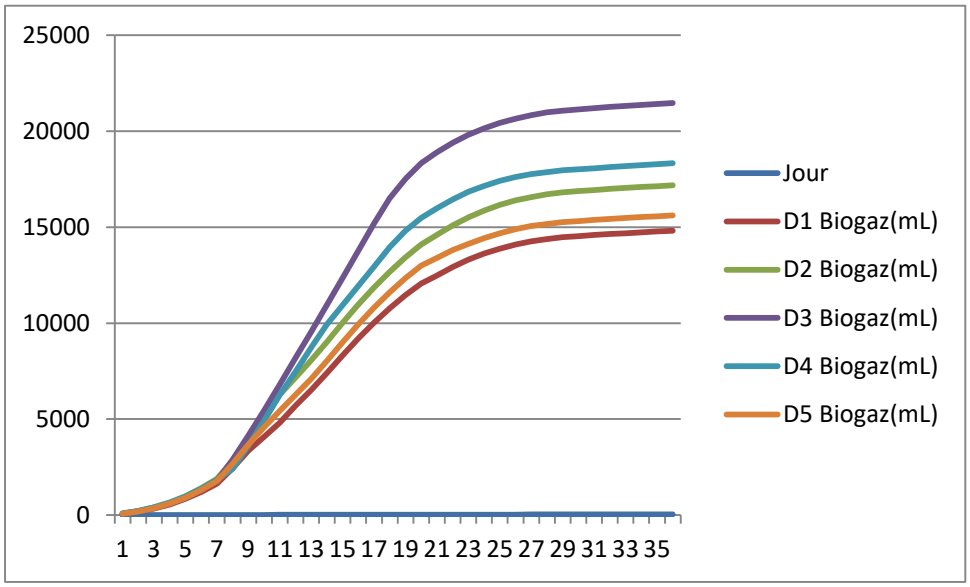


Figure 3.3 : Courbes de cinétique de production cumulée de biogaz en fonction du temps

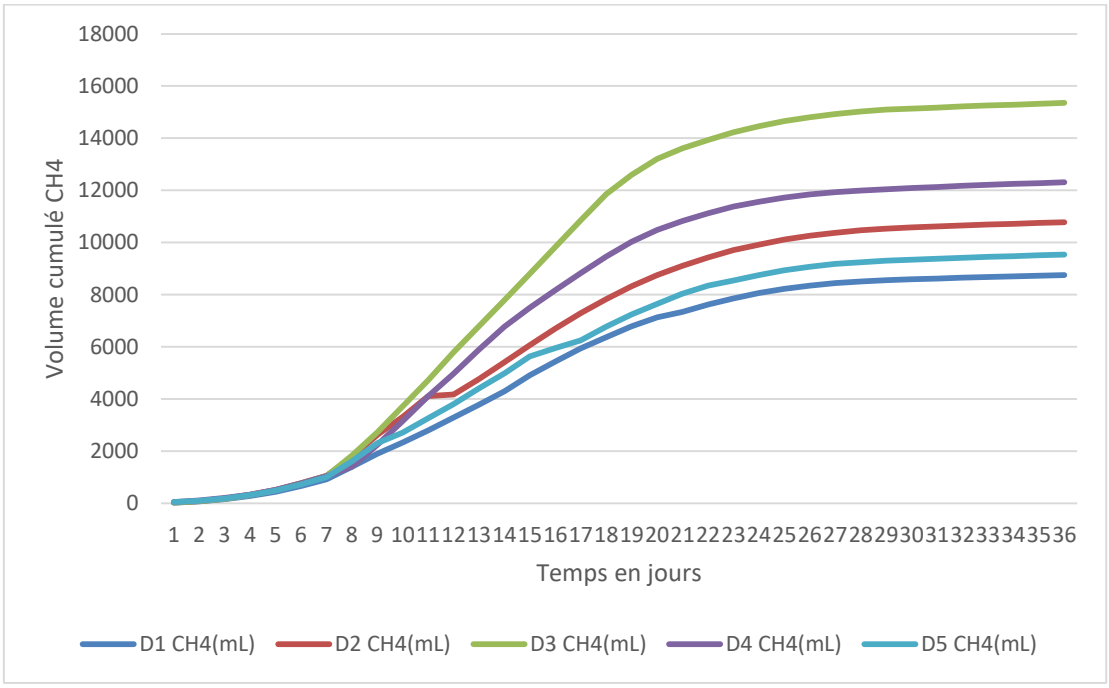


Figure 3.4 : Courbes de cinétique de production cumulée de $CH4$ en fonction du temps

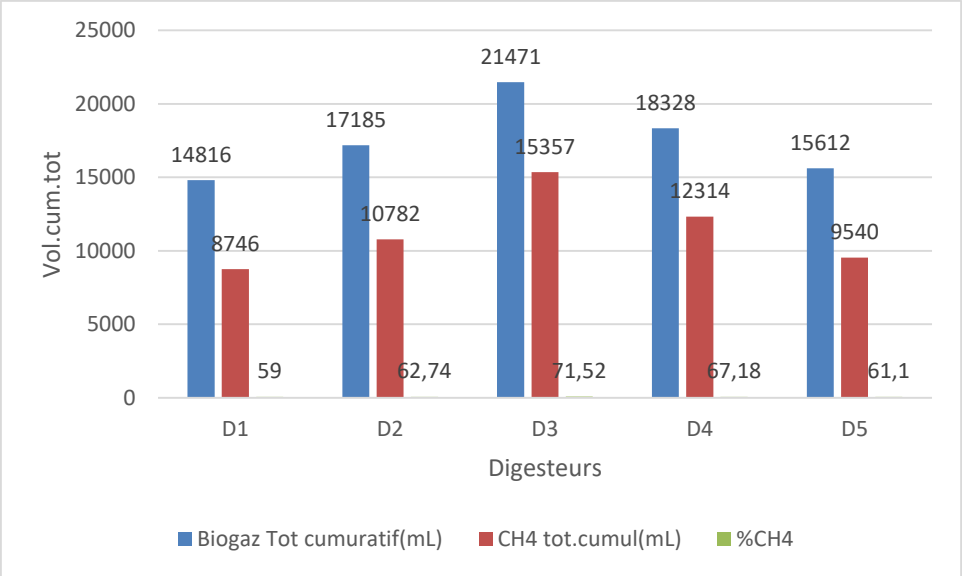


Figure 3.5 : Courbes de proportion de méthane (%) dans le biogaz au fil des 36 jours pour cinq digesteurs batch

3.1.4. Évolution du pH

Le suivi du pH au début et à la fin de l'expérimentation permet d'évaluer la stabilité acido-basique des digesteurs. Ces mesures sont importantes car un pH trop bas ou trop élevé peut inhiber l'activité méthanogène et réduire l'efficacité de la digestion (Tableau 3.5).

Tableau 3.5 : Valeurs mesurées du pH au début et à la fin de l'expérimentation

Digesteur	pH avant expérimentation	pH après expérimentation
D1	6,88	6,5
D2	6,9	6,4
D3	6,75	6,63
D4	6,76	6,8
D4	6,74	6,4

Ce point de présentation des résultats a permis de mettre en évidence, de manière descriptive et objective, les principales tendances issues des expérimentations de digestion anaérobie. Les données obtenues, qu'il s'agisse de la caractérisation physico-chimique des substrats, des productions journalières et cumulées de biogaz et de méthane, ainsi que de l'évolution du pH, montrent des variations significatives entre les différents digesteurs. Ces résultats soulignent notamment l'influence déterminante du rapport C/N et de la proportion de Co-substrat sur les performances des systèmes étudiés. Toutefois, à ce stade, aucune interprétation approfondie n'a été effectuée.

Il convient dès lors d'analyser ces observations à la lumière des principes scientifiques de la méthanisation afin d'en dégager les mécanismes explicatifs, ce qui fera l'objet de la section suivante consacrée à l'interprétation des résultats.

3.2. Interprétation des résultats

3.2.1. Cinétique de production de biogaz

La production de biogaz au cours de la digestion anaérobie est un processus dynamique, caractérisé par une évolution temporelle du volume de gaz produit. L'analyse de la cinétique de production permet de comprendre la performance des digesteurs, d'identifier les phases de dégradation des substrats, et d'évaluer l'influence des paramètres clés tels que le type de substrat, le Co-substrat et le rapport carbone/azote (C/N) sur l'efficacité de la méthanisation. Dans cette étude, cinq digesteurs batch ont été suivis quotidiennement sur une période de 36 jours, avec des proportions variables de panse bovine et de balles de riz comme Co-substrat, et des rapports C/N allant de 20 à 30.

L'analyse des données cumulées montre que la production de biogaz pour tous les digesteurs suit une cinétique typique d'un digesteur batch, caractérisée par quatre phases principales :

- **Phase de latence** (jours 1–3) : Au début de l'incubation, le volume de biogaz est relativement faible pour tous les digesteurs (D1 : 70mL, D2 : 80ml, D3 : 75mL, D4 : 85ml et D5 : 75ml le jour 1). Cette phase correspond à l'adaptation des micro-organismes à la matrice organique et au démarrage de l'hydrolyse et de l'acidogenèse.
- **Phase exponentielle ou de production rapide** (jours 4–10): Cette phase est marquée par une augmentation rapide du volume de biogaz. Par exemple, D3 passe de 195mL au jour 2 à 5433mL au jour 10. La vitesse de production maximale est observée autour des jours 8–10, correspondant au moment où les substrats facilement dégradables sont consommés rapidement par les micro-organismes anaérobies.
- **Phase de plateau ou stationnaire** (jours 11–25): Après le pic de production, le volume de biogaz continue d'augmenter mais à un rythme plus lent, indiquant que la majorité des substrats facilement dégradables ont été consommés. Les volumes cumulés pour D3, par exemple, augmentent de 6789mL le jour 11 à 20439mL le jour 25, montrant que la dégradation se poursuit mais à vitesse réduite.
- **Phase de décroissance (**jours 26–36): La production quotidienne devient très faible, avec un plateau atteignant environ 21471mL pour D3 et 14816mL pour D1 le jour 36.

Cette phase indique que le substrat est presque épuisé et que l'activité microbienne résiduelle produit un biogaz marginal.

L'ensemble des digesteurs présente donc des courbes sigmoïdes classiques, avec des pics de production décalés selon le type de substrat et le rapport C/N.

3.2.2. Comparaison entre digesteurs et influence du Co-substrat pour le biogaz

L'analyse des volumes cumulés montre des différences significatives entre les digesteurs:

- D3 (substrat de masse 930,4g et Co-substrat de masse 69,6g, et dont C/N = 25) produit le volume de biogaz le plus élevé (≈21471mL), suggérant un rapport C/N proche de l'optimum pour la digestion anaérobie, favorisant la croissance microbienne et la production rapide de gaz.
- D4 (substrat de masse 880g et Co-substrat de masse 120g, et de C/N = 27.5) présente également une production élevée (≈18328mL), ce qui traduit une amélioration de la production en présence de Co-substrat bien que légèrement inférieure à celle observée à D3.
- **D1** (substrat seul de 1 kg, C/N = 21,6) et **D2** (substrat de 967,3 g, C/N = 20) présentent des volumes cumulés plus faibles (respectivement 14816mL et 17185mL), ce qui met en évidence une production moins importante en absence ou en faible proportion de Co-substrat.
- **D5** (substrat de 828 g et Co-substrat de 172 g, avec un C/N = 30) présente une production inférieure à celle de D3 et D4, ce qui pourrait s'expliquer par un rapport C/N plus élevé, susceptible de ralentir la dégradation de la matière organique.

3.2.3. Influence de la température

La température des digesteurs est relativement stable (35–37 °C), ce qui correspond à la plage mésophile optimale pour la digestion anaérobie(Zhang et al., 2024). Les variations mineures n'ont pas empêché la progression normale de la cinétique, et les pics de production coïncident souvent avec les jours légèrement plus chauds (D3: 36 °C au jour 8), favorisant l'activité enzymatique et la vitesse de méthanisation.

3.2.4. Cinétique de production de méthane (CH_4)

La méthanisation est un processus biologique où une partie du biogaz produit est constituée de méthane (CH_4), le principal composant énergétique. L'analyse de la cinétique de production de CH_4 est essentielle pour évaluer le rendement méthanique des digesteurs, comparer l'efficacité de différentes formulations de substrat et Co-substrat, et identifier le rapport optimal C/N pour maximiser la production d'énergie renouvelable.

Dans cette étude, cinq digesteurs batch ont été suivis sur 36 jours, avec des proportions variables de panse bovine et de balles de riz, et des rapports C/N allant de 20 à 30.

L'analyse des volumes cumulés de CH_4 révèle une cinétique très similaire à celle du biogaz total, avec toutefois quelques points spécifiques :

- **Phase initiale de latence** (jours 1–3) : Les volumes de CH_4 sont faibles au démarrage (D1 : 28 mL, D3 : 30 mL le jour 1), reflétant le temps nécessaire à la colonisation et à l'adaptation des méthanogènes dans le substrat.
- **Phase exponentielle** (jours 4–10): La production de méthane augmente rapidement, D3 passant de 84mL le jour 2 à 3718mL le jour 10. La vitesse maximale de production de CH_4 coïncide avec la phase exponentielle du biogaz total, confirmant que la conversion du CO_2 et des acides gras volatils en méthane est optimale pendant cette période.
- **Phase stationnaire** (jours 11–25): Après le pic de production, la vitesse d'augmentation ralentit. Par exemple, D3 atteint 8802mL le jour 15 et 14650mL le jour 25, indiquant que la majorité des substrats facilement dégradables ont été consommés, mais que l'activité microbienne continue de produire du méthane à un rythme modéré.
- **Phase de décroissance** (jours 26–36).
  Les volumes cumulés de CH_4 se stabilisent vers la fin de l'expérience (D3 : 15357 mL le jour 36), correspondant à la consommation quasi-totale du substrat et à une production résiduelle de méthane.

Les courbes cumulées montrent un profil sigmoïde typique pour la production de méthane, avec un léger décalage temporel par rapport à la production de biogaz total dû à la conversion enzymatique spécifique des acides gras en CH_4 par les méthanogènes.

3.2.5. Comparaison entre digesteurs et influence du C/N pour le méthane

La production de méthane (CH_4) varie sensiblement en fonction du rapport C/N et de la proportion de Co-substrat :

- **D3** (C/N = 25) présente la production cumulée de CH_4 la plus élevée (≈ 15357mL), ce qui suggère que ce rapport C/N est favorable à la production de méthane.
- **D4** (C/N = 27,5) enregistre également une production importante (≈ 12314mL), indiquant une performance élevée en présence de Co-substrat, bien que légèrement inférieure à celle de D3.
- **D1** (C/N = 21,6) et **D2** (C/N = 20) présentent des productions plus faibles (respectivement ≈ 8746mL et 10782mL), traduisant une efficacité méthanogène plus limitée.
- **D5** (C/N = 30) produit un volume de méthane inférieur (≈ 9540mL) à celui de D3, ce qui pourrait être lié à un rapport C/N plus élevé, influençant la dynamique de production de CH_4.

Ces résultats mettent en évidence une variation du rendement méthanique en fonction des conditions expérimentales, notamment du rapport C/N et de la proportion de Co-substrat.

3.2.6. Rendement méthanique

La proportion de méthane dans le biogaz varie selon les digesteurs, traduisant des différences de rendement méthanique en fonction des conditions expérimentales.

- **D3** (C/N = 25) présente le rendement méthanique le plus élevé, avec une proportion d'environ **71 %** de CH_4, indiquant une conversion importante du biogaz en méthane.
- **D4** (C/N = 27,5) produit également un volume élevé de biogaz, mais avec une proportion de méthane inférieure à celle de D3, traduisant un rendement méthanique légèrement réduit.
- **D1** (C/N = 21,6) et **D2** (C/N = 20) présentent des proportions de méthane plus faibles, indiquant une conversion moins importante du biogaz en CH_4.
- **D5** (C/N = 30) montre un rendement intermédiaire, avec une proportion de méthane comprise entre celles des digesteurs les moins et les plus performants.

Ces résultats indiquent une variation du rendement méthanique selon les digesteurs, en relation avec le rapport C/N et la proportion de Co-substrat.

3.3. Discussion des résultats

Contrairement à la section précédente consacrée à la présentation et à l'interprétation des résultats expérimentaux, cette partie vise à confronter les résultats obtenus aux données de la littérature scientifique récente, afin d'en vérifier la cohérence et d'en approfondir l'analyse.

3.3.1. Influence du rapport C/N sur la production de biogaz et de méthane

Les résultats obtenus montrent que le digesteur D3 (C/N = 25) présente les meilleures performances en termes de production de biogaz et de méthane. Cette observation est en accord avec plusieurs études récentes qui soulignent l'importance du rapport carbone/azote dans la digestion anaérobie.

Selon (Martín-Sanz-Garrido et al., 2025), un rapport C/N équilibré permet d'optimiser l'activité microbienne en évitant l'accumulation d'ammoniac dans le cas d'un excès d'azote, ou une limitation de la croissance microbienne en cas d'excès de carbone. De même,(P. Li et al., 2024)indiquent que la plage optimale du rapport C/N se situe entre 20 et 30, avec un optimum proche de 25, ce qui correspond parfaitement aux résultats observés dans cette étude.

Par ailleurs, les performances plus faibles des digesteurs D1 et D2 (C/N bas) peuvent être expliquées par une inhibition ammoniacale, phénomène largement décrit par(Zhu et al., 2025) . À l'inverse, la diminution des performances observée dans le digesteur D5 (C/N = 30) peut être liée à une limitation en azote, comme le rapportent (Ma et al., 2020).

Ces résultats sont cohérents avec la littérature et suggèrent que l'optimisation du rapport C/N constitue un levier essentiel pour améliorer la production de biogaz et de méthane.

3.3.2. Effet de la Co-digestion sur la production de biogaz

L'amélioration des performances observée dans les digesteurs contenant un mélange de panse bovine et de balles de riz confirme l'intérêt de la Co-digestion.

Selon (Álvarez-Alonso et al., 2022) et des travaux plus récents de (Zhu et al., 2025), la Co-digestion permet d'obtenir un effet synergique grâce à:

- L'équilibre des nutriments;
- L'amélioration de la biodégradabilité ;
- La stabilisation du processus biologique.

Dans cette étude, les balles de riz, riches en carbone, ont permis de corriger le déséquilibre nutritif de la panse bovine, relativement riche en azote. Ce résultat est cohérent avec les observations de (W. Li et al., 2023), qui montrent que l'ajout de résidus lignocellulosiques améliore la stabilité du digesteur et favorise la production de méthane.

Cependant, une diminution des performances est observée lorsque la proportion de co-substrat devient trop élevée (cas du digesteur D5). Ce phénomène a également été signalé par (Martín-Sanz-Garrido et al., 2025), qui expliquent que la présence excessive de matériaux lignocellulosiques peut ralentir la biodégradation en raison de la faible dégradabilité de la lignine.

3.3.3. Cinétique de production et comportement du système

Les courbes obtenues présentent un profil sigmoïde typique des systèmes de digestion anaérobie en mode batch, caractérisé par une succession de phases biologiques.

Ce comportement est largement documenté dans la littérature. Selon (Alengebawy et al., 2024) et Batstone et al. (2015), la digestion anaérobie repose sur quatre étapes principales: hydrolyse, acidogénèse, acétogénèse et méthanogénèse.

La phase de latence observée correspond à l'adaptation des micro-organismes, tandis que la phase exponentielle traduit une activité biologique intense liée à la dégradation des composés facilement biodégradables. La phase stationnaire et la phase de décroissance indiquent l'épuisement progressif du substrat, comme l'ont également rapporté (Kainthola et al., 2019).

Ainsi, la cinétique observée dans cette étude est en cohérence avec les modèles classiques de digestion anaérobie.

3.3.4. Influence de la température

La plage de température enregistrée (35–40 °C) correspond aux conditions mésophiles, reconnues comme optimales pour la digestion anaérobie.

Selon (Lian et al., 2025), la digestion mésophile offre une meilleure stabilité du processus et une activité enzymatique efficace. De plus, Zhao et al. (2018) indiquent que de faibles variations de température dans cette plage n'affectent pas significativement la production de biogaz.

Les résultats obtenus dans cette étude sont cohérents avec ces observations, la stabilité thermique ayant permis une production régulière sans perturbation majeure.

3.3.5. Rendement méthanique et qualité du biogaz

Le rendement méthanique élevé observé pour le digesteur D3 (≈71 %) est conforme aux valeurs rapportées dans la littérature pour un biogaz de bonne qualité.

Selon (El Nemr et al., 2022), la teneur en méthane dans le biogaz varie généralement entre 50 et 75 %. Un rendement élevé traduit une conversion efficace de la matière organique en méthane, ce qui reflète une bonne activité des micro-organismes méthanogènes.

Ces résultats confirment que la co-digestion et l'optimisation du rapport C/N permettent d'améliorer non seulement la quantité de biogaz produit, mais aussi sa qualité énergétique.

3.3.6. Implications énergétiques et environnementales

Les résultats obtenus mettent en évidence le potentiel de la digestion anaérobie comme technologie de valorisation des déchets organiques.

Selon Kothari et al. (2021), la méthanisation contribue à:

- La production d'énergie renouvelable;
- La réduction des émissions de gaz à effet de serre ;
- La gestion durable des déchets.

Dans cette étude, la valorisation de la panse bovine et des balles de riz illustre une approche d'économie circulaire, permettant de transformer des déchets en ressource énergétique.

Ces résultats sont particulièrement pertinents dans le contexte des pays en développement, où la gestion des déchets et l'accès à l'énergie constituent des enjeux majeurs.

En résumé, les résultats expérimentaux obtenus sont globalement en accord avec les données de la littérature scientifique récente. Ils confirment que:

- Le rapport C/N est un facteur déterminant dans la production de biogaz ;
- La Co-digestion améliore significativement les performances des digesteurs ;
- La cinétique observée correspond aux modèles classiques de digestion anaérobie ;
- La méthanisation constitue une solution efficace de valorisation énergétique des déchets organiques.

Toutefois, certaines limites doivent être prises en compte, notamment les conditions expérimentales en mode batch et l'échelle de laboratoire, qui peuvent influencer la transposition des résultats à l'échelle industrielle.

Au regard des résultats obtenus et de leur confrontation avec la littérature scientifique, l'hypothèse formulée au début de cette étude, selon laquelle l'ajout de balles de riz améliore l'efficacité de la méthanisation de la panse des bovins en optimisant le rapport C/N, est globalement vérifiée.

En effet, les performances observées pour le digesteur présentant un rapport C/N proche de 25 confirment l'importance de l'équilibre nutritionnel dans l'optimisation du processus de digestion anaérobie.

CONCLUSION GENERALE ET SUGGESTIONS

1. Conclusion générale

Le présent travail avait pour objectif d'évaluer la production de biogaz par digestion anaérobie de la panse des bovins, en utilisant les balles de riz comme Co-substrat, afin d'optimiser le rendement méthanique et d'analyser le potentiel énergétique du procédé. L'étude a été menée sur une période de 36 jours à l'aide de cinq digesteurs batch fonctionnant en régime mésophile, avec des rapports carbone/azote (C/N) variant de 20 à 30.

Les résultats obtenus ont montré que la production de biogaz suit une cinétique sigmoïde classique, comprenant une phase de latence, une phase exponentielle, une phase stationnaire et une phase de décroissance. Cette évolution confirme le bon déroulement des différentes étapes de la digestion anaérobie.

L'analyse comparative des digesteurs a révélé que le digesteur D3, avec un rapport C/N de 25, présente les meilleures performances, avec une production cumulée de 21471mL de biogaz et 15357mL de méthane, soit un rendement méthanique de 71 %. Les digesteurs D5 (C/N = 30) et D4 (C/N = 27,5) ont montré des performances intermédiaires, tandis que D1 et D2, caractérisés par des rapports C/N plus faibles, ont produit des volumes de biogaz et de méthane inférieurs.

Ces résultats mettent en évidence l'importance du rapport C/N dans l'optimisation du processus de méthanisation. Un rapport compris entre 25 et 30 favorise l'activité microbienne et améliore significativement la production de méthane. En revanche, des valeurs trop faibles ou trop élevées entraînent une baisse du rendement.

Par ailleurs, l'évaluation du potentiel énergétique a permis de montrer que le méthane produit peut-être valoriser en énergie thermique et électrique, confirmant ainsi l'intérêt de la digestion anaérobie comme solution durable pour la gestion des déchets organiques et la production d'énergie renouvelable.

En somme, cette étude démontre que la Co-digestion de la panse bovine avec les balles de riz constitue une approche efficace pour améliorer la production de biogaz, tout en contribuant à la réduction de la pollution et à la valorisation énergétique des déchets organiques.

2. Suggestions

Au regard des résultats obtenus, plusieurs suggestions peuvent être formulées à l'attention des différents acteurs concernés :

2.1. À l'endroit des chercheurs

- Approfondir les études sur la Co-digestion en testant d'autres types de Co-substrats disponibles localement (déchets agricoles, résidus alimentaires).
- Étudier l'influence d'autres paramètres clés tels que, le temps de rétention hydraulique et la charge organique sur la production de biogaz.
- Réaliser des analyses microbiologiques pour mieux comprendre les mécanismes de dégradation et d'activité des micro-organismes méthanogènes.
- Développer des modèles cinétiques pour prédire la production de biogaz et optimiser les conditions de fonctionnement des digesteurs.
- Développer et tester des méthodes innovantes et adaptées localement pour purifier le biogaz

2.2. À l'endroit de l'Université du Burundi

- Renforcer les capacités des laboratoires en équipements dédiés à la recherche sur les énergies renouvelables et la gestion des déchets.
- Encourager les travaux de recherche appliquée dans le domaine de la valorisation énergétique des déchets organiques.
- Intégrer davantage les thématiques liées à la méthanisation et aux énergies renouvelables dans les programmes de formation.
- Favoriser les partenariats avec les institutions nationales et internationales pour soutenir la recherche et l'innovation dans ce domaine.
- Explorer des systèmes de stockage innovants et sûrs, visant à minimiser les pertes de méthane, à réguler la pression et à prolonger la durée de conservation

2.3. A l'endroit du gouvernement du Burundi

- Élaborer une politique nationale claire de gestion et de valorisation des déchets intégrant la production de biogaz.
- Financer des projets de recherche appliquée en collaboration avec des institutions comme l'Université du Burundi
- Mettre en place des centres pilotes de biométhanisation pour tester et diffuser les innovations locales.

- Faciliter l'accès aux équipements de digestion anaérobie (digesteurs, systèmes de collecte).
- Promouvoir l'utilisation des résultats pour développer des systèmes de biogaz ruraux, adaptés aux ressources locales, dans une perspective de transition énergétique et de développement durable.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Al, R. A. K. et. (2025). Système de chauffage pour poussins à biogaz issu des fientes de poules : Étude de cas d'une ferme avicole à Yaokokoroko (Côte d'Ivoire). *Sciences des Structures et de la Matière*, *9*(1), 72-85.

Alengebawy, A., Ran, Y., Osman, A. I., Jin, K., Samer, M., & Ai, P. (2024). Anaerobic digestion of agricultural waste for biogas production and sustainable bioenergy recovery : A review. *Environmental Chemistry Letters*, *22*(6), 2641-2668. https://doi.org/10.1007/s10311-024-01789-1

Álvarez-Alonso, C., Clemente, R., & Bernal, M. P. (2022). Carbon and Nitrogen Mineralisation in Soils and Nutrient Efficiency of Digestates from Fruit and Vegetable Wastes. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *22*(4), 4473-4486. https://doi.org/10.1007/s42729-022-01049-7

Chincoun, D., & Bagan, G. C. (2025). Évaluation du potentiel spécifique en biogaz des résidus agricoles au Bénin : Cas de la pomme d'anacarde. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, *13*(1), 75-79. https://doi.org/10.5281/zenodo.15057048

Cioabla, A. E., Ionel, I., Dumitrel, G.-A., & Popescu, F. (2012). Comparative study on factors affecting anaerobic digestion of agricultural vegetal residues. *Biotechnology for Biofuels*, *5*, 39. https://doi.org/10.1186/1754-6834-5-39

Czekała, W. (2022). Digestate as a Source of Nutrients : Nitrogen and Its Fractions. *Water*, *14*(24), 4067. https://doi.org/10.3390/w14244067

Dowd, B., O'Donovan, A., Gupta, V. K., O'Flaherty, V., & Tuohy, M. G. (2025). Amélioration de la biodégradabilité et du potentiel biométhane du contenu pansal des bovins lors de la digestion anaérobie par prétraitement avec le sécrétome de *Talaromyces stollii* des grands fonds marins et le liquide ruminal. *Bioresource Technology Reports*, *30*, 102165. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2025.102165

El Nemr, A., Hassaan, M. A., Elkatory, M. R., Ragab, S., El-Nemr, M. A., Tedone, L., De Mastro, G., & Pantaleo, A. (2022). Amélioration de la production de biogaz à partir de l'algue verte *Cheatomorpha linum* digérée individuellement ou en co-digestion , grâce à un traitement du biochar par ultrasons et ozonation. *Ultrasonics Sonochemistry*, *90*, 106197. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106197

Font-Pomarol, J., Molina-Peñate, E., Artola, A., & Sánchez, A. (2026). New Trends in the Valorisation of the Solid Fraction of Digestate for the Production of Value-Added Bioproducts. *Processes*, *14*(3), 577. https://doi.org/10.3390/pr14030577

Guo, Z., Usman, M., Alsareii, S. A., Harraz, F. A., Al-Assiri, M. S., Jalalah, M., Li, X., & Salama, E.-S. (2021). Synergistic ammonia and fatty acids inhibition of microbial communities during slaughterhouse waste digestion for biogas production. *Bioresource Technology*, *337*, 125383. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125383

Habara, M., Molitoris, J., Jankovičová, B., Rybář, J., & Vachálek, J. (2025). Hydrostatic Water Displacement Sensing for Continuous Biogas Monitoring. *Sensors (Basel, Switzerland)*, *25*(23), 7297. https://doi.org/10.3390/s25237297

Hajjaji, N., Pons, M. N., Renaudin, V., & Houas, A. (2010). *PRODUCTION DU BIOGAZ PAR DIGESTION ANAEROBIE : ASPECTS TECHNOLOGIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX*.

Houben, D. (2024). *Vers une meilleure compréhension des processus biogéochimiques au sein du système sol-plante : La clé pour le développement d'agroécosystèmes multifonctionnels et durables* [Accreditation to supervise research, Université Picardie Jules Verne]. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16064.14086

Ibrahim, N. A., Majeed, H. H., Jwaid, T. A., & Silas, K. (2025). Advancements in anaerobic digestion of organic waste for sustainable biogas production. *Environmental Science and Pollution Research International*, *32*(30), 17916-17930. https://doi.org/10.1007/s11356-025-36783-9

Ihoeghian, N. A., Amenaghawon, A. N., Ajieh, M. U., Oshoma, C. E., Ogofure, A., Erhunmwunse, N. O., Edosa, V. I. O., Tongo, I., Obuekwe, I. S., Isagba, E. S., Emokaro, C., Ezemonye, L. I. N., Lag-Brotons, A. J., Semple, K. T., & Martin, A. D. (2022). Anaerobic co-digestion of cattle rumen content and food waste for biogas production : Establishment of co-digestion ratios and kinetic studies. *Bioresource Technology Reports*, *18*, 101033. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101033

Kainthola, J., Kalamdhad, A. S., & Goud, V. V. (2019). A review on enhanced biogas production from anaerobic digestion of lignocellulosic biomass by different enhancement techniques. *Process Biochemistry*, *84*, 81-90. https://doi.org/10.1016/j.procbio.2019.05.023

Kalamaras, S. D., Vitoulis, G., Christou, M. L., Sfetsas, T., Tziakas, S., Fragos, V., Samaras, P., & Kotsopoulos, T. A. (2021). The Effect of Ammonia Toxicity on Methane Production of a Full-Scale Biogas Plant—An Estimation Method. *Energies*, *14*(16), 5031. https://doi.org/10.3390/en14165031

Karki, R., Chuenchart, W., Surendra, K. C., Shrestha, S., Raskin, L., Sung, S., Hashimoto, A., & Kumar Khanal, S. (2021). Anaerobic co-digestion : Current status and perspectives. *Bioresource Technology*, *330*, 125001. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125001

Li, P., Zhao, H., Cheng, C., Hou, T., Shen, D., & Jiao, Y. (2024). A review on anaerobic co-digestion of sewage sludge with other organic wastes for methane production : Mechanism, process, improvement and industrial application. *Biomass and Bioenergy*, *185*, 107241. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107241

Li, W., Gupta, R., Zhang, Z., Cao, L., Li, Y., Show, P. L., Gupta, V. K., Kumar, S., Lin, K.-Y. A., Varjani, S., Connelly, S., & You, S. (2023). A review of high-solid anaerobic digestion (HSAD) : From transport phenomena to process design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *180*, 113305. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113305

Li, Y., Chen, Y., & Wu, J. (2019). Enhancement of methane production in anaerobic digestion process : A review. *Applied Energy*, *240*, 120-137. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.243

Lian, Q., Qi, J., Huang, D., Song, W., & Yuan, J. (2025). Carbon to nitrogen ratio and organic loading rate optimization of sewage sludge and rice straw : Economic analysis and anaerobic digestion process understandings through machine learning. *Energy*, *330*, 136789. https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.136789

Ma, G., Ndegwa, P., Harrison, J. H., & Chen, Y. (2020). Methane yields during anaerobic co-digestion of animal manure with other feedstocks : A meta-analysis. *The Science of the Total Environment*, *728*, 138224. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138224

Martín-Sanz-Garrido, C., Revuelta-Aramburu, M., Santos-Montes, A. M., & Morales-Polo, C. (2025). A Review on Anaerobic Digestate as a Biofertilizer : Characteristics, Production, and Environmental Impacts from a Life Cycle Assessment Perspective. *Applied Sciences*, *15*(15), 8635. https://doi.org/10.3390/app15158635

Meneses Quelal, O., & Pilamunga Hurtado, D. (2023). Anaerobic Fermentation of Slaughterhouse Waste—Codigestion with Wheat Straw to Determine Methane Biochemical Potential and Kinetic Analysis. *Fermentation*, *9*(8), 726. https://doi.org/10.3390/fermentation9080726

Negro, V., Noussan, M., & Chiaramonti, D. (2025). Alternative options for biogas-to-energy : A comparison of electricity and biomethane generation based on the real operation of a production site. *Applied Energy*, *377*, 124687. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124687

Ossa Henao, D. M., Chica Arrieta, E. L., Colorado Granda, A. F., Amell Arrieta, A. A., & Unfried-Silgado, J. (2023). Characterization of bovine ruminal content focusing on energetic potential use and valorization opportunities. *Heliyon*, *9*(2), e13408. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13408

Park, J.-G., Lee, B., Jo, S.-Y., Lee, J.-S., & Jun, H.-B. (2018). Control of accumulated volatile fatty acids by recycling nitrified effluent. *Journal of Environmental Health Science & Engineering*, *16*(1), 19-25. https://doi.org/10.1007/s40201-018-0291-9

Paulo, L. M., Ramiro-Garcia, J., van Mourik, S., Stams, A. J. M., & Sousa, D. Z. (2017). Effect of Nickel and Cobalt on Methanogenic Enrichment Cultures and Role of Biogenic Sulfide in Metal Toxicity Attenuation. *Frontiers in Microbiology*, *8*, 1341. https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01341

Qian, S., Chen, L., Xu, S., Zeng, C., Lian, X., Xia, Z., & Zou, J. (2025). Research on Methane-Rich Biogas Production Technology by Anaerobic Digestion Under Carbon Neutrality : A Review. *Sustainability*, *17*(4), 1425. https://doi.org/10.3390/su17041425

Rusanowska, P., Zieliński, M., & Dębowski, M. (2023). Removal of CO2 from Biogas during Mineral Carbonation with Waste Materials. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *20*(9), 5687. https://doi.org/10.3390/ijerph20095687

Saubade, C. (1981). Indice de réfraction de l'eau pure aux basses températures, pour la longueur d'onde de 5 893 Å. *Journal de Physique*, *42*(2), 359-366. https://doi.org/10.1051/jphys:01981004202035900

Scarlat, N., Dallemand, J.-F., & Fahl, F. (2018). Biogas : Developments and perspectives in Europe. *RENEWABLE ENERGY*. https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.006

Shamsuddin, R. M., Dawi Cahyono, N. A., Ayoub, M., Siyal, A. A., & Hamid, A. F. (2022). *Anaerobic Co-Digestion of Chicken Manure with Sugarcane Bagasse, Oil Palm Frond and Empty Fruit Bunch Additive : Methane Yield and Kinetic Analysis* (SSRN Scholarly Paper 4056978). Social Science Research Network. https://doi.org/10.2139/ssrn.4056978

Shrestha, S., Fonoll, X., Khanal, S. K., & Raskin, L. (2017). Biological strategies for enhanced hydrolysis of lignocellulosic biomass during anaerobic digestion : Current status and future perspectives. *Bioresource Technology*, *245*(Pt A), 1245-1257. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.089

Sobhi, M., Elsamahy, T., Zakaria, E., Gaballah, M. S., Zhu, F., Hu, X., Zhou, C., Guo, J., Huo, S., & Dong, R. (2024). Characteristics, limitations and global regulations in the use of biogas digestate as fertilizer : A comprehensive overview. *Science of The Total Environment*, *957*, 177855. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177855

Song, S., Lim, J. W., Lee, J. T. E., Cheong, J. C., Hoy, S. H., Hu, Q., Tan, J. K. N., Chiam, Z., Arora, S., Lum, T. Q. H., Lim, E. Y., Wang, C.-H., Tan, H. T. W., & Tong, Y. W. (2021). Food-waste anaerobic digestate as a fertilizer : The agronomic properties of untreated digestate and biochar-filtered digestate residue. *Waste Management*, *136*, 143-152. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.10.011

Steiniger, B., Hupfauf, S., Insam, H., & Schaum, C. (2023). Exploring Anaerobic Digestion from Mesophilic to Thermophilic Temperatures—Operational and Microbial Aspects. *Fermentation*, *9*(9), 798. https://doi.org/10.3390/fermentation9090798

Sun, M., Shi, Z., Zhang, C., Zhang, Y., Zhang, S., & Luo, G. (2022). Novel Long-Chain Fatty Acid (LCFA)-Degrading Bacteria and Pathways in Anaerobic Digestion Promoted by Hydrochar as Revealed by Genome-Centric Metatranscriptomics Analysis. *Applied and Environmental Microbiology*, *88*(16), e0104222. https://doi.org/10.1128/aem.01042-22

Yang, J., Zhang, J., Du, X., Gao, T., Cheng, Z., Fu, W., & Wang, S. (2025a). Ammonia inhibition in anaerobic digestion of organic waste : A review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *22*(5), 3927-3942. https://doi.org/10.1007/s13762-024-06029-1

Yang, J., Zhang, J., Du, X., Gao, T., Cheng, Z., Fu, W., & Wang, S. (2025b). Ammonia inhibition in anaerobic digestion of organic waste : A review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *22*(5), 3927-3942. https://doi.org/10.1007/s13762-024-06029-1

Zamanzadeh, M., Hagen, L. H., Svensson, K., Linjordet, R., & Horn, S. J. (2017). Biogas production from food waste via co-digestion and digestion- effects on performance and microbial ecology. *Scientific Reports*, *7*(1), 17664. https://doi.org/10.1038/s41598-017-15784-w

Zhang, X., Jiao, P., Wang, Y., Dai, Y., Zhang, M., Wu, P., & Ma, L. (2024). Optimizing anaerobic digestion : Benefits of mild temperature transition from thermophilic to mesophilic conditions. *Environmental Science and Ecotechnology*, *21*, 100440. https://doi.org/10.1016/j.ese.2024.100440

Zhao, W., Jeanne Huang, J., Hua, B., Huang, Z., Droste, R. L., Chen, L., Wang, B., Yang, C., & Yang, S. (2020). A new strategy to recover from volatile fatty acid inhibition in anaerobic digestion by photosynthetic bacteria. *Bioresource Technology*, *311*, 123501. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123501

Zhu, M., Song, L., Li, W., Qin, Y., & Li, Y.-Y. (2025). Hydraulic retention times as key parameter governing biomethanation of brewery spent grain and system stability in long-term continuously-feeding anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, *425*, 132331. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2025.132331