

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

جامعة 20 أوت 1955 - سكيكدة

UNIVERSITÉ 20 AOUT 1955 – SKIKDA



Faculté des sciences
Filière science d'agronomie



كلية العلوم
شعبة العلوم الفلاحية

قسم الفلاحة

Département d'agronomie

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

En vue de l'obtention du Diplôme de Master en Sciences Agronomiques

Spécialité : Systèmes de production Agro-Ecologique

THÈME

Conception d'un système biogaz/compost à base des
déchets avicoles.

Présenté par :

BOUCHALTA Mohamed, BOUAFIA Mohamed Lamine, ALI MECIAD Mouad

Membres de Jury :

Bounouara Zohra *MCB* *Président*

Bala Sahima *MCB* *Examineur*

Hannachi Abdelhakim *MCA* *Encadreur*

Année universitaire 2023/2024

ملخص

يعد الهضم اللاهوائي أحد أكثر العمليات كفاءة لإنتاج الطاقة المتجددة، حيث يوفر العديد من الفوائد الصناعية والبيئية من خلال خلق بيئة أنظف وأقل سمية من خلال إنتاج غاز الميثان (CH_4). فهو يساعد على تقليل النفايات العضوية وانبعاثات الغازات الدفيئة، بينما ينتج الغاز الحيوي الذي يمكن استخدامه كمصدر للطاقة الحرارية والكهربائية، وبالتالي المساهمة في بيئة أنظف. لتحقيق أقصى قدر من إنتاج الغاز الحيوي، من الضروري احترام شروط محددة مثل درجة الحرارة، ودرجة الحموضة، والقلوية، والمواد المغذية، وغياب المركبات السامة، واستبعاد الأكسجين واستخدام مفاعل حيوي.

ومن خلال احترام الشروط المحددة للهضم اللاهوائي، من الممكن تحسين إنتاج الميثان واستخلاص فوائد بيئية وصناعية ومتعلقة بالطاقة كبيرة، وتقديم حلول مستدامة لتلبية احتياجات الطاقة المتزايدة لمجتمعنا.

الهدف من هذه الدراسة هو معالجة الجزء العضوي من النفايات عن طريق الميثان الحيوي، وهي عملية تعمل على تحلل المواد العضوية في غياب الأكسجين لإنتاج خليط من الميثان (CH_4) وثنائي أكسيد الكربون (CO_2)، يسمى الغاز الحيوي. في هذه الدراسة قمنا باختبار العينات التالية: روث البقر، روث الدجاج المنزلي، وروث الدجاج الفرنسي.

في نهاية التجربة تبين أن سماد الدجاج الفرنسي (L) يحتوي على أعلى نسبة من المواد العضوية مقارنة بسماد الدجاج المنزلي وسماد البقر. كما أظهرت هذه التجربة أيضاً أن سماد الدجاج الفرنسي (L) هو الركيزة الأكثر فعالية لإنتاج الغاز الحيوي، يليه سماد الدجاج المنزلي (M) وسماد البقر (B). على الرغم من أن جميع أنواع السماد الثلاثة مناسبة لإنتاج الغاز الحيوي، إلا أن روث الدجاج الفرنسي يتميز بإنتاجيته المتفوقة.

الكلمات المفتاحية: الهضم اللاهوائي، السماد، النفايات، الغاز الحيوي، مفاعل حيوي.

Résumé

La digestion anaérobie est l'un des processus les plus efficaces pour la production d'énergie renouvelable, offrant de nombreux avantages industriels et environnementaux en créant un environnement plus propre et moins toxique grâce à la production de méthane (CH₄). Elle permet de réduire les déchets organiques et les émissions de gaz à effet de serre, tout en produisant du biogaz utilisable comme source d'énergie thermique et électrique, contribuant ainsi à un environnement plus pur. Pour maximiser la production de biogaz, il est crucial de respecter certaines conditions spécifiques telles que la température, le pH, l'alcalinité, les nutriments, l'absence de composés toxiques, l'exclusion de l'oxygène et l'utilisation d'un bioréacteur.

En respectant les conditions spécifiques de la digestion anaérobie, il est possible d'optimiser la production de méthane et d'en tirer des bénéfices environnementaux, industriels et énergétiques considérables, offrant des solutions durables pour répondre aux besoins énergétiques croissants de notre société.

Le but de cette étude est de traiter la fraction organique des déchets par biométhanisation, un processus qui dégrade la matière organique en absence d'oxygène pour produire un mélange de méthane (CH₄) et de dioxyde de carbone (CO₂), appelé biogaz. Pour cette étude, nous avons choisi les échantillons suivants : le fumier de vache, le fumier de poules domestiques et le fumier de poules françaises.

À la fin de l'expérimentation, il a été constaté que le compost de poule français présente le pourcentage le plus élevé de matières organiques comparé au compost de poule domestique et au compost de vache. Cette expérience montre également que le fumier de poules françaises (L) est le substrat le plus efficace pour produire du biogaz, suivi par le fumier de poules domestiques (M) et le fumier de vache (B). Bien que les trois types de fumier soient appropriés pour la production de biogaz, le fumier de poules françaises se distingue par sa productivité supérieure.

Mots clés : Biogaz, Bioréacteur, Composte, Déchets, Digestion anaérobie.

Abstract

Anaerobic digestion is one of the most efficient processes for renewable energy production, providing many industrial and environmental benefits by creating a cleaner, less toxic environment through the production of methane (CH₄). It helps reduce organic waste and greenhouse gas emissions, while producing biogas that can be used as a source of thermal and electrical energy, thus contributing to a cleaner environment. To maximize biogas production, it is crucial to respect specific conditions such as temperature, pH, alkalinity, nutrients, absence of toxic compounds, exclusion of oxygen and use of a bioreactor.

By respecting the specific conditions of anaerobic digestion, it is possible to optimize the production of methane and derive considerable environmental, industrial and energy benefits, offering sustainable solutions to meet the growing energy needs of our society.

The aim of this study is to treat the organic fraction of waste by bio methanization, a process which degrades organic matter in the absence of oxygen to produce a mixture of methane (CH₄) and carbon dioxide (CO₂), called biogas. For this study, we chose the following samples: cow manure, domestic chicken manure and French chicken manure.

At the end of the experiment, it was found that French hen compost had the highest percentage of organic matter compared with domestic hen compost and cow compost. This experiment also shows that French hen manure (L) is the most efficient substrate for biogas production, followed by domestic hen manure (M) and cow manure (B). Although all three types of manure are suitable for biogas production, French hen manure stands out for its superior productivity.

Keywords: Anaerobic digestion, Biogas, Bioreactor, Compost, Wast

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions **Allah** (notre Dieu) de nous avoir accordé la capacité, la volonté et la patience nécessaires à la réalisation de ce travail.

Nous tenons également à exprimer notre profonde gratitude à nos mères et pères pour leur soutien inestimable.

Nous remercions chaleureusement notre encadreur, Monsieur Hannachi A., Docteur à l'Université 20 Août de Skikda, pour ses efforts inlassables qui ont permis à ce mémoire de voir le jour. Nous lui exprimons notre gratitude pour sa direction, ses encouragements et son aide précieuse tout au long de ce projet.

Nous remercions aussi les membres du jury ainsi que tous les enseignants de notre cursus universitaire qui ont contribué à notre formation.

Enfin, merci à toutes les personnes, de près ou de loin, qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Du plus profond de notre cœur, nous dédions ce travail :

À nos parents, dont l'éducation a fait de nous les personnes que nous sommes aujourd'hui. Ce mémoire vous est dédié en témoignage de notre gratitude la plus sincère pour vos efforts et sacrifices en faveur de notre réussite et de notre bonheur. Nous espérons pouvoir vous rendre fiers avec ce travail.

À nos chers frères et sœurs, nous ne pouvons exprimer à travers ces lignes tous nos sentiments d'amour et de tendresse envers vous. Que l'amour et la fraternité nous unissent à jamais. Nous vous souhaitons la réussite dans votre vie, avec tout le bonheur nécessaire pour vous combler. Merci pour votre précieuse aide à la réalisation de ce travail. Que Dieu nous unisse à jamais.

Nous souhaitons également dédier ce mémoire à tous ceux et celles qui, de près ou de loin, nous ont soutenus durant notre cursus.

Liste des tableaux

N°	Titres	Pages
Tableau 01	Provenance et composition des déchets en France (Addou, 2009).	4
Tableau 02	Les différentes matières à composte.	14
Tableau 03	Les différentes matières à ne pas composte.	15
Tableau 04	Conditions opératoires nécessaires pour une mise en œuvre optimale d'un procédé de compostage (Humeau et Le cloirec, 2006).	17
Tableau 05	Caractéristiques comparées du biogaz et de quelques combustibles ou carburants (Théoleyre M.A., Héduit M., 1986).	19
Tableau 06	Indice de la composition moyenne du biogaz (Amarante, 2010).	27
Tableau 07	Les caractéristiques du biogaz et du méthane déterminé à 0°C et 1 atm (B. D La Farge, 1995).	30
Tableau 08	Pouvoir calorifique du biogaz en fonction de la proportion de méthane (B. D La Farge, 1995).	30
Tableau 09	Proportion de H ₂ S dans le biogaz selon le type de substrat (Aile, Solagro, Ademe, Trame. 2006).	33
Tableau 10	La production du biogaz par (m ³) par le bidon B.	49
Tableau 11	La production du biogaz par (m ³) par le bidon M.	51
Tableau 12	La production du biogaz par (m ³) par le bidon L.	53
Tableau 13	Analyse de la comparaison entre les différents de composte de biogaz.	62

Liste des figures

N°	Titres	Pages
Figure 01	Représentation schématique du principe de compostage (Charnay, 2005).	14
Figure 02	Schéma global du bilan de la méthanisation (René Moleta, 2009).	24
Figure 03	Grandes étapes de la digestion anaérobie (Amarante, 2010).	25
Figure 04	Biogaz produit (en m ³) par tonne de matière fraîche entrante.	36
Figure 05	Tuyau en plastique.	37
Figure 06	Balance Électronique.	37
Figure 07	La colle.	38
Figure 08	Chignole.	38
Figure 09	Le digesteur utilisé.	38
Figure 10	Salle R1, lieu d'expérimentation.	39
Figure 11	Le bidon M (fumier de poules domestiques).	40
Figure 12	Le bidon L (fumier de poules française).	41
Figure 13	Le bidon B (fumier de vache).	41
Figure 14	Déterminer le volume de biogaz avec une balance	42
Figure 15	Laboratoire agronomie.	43
Figure 16	PH mètre utilisé.	44
Figure 17	Conductimètre utilisé.	45
Figure 18	Balance électrique.	46
Figure 19	Étuve.	46
Figure 20	Le four à moufle.	47
Figure 21	Le résultat d'expérience (B).	48
Figure 22	Le résultat d'expérience (M).	48
Figure 23	Le résultat d'expérience (L).	49
Figure 24	Evolution de production du biogaz par le bidon B.	50
Figure 25	Evolution de production du biogaz par le bidon M.	52
Figure 26	Evolution de production du biogaz par le bidon L.	54

Figure 27	Résultats de mesure du pH.	55
Figure 28	Gamme de l'évolution du pH (E. Pousset, 1999).	56
Figure 29	Résultats de mesure de CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$).	56
Figure 30	Résultats de mesure la température ($^{\circ}\text{C}$).	57
Figure 31	Résultats de mesure de TDS (mg/l).	57
Figure 32	Résultats de mesure de SAL.	58
Figure 33	Résultats de mesure du pH.	59
Figure 34	Résultats de mesure de CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$).	59
Figure 35	Résultats de mesure la température ($^{\circ}\text{C}$).	60
Figure 36	Résultats de mesure de TDS (mg/l).	61
Figure 37	Résultats de mesure de SAL.	62
Figure 38	Résultats de mesure teneur de MO.	63
Figure 39	Analyse de la comparaison entre les différentes moyennes de composte de biogaz	64

Liste des acronymes

C/N : rapporte carbone/ azote

CE : Conductivité électrique

DAS : déchets activité de soins

DASSRI : déchets activité de soins à risque infectieux

DCO : demande chimique en oxygène

DH : déchets hospitaliers

DI : déchets inertes

DIB : déchets industriels banals **DIS** : déchets industriels spéciaux **DM** : déchets municipaux

DSM : déchets spéciaux des ménages

DTQD : déchet toxique en quantités dispersées

DTQL : déchet toxique en quantités limitées

H : humidité de l'aire

MO : matière organique

MS : matière sèche

OM : ordures ménagères

PCI : pouvoir calorifique inférieur

PH : potentiel hydrogène

TDS : totale de solides dissous

SAL : salinité

T : température

Sommaire

Résumé	
Remerciements	
Dédicaces	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Liste des abréviations	
Introduction	1

Introduction	1
Bibliographie	2

CHAPITRE I : Les Déchets	3
1. Définition des déchets.....	3
2. Les différents types de déchets.....	3
3. Caractérisation Physico-chimique des Déchets.....	5
3.1. Densité des Déchets.....	5
3.2. Le degré d'humidité.....	5
3.3. Le pouvoir calorifique.....	5
3.4. Le rapport des teneurs en carbone et azote.....	5
4. Classification des déchets.....	6
4.1. Les déchets ménagers et assimilés (DMA).....	6
4.2. Les déchets des collectivités locales.....	7
4.3. Les déchets industriels.....	7
4.4. Les déchets hospitaliers (DH), déchets d'activités de soins (DAS).....	8
4.5. Déchets Agricoles.....	8
4.6. Déchets Particuliers.....	8
4.7. Déchets Inertes (DI).....	9
4.8. Déchets Fermentescibles.....	9
4.9. Déchets Ultimes.....	9
4.10. Déchets Verts.....	9
5. Risques Liés aux Déchets.....	10

CHAPITRE II : Compostage et Bio méthanisation..... 12

A/ Compostage.....12

1. Définition de compost.....	12
1.1. Le compost à base de déchets verts.....	12
1.2. Les avantages du compost.....	12
1.2.1. Amélioration de la croissance des végétaux et racines.....	13
1.2.2. Amélioration du rythme de diffusion des nutriments.....	13
1.2.3. Amélioration de la porosité du sol.....	13
1.2.4. Amélioration de la capacité de rétention d'eau.....	13
1.2.5. Elimination des maladies chez les végétaux.....	13
1.2.6. Effet sur la structure du sol.....	13
2. Définition du compostage.....	14
3. Principe de compostage.....	14
4. Type de matière à composter.....	14
5. Types de compostage.....	16
5.1. Le compostage aérobie.....	16
5.2. Le compostage anaérobie (digestion anaérobie)	18
6. Phases du compostage.....	20
7. Facteurs de réussite du compostage.....	20
7.1. Aération.....	21
7.2. Humidité.....	21
7.3. Température.....	21

B/ Biométhanisation.....21

1. La méthanisation.....	21.
2. La conversion de la matière organique.....	23
3. Les étapes de la digestion anaérobie.....	24
3.1. L'hydrolyse.....	25
3.2. L'acidogénèse.....	25
3.3. L'acétogénèse.....	26
3.4. La méthanogénèse.....	26
3.5. Autres réactions.....	26
4. Les produits de la méthanisation.....	27
4.1. Biogaz.....	27

4.1.1. Composition du biogaz.....	27
4.1.2. Utilisation du biogaz.....	28
4.1.3. Epuration du biogaz.....	28
4.1.4. Les caractéristiques du biogaz.....	30
4.1.5. Valorisation énergétique du biogaz.....	31
4.1.6. Le stockage du biogaz.....	31
4.2. Digestat et éluât.....	31
5. Facteurs affectant la stabilité du processus de biogaz.....	32
5.1. Le substrat.....	32
5.2. La température.....	33
5.3. Le pH.....	33
5.4. Degré d'humidité.....	34
5.5. Composés toxiques ou inhibiteurs.....	34
6. Les avantages de la bio-méthanisation.....	35
7. Combien de biogaz puis-je récupérer avec mes rejets organiques ?.....	36

Partie pratique 36

CHAPITRE III : Matériels et méthodes.....37

1. Introduction.....	37
2. Le digesteur utilisé.....	37
2.1. Expérience : La production du biogaz.....	39
2.2. Expérimentation sur le terrain.....	
2.2.1. La production du biogaz à partir du fumier des poules pondeuses domestiques...40	40
2.2.2. La production du biogaz à partir du fumier des poules française.....40	40
2.2.1. La production du biogaz à partir du fumier de vache.....41	41
2.3. Expérimentations en laboratoire.....	43
2.3.1. Détermination de pH.....	43
2.3.2. Détermination de Sal, T°C, CE, TDS.....	44
2.3.3 Détermination de la teneur en matière organique (MO).....	45

CHAPITRE IV : Résultats et discussions.....48

1. Production du biogaz.....	48
2. Détermination du pH, CE, T, TDS, SAL, MO	55

Conclusion 65

Références bibliographiques 66

Introduction

Introduction

La production d'énergie est essentielle pour la continuité de la vie dans toutes ses dimensions. Toutefois, une question cruciale se pose : jusqu'à quand les sources d'énergie actuelles pourront-elles suffire aux besoins mondiaux croissants ? Face à ce défi, les chercheurs se tournent vers des solutions alternatives, notamment les énergies renouvelables. Parmi celles-ci, le biogaz, produit à partir de la biomasse, émerge comme une option prometteuse.

Le biogaz, et en particulier le méthane produit à partir de la biomasse des déchets sylvicoles, représente une opportunité précieuse. Ce processus, connu sous le nom de valorisation des déchets sylvicoles, permet de transformer ces déchets en une nouvelle source d'énergie, comme le biogaz et l'électricité. La digestion anaérobie des matières organiques biodégradables a été découverte pour la première fois en 1981 et inclut diverses catégories de déchets : déchets verts, déchets ménagers fermentescibles, boues de stations d'épuration, effluents d'élevage, coproduits agricoles et cultures énergétiques agricoles.

Par ailleurs, la croissance des activités humaines engendre une production accrue de déchets variés : industriels, ménagers, agricoles, et eaux usées urbaines. Ces déchets ont des impacts très néfastes sur l'environnement et la santé humaine.

Face à ces défis, les énergies renouvelables se révèlent être une alternative intéressante. Plus précisément, la valorisation énergétique de la biomasse par méthanisation se distingue par son efficacité. La méthanisation permet de stabiliser les déchets tout en réduisant leur charge polluante et en produisant du biogaz, une énergie renouvelable utilisable dans diverses applications domestiques.

L'objectif de ce mémoire est de présenter une étude approfondie sur le phénomène de biométhanisation, basée sur une revue bibliographique. De plus, une vérification expérimentale du phénomène sera effectuée par la conception d'un système de compostage-biométhanisation utilisant des déchets sylvicoles.

Ce mémoire débute par une recherche bibliographique approfondie sur les différents types de déchets et leurs caractéristiques, incluant une analyse détaillée des processus de compostage et de biométhanisation. Ensuite, la section dédiée au travail expérimental présente le dispositif expérimental et la méthodologie adoptée pour les essais, avec une description complète des équipements et matériaux utilisés. L'analyse des résultats suit, où les résultats obtenus sont présentés et discutés, en les comparant

avec les données disponibles dans la littérature. Enfin, le mémoire se conclut par un résumé des principaux résultats et les conclusions tirées de l'étude.

Ce mémoire met en évidence l'importance de la méthanisation comme solution viable pour la gestion des déchets et la production d'énergie renouvelable. La vérification expérimentale des hypothèses et des résultats obtenus apporte des contributions significatives à la compréhension et à l'optimisation de ce processus.

***CHAPITRE I : Les
Déchets***

1. Définition des Déchets

La conceptualisation des déchets présente une complexité inhérente due à la diversité de leurs origines, états, et impacts environnementaux, sociaux, et économiques.

Selon la législation algérienne, spécifiquement la loi numéro 01-19 du 12 décembre 2001 (article 3, Journal Officiel de la République Algérienne, numéro 77, 2001), un déchet est caractérisé comme étant tout résidu issu d'un processus de production, de transformation, ou d'utilisation.

Cette définition englobe toute substance, produit, ou bien meuble dont le détenteur envisage ou est contraint de se défaire. La portée de cette définition met en lumière la croissante complexité des cycles de vie des produits dans notre société contemporaine, où la diversité des déchets générés dépasse parfois celle de la biodiversité naturelle.

La terminologie juridique telle que "bien meuble" et "abandon" soulève des considérations importantes en droit civil, faisant écho aux principes de la propriété et de la responsabilité. L'"abandon", dans ce contexte, pourrait juridiquement catégoriser le déchet comme une "chose sans maître", c'est-à-dire un bien volontairement laissé par son propriétaire (**Anonyme 1, 2001**).

Cette interprétation souligne l'importance de la notion de détenteur dans la gestion des déchets, établissant un lien direct avec la responsabilité du producteur et/ou du détenteur jusqu'à l'élimination finale du déchet, même si ce dernier n'est plus en sa possession physique (**Anonyme 1, 2001**).

Selon (**Bertolini ,1990**), un déchet est défini comme un produit dénué de toute valeur d'usage et de valeur d'échange pour son détenteur ou son propriétaire, illustrant un déficit en valeur économique attribuable à l'abondance du déchet, contrairement à des ressources rares telles que l'air.

2. Les différents types des déchets

Nous pouvons classer les déchets par types en fonction de leurs origines et de leurs compositions (**Tableau 01**).

Tableau01. Provenance et composition des déchets en France (Addou, 2009).

Type	Provenance et composition
Ordures ménagères (OM)	Déchets provenant des ménages et de l'industrie ayant des caractéristiques voisines d'ordures ménagères et qui peuvent être collectés dans les mêmes conditions que les Ordures ménagères. Organiques : déchets de cuisine, restes des aliments, papier, textiles, emballages, Minérales : cendres, scories, ustensiles ménagères en verre, porcelaine, faïence ...
Boues	Ensemble des matières solides éliminées dans les stations d'épurations et d'assainissement des communes. Boues fraîche : boues prélevées des décanteurs. Boues en décompositions : boues de dégradation anaérobie provenant des fosses à boues.
Déchets industriels (ne présentant pas de caractère dangereux ni polluant)	Déchets issus de la production de matières premières ou de leur transformation en produits fins. Organique : déchets de production de l'industrie alimentaire, déchets de bois, matériaux d'emballage, copeaux des scieries. Minérales : cendres et scories, matériel d'emballage.
Déchets des jardins	Déchets de gazon, branchage, feuillage, mauvaise herbes...
Balayures des rues	Déchet de nettoyage des rues, des marchés et qui sont collectés par les services de voirie

3. Caractérisation Physico-chimique des Déchets

La caractérisation des déchets, telle qu'établie par les études de (Nignikam,1992) et (Sotamenou ,2005), repose sur l'évaluation de quatre paramètres essentiels : la densité, le degré d'humidité, le pouvoir calorifique, ainsi que le rapport des teneurs en carbone et azote (C/N). Ces paramètres sont fondamentaux dans la détermination des méthodes de gestion, de collecte, de stockage, et de traitement des déchets.

3.1 Densité des Déchets

La densité des déchets, indicateur crucial pour la sélection des équipements de collecte et de stockage, varie significativement en fonction de leur compressibilité. En raison de cette variabilité, il est primordial de spécifier les conditions sous lesquelles la densité est mesurée, telles que la densité en poubelle, en benne, en décharge, ou en fosse. La densité en poubelle, par exemple, est évaluée en remplissant un récipient de capacité prédéfinie avec des déchets frais sans aucun tassement, permettant ainsi une estimation de leur volume initial.

3.2 Degré d'Humidité

Le degré d'humidité des déchets, qui fluctue selon les saisons et les conditions environnementales, a un impact significatif sur la vitesse de décomposition des matières organiques et sur le pouvoir calorifique des déchets. Une teneur élevée en eau peut accélérer la décomposition, mais réduire le pouvoir calorifique du fait de la consommation d'énergie nécessaire à l'évaporation de l'eau pendant la combustion.

3.3 Pouvoir Calorifique

Le pouvoir calorifique des déchets est défini comme la quantité d'énergie thermique libérée par la combustion d'une unité de poids d'ordures brutes. Il est exprimé en millithermies par kilogramme (mth/kg), fournissant une mesure de la valorisation énergétique potentielle des déchets.

3.4 Rapport Carbone/Azote (C/N)

Le rapport carbone/azote (C/N) est un indicateur clé de la qualité du compost issu du traitement des déchets. Ce rapport est crucial pour les processus de traitement biologique, car il influence directement la vitesse et l'efficacité de la fermentation. Un suivi régulier de ce rapport permet de monitorer l'avancement du processus de compostage et d'ajuster les conditions de traitement pour optimiser la dégradation des matières organiques. Ces caractéristiques physico-chimiques des déchets jouent un rôle déterminant dans la gestion environnementale et le recyclage, influençant les choix technologiques et opérationnels des systèmes de traitement des déchets. Une compréhension approfondie de ces paramètres est donc essentielle pour la mise en œuvre de stratégies de gestion des déchets efficaces et durables.

4. Classification des Déchets :

La classification des déchets, telle que définie par **(Leroy,1997)**, repose sur leur provenance et leur nature, permettant une gestion ciblée et adaptée à chaque catégorie. Cette distinction est essentielle pour l'élaboration de stratégies de traitement et d'élimination efficaces, prenant en compte les spécificités de chaque type de déchet.

Selon (**Damien,2006**) propose une classification des déchets qui prend en compte divers aspects significatifs pour leur gestion et traitement. Cette approche multidimensionnelle considère le caractère dangereux des déchets, leurs propriétés physiques, chimiques, et biologiques, le secteur producteur, ainsi que leur composition et usage. Cette classification permet d'élaborer des stratégies de gestion des déchets plus ciblées et efficaces, en reconnaissant la diversité et la complexité des déchets générés.

- **Caractère dangereux ou non** : Cette distinction est fondamentale pour déterminer les méthodes de traitement et d'élimination appropriées, les déchets dangereux nécessitant des précautions spécifiques pour éviter les risques environnementaux et sanitaires.
- **Propriétés physiques, chimiques, et biologiques** : La nature fermentescible, inflammable, ou autre des déchets influence le choix des technologies de traitement et de valorisation.
- **Secteur producteur** : Identifier le secteur producteur (industrie, collectivités, particuliers) aide à localiser la source des déchets et à adapter les stratégies de collecte et de traitement.
- **Composition et usage** : La connaissance de la composition des déchets et de leur usage antérieur (emballage, électroménager, véhicule) est cruciale pour leur recyclage et valorisation.

4.1. Les Déchets Ménagers et Assimilés (DMA)

Cette catégorie englobe :

- ✓ **Ordures Ménagères (OM)** : Déchets quotidiens générés par les activités domestiques. –
- ✓ **Déchets Municipaux (DM) ou Urbains** : Inclut les résidus urbains provenant du nettoyage.
- ✓ **Déchets Occasionnels**: Composés de déchets verts, encombrants, et déchets de bricolage, marqués par une prédominance de matière organique (71%) due à la densité élevée de population (2081 hab./km²), (**Anonyme 2, 2005**) et une quantité significative de matière plastique (12.5%).

4.2 Les Déchets des Collectivités Locales

Les collectivités locales sont responsables de la production annuelle de 22.5 millions de tonnes de déchets variés, comprenant :

- ✓ **Boues de Station d'Épuration** : Résultant du traitement des eaux usées.
- ✓ **Matières de Vidange**: Issues de l'entretien des systèmes d'assainissement non collectif.
- ✓ **Déchets d'Espaces Verts** : Résidus de l'entretien des parcs et jardins publics.
- ✓ **Résidus du Nettoyement des Rues** : Déchets collectés lors du nettoyage urbain.
- ✓ **Papiers Divers des Locaux Administratifs** : Papier et carton provenant de l'activité administrative.

4.3 Déchets Industriels

La diversité des processus industriels engendre plusieurs types de déchets, chacun nécessitant une approche spécifique en matière de gestion et de traitement. Les déchets industriels se classent en trois grandes catégories :

A. Déchets Industriels Toxiques : Ces déchets présentent des risques significatifs pour la santé humaine et l'environnement en raison de leur toxicité. Leur traitement et élimination requièrent des mesures de sécurité strictes pour éviter la contamination et les expositions dangereuses.

B. Déchets Industriels Banals (DIB) ou Non Dangereux : Les DIB proviennent d'une large gamme d'activités, incluant le secteur commercial, artisanal, industriel, et de service. Ils comprennent des matériaux tels que les plastiques, papiers, cartons, textiles, bois non traité, métaux, verres, et matières organiques. Bien que considérés comme non dangereux, leur gestion efficace est cruciale pour réduire l'impact environnemental des activités industrielles.

C. Déchets Industriels Spéciaux (DIS) : Cette catégorie regroupe les déchets dangereux exclus des catégories de déchets domestiques dangereux et des déchets d'activités de soins à risques infectieux. Les DIS nécessitent des traitements spécifiques pour limiter les risques qu'ils représentent.

4.4 Déchets Hospitaliers (DH) ou Déchets d'Activités de Soins (DAS)

Les déchets issus des activités médicales et vétérinaires incluent les éléments éliminés suite aux diagnostics, traitements préventifs, curatifs ou palliatifs. Parmi ceux-ci, les déchets d'activité de soins à risque infectieux (DASRI) sont particulièrement dangereux et classifiés comme déchets dangereux, nécessitant des protocoles d'élimination spécifiques pour prévenir la transmission de maladies infectieuses.

- ✓ **Incinération des Déchets Hospitaliers** L'incinération est une méthode courante pour traiter les DASRI, comme illustré par l'exemple de l'incinérateur Fagor installé en 1985. Cependant, les problèmes techniques, notamment ceux liés au brûleur, peuvent entraîner des pannes fréquentes, compromettant l'efficacité du traitement des déchets. Cette situation souligne l'importance de la maintenance et de la modernisation des équipements utilisés dans le traitement des déchets hospitaliers pour assurer une gestion sécuritaire et efficace.
- ✓ **La gestion appropriée des déchets industriels et hospitaliers** est essentielle pour protéger la santé publique et l'environnement. Elle requiert une infrastructure adéquate, des technologies spécifiques, et une réglementation stricte pour traiter et éliminer ces déchets de manière sécuritaire.

4.5. Déchets Agricoles

Les déchets agricoles proviennent des activités agricoles, incluant les résidus de récolte, les déchets d'élevage, et les produits agrochimiques périmés. La gestion de ces déchets est cruciale pour minimiser les impacts environnementaux de l'agriculture, notamment la pollution des sols et des cours d'eau.

4.6. Déchets Particuliers

Les déchets particuliers en quantité limitée, précédemment désignés sous le terme de DTQD (déchets toxiques en quantités dispersées) et actuellement connus sous les appellations DSM (déchets spéciaux des ménages) et DTQL (déchets toxiques en quantités limitées), comprennent les résidus présentant des risques particuliers pour l'environnement ou la santé. Cette catégorie inclut, par exemple, les peintures, les solvants, les batteries, et les produits chimiques domestiques. La distinction entre ces catégories de déchets est primordiale pour les autorités en charge de leur élimination, en offrant un cadre pour le développement de politiques de gestion adaptées. Cependant, la présence de déchets dispersés dans toutes les catégories souligne le défi transversal que représente la gestion des déchets toxiques et dangereux, nécessitant des efforts coordonnés et des stratégies spécifiques pour leur traitement et leur élimination sécurisée.

4.7. Déchets Inertes (DI)

Les déchets inertes se caractérisent par leur stabilité : ils ne subissent aucune transformation physique, chimique, ou biologique significative. Insensibles à la décomposition, ils ne brûlent pas, ne produisent pas de réactions dangereuses, et ne sont pas biodégradables. Leur inertie garantit qu'ils ne détériorent pas d'autres substances ni ne présentent de risques pour la santé humaine lorsqu'ils entrent en contact avec eux.

4.8. Déchets Fermentescibles

Les déchets fermentescibles sont composés de matières organiques biodégradables telles que les tontes de gazon, épluchures de fruits, déchets de viande, et certains types de papiers, cartons, bois, et textiles naturels. Exclue de cette catégorie, les matières plastiques, bien que potentiellement décomposables sur le long terme, ne sont pas considérées comme fermentescibles.

4.9. Déchets Ultimes

Les déchets ultimes sont le résultat final des processus de traitement qui ne peuvent plus être valorisés ou traités de manière économiquement viable. Ce concept souligne le cycle perpétuel de production de déchets par les déchets eux-mêmes, jusqu'à atteindre un point où aucune valorisation supplémentaire n'est possible.

4.10. Déchets Verts

Les déchets verts proviennent de l'entretien des espaces extérieurs, incluant la tonte de pelouses, la taille de haies et d'arbustes, et d'autres activités similaires. Bien que majoritairement produits par les ménages et les collectivités, les entreprises d'espaces verts et les agriculteurs contribuent également à cette catégorie. Certains déchets verts peuvent être exclus des bio-déchets s'ils sont destinés à la valorisation énergétique.

5. Risques Liés aux Déchets

Les déchets issus de diverses activités humaines, représentent à la fois un risque environnemental et une ressource potentielle. Leur élimination inappropriée peut entraîner une dégradation des paysages, une pollution environnementale, et exposer les populations à des dangers significatifs.

Selon **(Leroy, 1997)** Les déchets dangereux en particulier, présentent des risques pour la santé humaine en raison de leurs propriétés nocives, toxiques, cancérigènes, ou infectieuses, inflammables, mutagènes...etc. **(Desachy, 2001)**.

Les déchets fermentescibles sont une source particulière de préoccupation en raison de leur capacité à héberger et propager des pathogènes. La manipulation de ces déchets, surtout sous forme finement divisée, peut entraîner la libération de micro-organismes dans l'atmosphère, posant des risques pour la santé au sein des unités de traitement. **(Damien, 2006)**

La pollution d'une rivière par un rejet inconsidéré de déchets est bien connue parce que ses conséquences apparaissent sans tarder ; mort des poissons, eutrophisation qui se manifeste par une prolifération des algues liée à l'enrichissement du milieu en élément nutritifs. La pollution des eaux de mer par le déversement de déchets est moins visible **(Desachy, 2001)**.

Bien plus insidieuse est la dégradation de la qualité des eaux souterraines due à l'infiltration qui contribuent à l'alimentation en eau destinée à la boisson. En fait l'eau est le principal vecteur de la pollution générée par les déchets abandonnés ou éliminés dans des conditions écologiques peu satisfaisantes **(Desachy, 2001)**.

Certains déchets sont susceptibles de polluer directement l'air si au contact de l'air ou de l'eau ou d'un acide, ils dégagent un gaz toxique. Mais ils peuvent aussi participer indirectement à la pollution atmosphérique lorsque leur traitement par incinération est réalisé dans des conditions mauvaises **(Desachy, 2001)**.

Alors que la pollution des sols est la moins visible des pollutions ; elle frappe avec retard. Un site pollué est un site dont le sol ou les eaux souterraines ont été pollués par d'anciens dépôts de déchets ou

l'infiltration de substances polluantes, la pollution étant susceptible de provoquer une nuisance ou un risque permanent pour les personnes ou l'environnement (**Desachy, 2001**).

Les déchets des ménages vont encore alimenter les dépôts sauvages, ainsi que les décharges brutes établies et exploitées sans autorisation administrative avec l'accord du propriétaire du terrain, ces lieux sont la source de nuisances esthétiques et visuelles, et participent à la dégradation de nos paysages, avec toutes les conséquences que cela peut entraîner au niveau du tourisme et de la mise en valeur du patrimoine (**Desachy, 2001**).

Cependant les atteintes à la propreté des villes restent perçues de manière très aigue par les habitants. En fait, la population, malgré un comportement parfois négligent tient à la propreté des rues et des espaces publics et se montre reconnaissante des efforts réalisés dans ce domaine par la commune (**Desachy, 2001**).

La production de déchets pose de sérieux problèmes d'élimination compte tenu des quantités en cause et de la toxicité de certains d'entre eux, source de risque pour environnement et pour les individus, elle s'accompagne aussi d'un gaspillage important de matière de devises, d'énergie et de possibilité d'emploi (**Desachy, 2001**).

CHAPITRE 02 :
Compostage et Bio
méthanisation

A/ Compostage

1. Définition de compost

Le compost est un mélange de débris organiques en décomposition et de matières minérales, destiné à nourrir et à alléger le sol qu'il enrichit en humus (**Couplan et Marmy, 2009**).

Pour **Smeesters (1993)**, le compost est une matière brunâtre qui ressemble à de la terre. Il provient de la décomposition contrôlée des matières organiques par des millions d'organismes vivant ; depuis les bactéries microscopiques jusqu'aux vers de terre. Un bon compost provient d'un équilibre entre des matériaux riches en azote et pauvres en carbone (déchets organiques, fumiers), riche en carbone et pauvre en azote (matière végétale sèche, bois broyé) et intermédiaires entre les deux (matière végétale verte) (**Couplan et Marmy, 2009**).

Le compost est le produit stabilisé d'un processus biologique aérobie ou anaérobie de transformation et de valorisation de déchets organiques (biomasse). Au cours du processus de compostage, la matière organique est transformée, principalement par des micro-organismes, en une matière nutritive pouvant être utilisée par les plantes (humus).

1.1 Le compost à base de déchets verts

Le compostage des déchets verts, bénéfique pour l'environnement, offre un débouché à une quantité importante de déchets organiques qui encombrant trop souvent les décharges ou les unités d'incinérations. Dans les biotopes forestiers, feuilles et bois morts s'accumulent et se transforment lentement en un humus qui enrichit les sols et fournit aux plantes les éléments nécessaires à leur croissance. Le compostage des déchets verts recueillis lors de l'entretien des espaces verts des villes et des bourgs consiste à accélérer ce processus naturel en maîtrisant, sur une plate-forme bétonnée ou bitumée, les conditions biologiques indispensables à cette évolution de la matière organique végétale (**Grandeau, 1890**).

1.2 Les avantages du compost

L'utilisation du compost comporte plusieurs avantages parmi lesquels on peut citer :

1.2.1. Amélioration de la croissance des végétaux et racines

Il a été démontré que les végétaux se développant dans un milieu de croissance contenant du compost sont plus forts et ont un meilleur rendement (**Ademe, 2008 ; Ademe, 2001**).

1.2.2. Amélioration du rythme de diffusion des nutriments

Le compost rend au sol ses nutriments prolongeant ainsi leur présence dans le sol pour nourrir les végétaux pendant une plus longue période (**Ademe, 2008 ; Ademe, 2001**).

1.2.3. Amélioration de la porosité du sol

L'activité microbienne est essentielle à la porosité du sol. Les micro-organismes décomposent les matières organiques pour rendre les nutriments accessibles aux végétaux (**Ademe, 2008 ; Ademe, 2001**). L'amélioration de la porosité entraîne également une meilleure aération du sol et ainsi le développement de l'activité biologique.

1.2.4. Amélioration de la capacité de rétention d'eau

La matière organique contenue dans le compost peut absorber l'eau et améliorer ainsi la capacité de rétention d'eau du sol. (**Ademe, 2008 ; Ademe, 2001 ; Zurbrugg et Ahmed, 1999**).

1.2.5. Elimination des maladies chez les végétaux

Il a été démontré que certains composts améliorent la résistance des végétaux vis-à-vis de certaines maladies (**Larbi, 2006**). L'effet phytosanitaire décrit la faculté fongicide du compost.

D'une manière générale le compost contient des substances donnant plus de vigueur aux végétaux et augmentant ainsi leur résistance vis-à-vis de certains organismes pathogènes.

1.2.6. Effet sur la structure du sol

- Amélioration de la structure du sol par augmentation des agrégats (pénétration des racines facilitée et exploitation du sol favorisée);
- Le compost de couleur foncée, augmente l'absorption des rayons solaires (réchauffement). (**Zurbrugg et Ahmed, 1999**).
- Meilleur perméabilité à l'air et à l'eau.
- Réduction importante de l'effet du gel, de l'érosion (hydrique et éolienne) et diminution de la dessiccation par ventilation. (**Guitttonny-Larchevêque, 2004**).

2. Définition du compostage

Le compostage est la transformation d'une matière organique très instable et fortement biodégradable en une matière organique stable (**Leclerc, 2001**). Le compostage est un processus contrôlé de dégradation de constituants organiques d'origine végétale et animale, par une succession de communautés microbiennes évoluant en condition aérobies, entraînant une montée de température, et conduisant à l'élaboration d'une matière organique humifiée et stabilisée. Le produit ainsi obtenu est

appelé compost. Selon (Charnay ,2005), le compostage est un mode de traitement biologique aérobie des déchets.

3. Principe de compostage

Son principe peut être schématisé comme le montre la figure suivante :

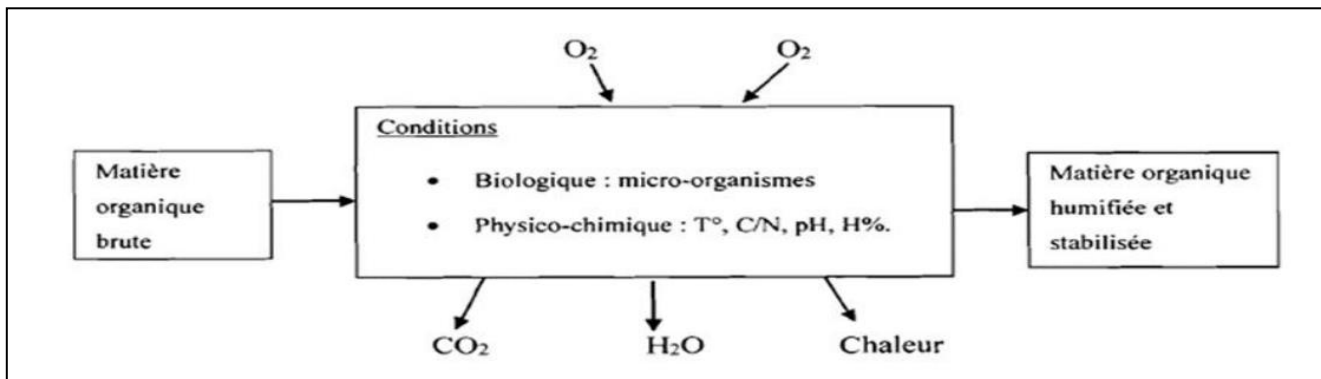


Figure 01. Représentation schématique du principe de compostage (Charnay, 2005).

4. Type de matière à composter (Tableau 2)

Il existe une grande diversité de compost, liée à la nature des déchets compostés, et des procédés de compostage. En théorie, tout déchet organique biodégradable est compostable (Francou, 2003). Ainsi peuvent être compostés des déchets ménagers, des déchets d'origine agricole comme les déjections des animaux auxquels sont ajoutés des résidus végétaux (Berger, 1996), le tout enrichi par des apports minéraux tels que le phosphate naturel, les cendres, la dolomie (Bazie, 1984). Les effluents d'élevage sont constitués le plus couramment de fumier de bovins, mais aussi de fumier d'ovins, de volailles et de Lisier de porcs (Leclerc, 2001).

Tableau 02. Les différentes matières à composter.

Matière à composter	
Matière riche en carbone Les bruns, les matières sèches	Matière riche en azote Les verts, les matières humides
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Feuilles, plantes et fleurs séchées ✓ Brindilles, paille et foin ✓ Marc, filtres de café et sachets de thé ✓ Pâtes alimentaires, pain et riz ✓ Papier (préférable de le recycler) ✓ Serviettes de papier 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Restes de fruits ✓ Restes de légumes ✓ Fumier mature ✓ Coquilles d'œufs ✓ Algues (excellent fertilisant) ✓ Tonte de gazon (en petite quantité)

<ul style="list-style-type: none"> ✓ Écailles de noix et noyaux ✓ Tissu fait de fibres naturelles ✓ Cheveux naturels et ongles Sciure de bois ✓ Terre 	
---	--

Tableau 03. Les différentes matières à ne pas composter.

Matière à ne pas composter
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Cendres de bois. ✓ Chaux. ✓ Briquettes de B.B.Q. ✓ Viandes et poissons. ✓ Huiles (gras). ✓ Os. ✓ Produits laitiers ✓ Excréments d'animaux. ✓ Feuilles de rhubarbe. ✓ Plantes et feuillages malades. ✓ Grande quantité de matières humides.

5. Types de compostage

Il existe deux types de compostage : anaérobie (en l'absence d'oxygène) et aérobie (qui requiert de l'oxygène).

5.1. Le compostage aérobie

Le compostage aérobie à l'inverse du compostage anaérobie se déroule en présence d'oxygène. Le processus entraîne des variations de température (élévation et baisse) et conduit à l'élaboration d'une MO humifiée qui est le compost. C'est un produit stable qui présente peu de risques de phyto-toxicité. La chaleur générée détruit les germes pathogènes et les germes des graines d'adventices. La figure 1 schématise le processus de compostage aérobie selon (Charnay ,2005).

Deux phases se succèdent dans ce processus de compostage :

- La phase de dégradation qui conduit les matériaux organiques à l'état de compost frais. C'est une dégradation aérobie intense
- La phase de maturation qui transforme le compost frais en un compost mûr, riche en humus.

❖ **Dégradation**

C'est une phase de forte activité biologique (bactéries et champignons) durant laquelle la température augmente fortement.

Les composés les plus dégradables tels les sucres, les acides aminés libres et l'amidon sont d'abord consommés.

La température monte rapidement à 40°C - 45°C, suite à la respiration de microorganismes mésophiles aérobies.

La respiration élève ensuite progressivement la température jusqu'à 60°C - 70°C, ce qui conduit au remplacement des micro-organismes mésophiles par des thermophiles et des thermo-tolérants.

La biomasse originelle diminue par trois en cours de compostage, par minéralisation de la matière organique en CO₂, et par des pertes d'eau importantes par évaporation.

La dégradation est souvent appelée « fermentation » mais cette appellation n'est pas scientifiquement correcte, car les fermentations, au sens strict, se déroulent en milieu anaérobie.

❖ **Maturation**

Pendant la phase de maturation, la chaleur diminue pour se stabiliser au niveau de la température ambiante.

La quantité de matière facilement utilisable par la microflore est raréfiée, suite à la phase de dégradation. On assiste alors à la disparition des micro-organismes thermophiles, au profit d'espèces plus communes et de nouvelles espèces mésophiles.

Le compost entre dans une phase de maturation constructive (longue période de mûrissement), pendant laquelle apparaissent lentement des éléments précurseurs de l'humus.

La transition entre chacune des deux phases du processus de compostage, résulte d'une évolution continue. Il n'y a pas de frontière marquée entre les espèces mésophiles et thermophiles. Chaque espèce possède une gamme de températures vitales avec son optimum physiologique.

Tableau 04. Conditions opératoires nécessaires pour une mise en œuvre optimale d'un procédé de compostage (**Humeau et Le cloirec, 2006**).

Conditions opératoires	Fermentation aérobie	Maturation
Température	60 à 70 °C	20 à 30°C Teneur
Teneureneau	60 à 80 % de la masse brute	40 à 60% de la masse brute
Ph initial de la matière	6 à 8	7à 8
C/N	20 à 30	-
Temps de biodégradation	4 à 6 semaines	1 à 3 mois
Besoins en air	0.1 à 1 Nm ³ /min	< 0.1 N m ³ / min

❖ Les produits

Le compost obtenu après compostage en milieu paysan est un produit dont il est difficile d'apprécier correctement la maturité et la qualité avec exactitude car la décomposition se poursuit toujours après son application au champ (**Mustin, 1987**). Sur le terrain, la maturité du compost peut-être appréciée à travers sa couleur noirâtre et homogène, la non reconnaissance à l'œil nu des constituants d'origine et une température inférieure à 40°C (**Karambiri, 2007 ; Dol et DVRD, 2007**). Au laboratoire, les paramètres comme le pH (autour de 7), le taux d'humidité « 50 %), la température « 40°C) et le rapport C/N (10 à 15) permettent d'apprécier la maturité du compost (**Mustin, 1987 ; Misra et al, 2005 ; Charnay, 2005**).

5.2. Le compostage anaérobie (digestion anaérobie)

Le compostage anaérobie ou **biométhanisation** est un procédé biologique de traitement des résidus solides et liquides en l'absence d'oxygène dans des cuves de fermentation. Il consiste à la dégradation par de microorganismes anaérobies dans un milieu saturé d'eau. Il se forme du biogaz et de l'engrais organique. Au cours du processus, il y'a élaboration de composés intermédiaires comme le méthane, les acides organiques, du sulfure d'hydrogène et d'autres substances (**Misra et al, 2005 ; Chauvin, 2007**).

❖ Les coproduits :

1. Le biogaz

Le méthane et le gaz carbonique sont les composants essentiels du biogaz, mais il contient également en très faibles proportions de l'azote, de l'hydrogène, du monoxyde de carbone et de l'hydrogène sulfuré. Produit en milieu humide, le biogaz est par ailleurs saturé d'eau en sortie de digesteur.

La richesse du biogaz en méthane, qui conditionne son utilisation comme combustible ou comme carburant, est fonction de la nature du substrat digéré et s'exprime en fraction volumique (%). Plus riche en méthane (65 à 70%) lorsque le substrat est riche en azote comme dans le cas des déchets d'élevage et de certains effluents agro-industriels, la richesse diminue par contre (50 à 60%) pour les déchets végétaux et les ordures ménagères, plus pauvres en azote.

Le pouvoir calorifique d'un combustible représente la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète de l'unité de quantité de ce combustible. On l'exprime à travers le Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) lorsque l'eau produite par cette combustion reste à l'état de vapeur, ce qui est le cas de la plupart des équipements classiques d'utilisation du biogaz (brûleurs, moteurs à combustion). Le PCI du biogaz dépend de sa teneur en méthane, il est exprimé en kWh/m³ ou kWh/kg. Les principales caractéristiques comparées du biogaz, du méthane et de quelques combustibles ou carburants classiques sont données **tableau 05**.

Tableau 05. Caractéristiques comparées du biogaz et de quelques combustibles ou carburants
(Théoleyre M.A., Héduit M., 1986).

Caractéristiques moyennes	Biogaz (60% CH ₄)	Méthane	Butane	Gaz naturel	Essence
PCI (kWh/kg)	4,89	13,70	13,56	13,61	12,78
Masse volumique (gaz - kg/Nm ³) (liquide - kg/l)	1,22	0,72	1,88	0,74	0,72
Densité par rapport à l'air	0,94	0,55	2,01	0,57	-
Limites d'inflammabilité dans l'air (%)	8 - 20	5 - 15	1,8 - 9	5 - 14	-

Le potentiel de production de biogaz est variable selon les déchets. Pour les effluents liquides, on peut considérer un rendement théorique de 350 l CH₄/kg DCO dégradé (DCO : demande chimique en oxygène). Pour les déchets solides, le rendement maximum est de 1100 l CH₄/kg MO dégradée (MO : matière organique).

Dans la plupart des cas, le biogaz peut être utilisé en l'état, sans être préalablement épuré. Les appareillages classiques ne nécessitent pas une pression d'alimentation élevée aussi le stockage à basse pression est généralement suffisant lorsque les distances de distribution du biogaz ne sont pas trop élevées

❖ **Le résidu ou digestat**

Après digestion anaérobie, une partie plus ou moins importante de la matière organique a été transformée en biogaz, tandis que les éléments minéraux sont conservés et synthétisés en partie par la flore microbienne. Par rapport à la matière sèche initiale, du fait de la perte de carbone, le résidu méthanisé sera donc enrichi en éléments minéraux avec un rapport C/N réduit. La majeure partie de l'azote sera minéralisée et réduite sous forme d'ammoniaque. Le résidu sera de plus désodorisé et plus stable, donc stockable avec moins de nuisances. La digestion anaérobie en mésophile permet de plus une réduction notable des parasites et bactéries pathogènes. En thermophile, le résidu est exempt des principaux germes pathogènes.

Le résidu peut être utilisé directement comme fertilisant organo-minéral. C'est le cas, à très grande échelle, des lisiers méthanisés en Chine et en Inde. Pour les déchets solides, le résidu subit la plupart du temps un compostage aérobie complémentaire pendant plusieurs mois afin de parfaire sa maturation. Le compostage mixte anaérobie puis aérobie a l'avantage, outre la production de biogaz, de permettre le compostage direct des déchets à forte humidité sans apport d'éléments structurants. C'est notamment le cas avec des déchets d'abattoir.

6. Phases du compostage (Francou, 2003)

Le processus de compostage se déroule en quatre phases en fonction de l'évolution de la température

□ **La phase mésophile** : c'est la phase initiale du compostage. Durant les premiers jours la présence de matières organiques facilement biodégradables (les sucres, les glucides, les lipides) entraîne une forte activité microbienne générant une rapide montée en température à l'intérieur du compost.

- **La phase thermophile :** on observe une montée de la température allant de 60°C à 75°C. Seules les bactéries peuvent survivre à ces températures. La grande partie de la matière organique est perdue sous forme de CO₂ et H₂O.
- **La phase de refroidissement:** elle est caractérisée par une diminution de la quantité de matières organiques facilement dégradables provoquant un ralentissement de l'activité microbienne. Ceci favorise un refroidissement du compost.
- **La phase de maturation:** les processus d'humification prédominent ainsi que la dégradation lente des composés résistants. Cette phase de maturation dure jusqu'à l'utilisation du compost.

7. Facteurs de réussite du compostage

Selon **Guet (2003)** Pour le compostage, les principaux paramètres d'importance pratique sont :

7.1. Aération

Dans toute fermentation aérobie, les organismes ont besoin d'oxygène pour oxyder les matières organiques. Ce besoin est maximal au départ et diminue progressivement au cours du temps.

7.2. Humidité

Nécessaire à la vie des micro-organismes, le produit de départ ne doit être ni trop humide, ni trop sec (apparition de feutrage gris ou blanchâtres caractéristiques des composts trop secs).

7.3. Température

Dès le début du compostage, la température s'élève rapidement. En effet, les dégradations aérobies dégagent de la chaleur.

B/ Bio-méthanisation

1. La méthanisation

La bio-méthanisation, aussi appelée méthanisation ou digestion anaérobie, est la décomposition en l'absence d'oxygène de la matière organique. C'est un processus naturel fait par diverses populations de micro-organismes présents dans une multitude d'environnements. Dans la nature, on peut observer ce phénomène partout où il y a de la matière organique et une quantité insuffisante d'oxygène, comme dans les marais, les rizières et même dans le système digestif des mammifères et des insectes. Cette dégradation produit le biogaz, un gaz similaire au gaz naturel, formé principalement de méthane et de CO₂ (**Görish et Helm, 2008**).

Ce processus métabolique est l'un des plus anciens à être développés par les organismes. Il devait être présent il y a longtemps, lorsqu'il n'y avait pas massivement d'oxygène dans l'atmosphère et que la Terre était un milieu essentiellement réducteur (**Godon, 2008**). Des études estiment l'apparition des organismes méthanogènes entre -4,11 et -3,78 milliards d'années passées (**Braumanet al, 2008**).

La production de méthane à partir de la matière putrescible est connue depuis des siècles. Vers 1630, Van Lemond découvre que la fermentation de la matière organique dégage un gaz inflammable (**Amarante, 2010**). En 1776, Alessandro Volta démontre que le gaz émis par les marais est combustible. En 1787, Lavoisier prouve que ce Gaz inflammable est le « gashydrogeniumcarbonatrum », c'est-à-dire le même gaz qui sera appelé, à partir de 1865, méthane (**Moletta et Verstraete, 2008**). C'est probablement à cause de cette origine que le méthane est aussi connu comme « gaz des marais ». Si cette émission de CH₄ dans les marais est connue depuis longtemps, le rôle des micro-organismes dans ce processus n'a été découvert que bien plus tard. D'ailleurs, la compréhension complète de ce processus est, encore aujourd'hui, loin d'être achevée (**Godon,2008**).

Outre son importance comme gaz combustible, le méthane est aussi un très important gaz à effet de serre (GES). Avec un temps de résidence d'environ 12 ans dans l'atmosphère et une concentration, en 2005, de 1,774 ppm, il est considéré comme le deuxième gaz responsable du réchauffement du globe, tout de suite après le CO₂(**Solomon et al, 2007**).Il est important de souligner qu'un kilogramme de méthane a une influence 21 fois plus importante qu'une même quantité de CO₂ pour le réchauffement climatique (**Olivier, 2009**).Le méthane atmosphérique a une origine essentiellement biologique, soit naturelle ou provoquée par l'homme. De 70 à 80 % des émissions totales de ce gaz sont causés par des microorganismes, dont les sols inondés et l'élevage sont les principaux responsables. Les 20 à 30 %

restants proviennent de l'exploration et de l'utilisation de Combustibles fossiles, de la combustion de biomasse et des fuites de méthane géologique par fissures ou par volcans.

Les sources anthropiques représentent de 60 à 70 % des émissions globales. L'agriculture est l'activité la plus importante, étant responsable pour 20 à 50 % des émissions à cause des élevages des ruminants et des rizières (**Brauman et al, Denman et al, 2007**).

L'exploration minière, de pétrole et de gaz, contribue pour 10 à 20 % du total de méthane atmosphérique (**Denman et al, 2007**).

Quant aux déchets, ils ont une contribution allant jusqu'à 5 % des émissions mondiales de GES. De cette quantité, le méthane émis par des sites d'enfouissement est la source la plus importante, suivie par les émissions de ce gaz dues aux eaux usées. Dans ce calcul ne sont pas prises en compte les émissions causées par le transport des matières, mais seulement par les gaz émis directement par les rejets (**Bogner et al, 2007**).

En complément à ces formes naturelles de bio-méthanisation, depuis plusieurs décennies, l'intérêt pour le processus de méthanisation a pris de l'ampleur comme traitement des résidus et pour l'obtention d'énergie. On peut citer, comme exemple, l'utilisation des digesteurs appelés « Ducellier et Isman » pour le traitement des déchets agricoles et d'élevage en France dans les années 40 (**Moletta et Verstraete, 2008**).

Selon de (**La Farge ,1983**), lors de la Deuxième Guerre mondiale, près de 1 500 digesteurs de ce type ont été construits au pays, mais ont été abandonnés à cause des énergies fossiles à bon marché.

Le choc pétrolier des années 1970 a incité de nouveau au développement de cette filière et, après les années 1990, le recours au biogaz comme source d'énergie par les pays d'Europe

C'est de plus en plus répandu. À partir de cette date, les installations de méthanisation ont pris la forme d'installations industrielles, avec le traitement de plusieurs substrats. Maintenant, non seulement les résidus fermiers sont visés, mais aussi les boues municipales, les ordures ménagères et les résidus industriels (**De La Farge, 1995**).

2. La conversion de la matière organique

La mise en œuvre de la méthanisation dans un réacteur a pour but de convertir cette matière, qu'elle soit sous forme soluble ou particulièrement solide en biogaz. A l'entrée du procédé, Cette matière est un

des composants d'une matrice, qu'elle soit liquide (effluent) ou solide (déchet). Les autres composants de la matrice sont l'eau et les matières minérales

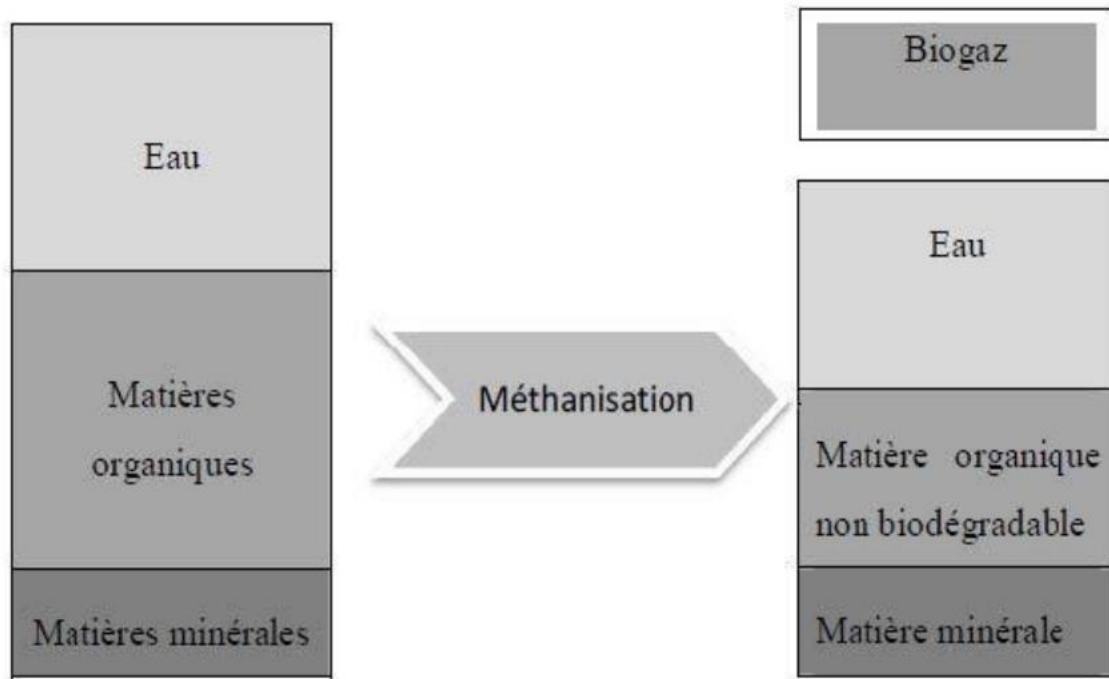


Figure 02. Schéma global du bilan de la méthanisation (**René Moleta, 2009**).

3. Les étapes de la digestion anaérobie

La digestion anaérobie se déroule selon une succession de quatre étapes distinctes, chacune avec sa population microbienne caractéristique. Les extrants produits par chaque population deviennent les intrants pour la population suivante. De cette façon, les molécules complexes sont métabolisées jusqu'à leur minéralisation, c'est-à-dire leur transformation en méthane et en CO₂. Ces étapes sont : l'hydrolyse, l'acidogénèse, l'acétogénèse et la méthanogénèse (**Godon, 2008 ; Rapport et al, 2008**).

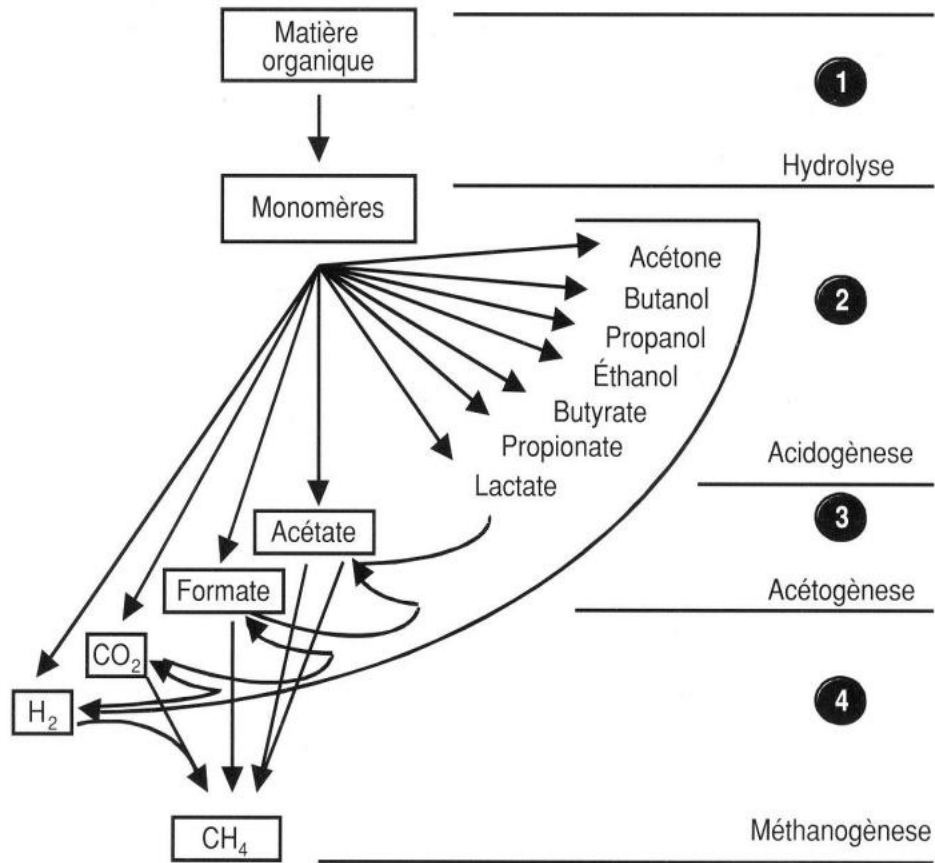


Figure 03. Grandes étapes de la digestion anaérobie (Amarante, 2010).

3.1.L'hydrolyse

Lors de l'hydrolyse, les macromolécules organiques sont transformées en produits plus petits. En ce sens, les composés de haut poids moléculaire, comme les polysaccharides, les lipides, les protéines et les acides nucléiques, sont convertis en substances simples. Cela donne origine aux monosaccharides, comme le glucose, aux acides gras, aux acides aminés et aux bases azotées (Amarante, 2010).

3.2.L'acidogénèse

Dans l'acidogénèse, les monomères de l'étape antérieure sont convertis en acides gras volatils, en alcools, en acides organiques, en hydrogène et en CO₂. C'est une phase qui se déroule entre 30 et 40 fois plus rapidement que l'hydrolyse. À la fin s'y retrouvent l'éthanol et les acides acétique, propionique, butyrique, valérique et lactique (Amarante, 2010).

3.3.L'acétogénèse

L'acétogénèse unifie et simplifie la filière chimique, car les substances originaires des processus antérieurs y sont transformées en acétate, en H₂ et en CO₂. Cette étape précède celle de la méthanogénèse (Amarante, 2010).

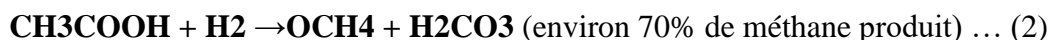
3.4. La méthanogénèse

C'est la dernière étape de la minéralisation des substances organiques. Ici, les acétates, les formates, le H₂ et le CO₂ sont transformés en Méthane. Habituellement, cette phase est la plus délicate de la digestion anaérobie, parce que les organismes méthanogènes sont plus sensibles aux variations de pH et ont un taux de croissance plus lent que celui des organismes des autres étapes (Amarante, 2010)

A- De réduction du CO₂ :



B- De décarboxylation de l'acide acétique :



C'est le processus de méthanisation qui se résume en quatre grandes phases se déroulant en même temps dans le méthaniseur : l'hydrolyse, l'acidogènes, l'cétogénèse et la méthanogènes. Celui-ci doit être régulièrement contrôlé, car de nombreux paramètres doivent être réunis pour assurer une transformation optimale de la matière organique (température, pH, taux de charge organique, nutriments, mixage...) ; un équilibre doit être maintenu continuellement par l'exploitant au sein de cette chaîne de dégradation (Kherbouche, 2005).

3.5. Autres réactions

D'autres réactions se déroulent durant la digestion anaérobie, en utilisant les substances non carbonées pour les réactions. C'est le cas de l'utilisation des sulfates comme source d'énergie pour l'oxydation des acétates, de l'éthanol, du propionate et du butyrate. Ces réactions créent l'ion hydrogènesulfure HS⁻ comme sous-produit. De plus, des réactions d'oxydation de l'ammonium et de dénitrification peuvent se produire en milieu anaérobie, dégageant l'azote moléculaire N₂. Finalement, certaines molécules xénobiotiques, des micropolluants, peuvent être hydrolysées en conditions anaérobies, ce qui fait de ce processus une étape importante pour le traitement de la pollution récalcitrante (Amarante, 2010).

4. Les produits de la méthanisation

Lors de la transformation de la matière organique, la digestion anaérobie produit le biogaz et le digestat – la partie résiduelle du processus. Si le biogaz a une importante fonction comme source d'énergie, le digestat, quant à lui, peut être utilisé comme amendement des sols.

4.1. Biogaz

4.1.1. Composition du biogaz

La composition du biogaz varie selon les matières digérées et le temps de traitement. Habituellement, la concentration de méthane se situe entre 50 et 80 %, 60 % étant la valeur la plus fréquemment rapportée par les usines. En plus du méthane, l'autre gaz principal formé est le CO₂. Les gaz présents en faibles concentrations sont le H₂S, le NH₃ en plus de la vapeur d'eau jusqu'à son point de saturation. Ces derniers gaz doivent être traités selon l'utilisation prévue pour le biogaz afin de ne pas endommager les équipements. Le tableau 01 indique la composition moyenne du biogaz (Amarante, 2010).

Tableau 06. Indice de la composition moyenne du biogaz (Amarante, 2010).

gaz	Ch ₄	Co ₂	H ₂ s	Nh ₃	H ₂ o
concentration	55-80%	20-45%	0-1.5%	0-0.5%	Saturé

4.1.2. Utilisation du biogaz

❖ Production d'électricité et/ou de chaleur

Pour la production de l'électricité et de la chaleur, les moteurs et les turbines de cogénération sont généralement employés (Marchaim, 1994; Bertolini, 2005). Les moteurs sont dotés d'échangeurs thermiques et peuvent atteindre un rendement énergétique global de l'ordre de 80%. Ils nécessitent, cependant, des maintenances plus ou moins lourdes selon les concentrations d'impuretés dans le biogaz. Les turbines sont plus stables aux fluctuations de la charge et tolèrent des faibles proportions en méthane (Saber, 2013).

❖ **Injection dans le réseau de gaz naturel**

Le biogaz doit répondre aux normes appliquées sur le gaz naturel. Toutes les impuretés présentes dans le biogaz (CO₂, H₂O, H₂S, composés organohalogénés, etc.), doivent être réduites à des teneurs très faibles (**Saber, 2013**).

❖ **Utilisation comme biocarburant pour véhicules et pour piles à combustible**

En plus d'une pureté similaire à celle du gaz naturel, le biogaz nécessite une compression supplémentaire à 200 bars avant son utilisation comme carburant automobile (**Saber, 2013**), pour les piles à combustible (**Sigot, 2014**).

❖ **Valorisation en chaudière**

L'utilisation du biogaz en chaudière est le moyen de valorisation le plus simple et le moins coûteux. Le biogaz peut comporter un faible taux de méthane mais un minimum de 50% est recommandé pour un bon fonctionnement de l'installation. En général, seule une déshydratation du biogaz est nécessaire. La chaleur de combustion peut servir pour la production d'eau chaude, de vapeur ou bien dans des fours de procédés industriels. Par contre, cette chaleur est produite en continu toute l'année, il est donc nécessaire d'avoir une utilisation de chaleur importante et régulière sur l'année (**ADEME,2010**).

4.1.3. Epuration du biogaz

A la sortie du digesteur, le biogaz renferme, outre le méthane, des quantités appréciables de gaz carbonique et d'hydrogène, des traces d'azote, d'oxyde de carbone, sulfure d'hydrogène, d'ammoniac ainsi que hydrocarbures et de l'eau.

L'épuration du biogaz permet de (**A.Touzi, S. Igoud**) :

- Améliorer le calorifique
- Diminuer le volume stockage
- Supprimer l'effet corrosif dû à la présence de l'"H₂S, CO₂ et l'"H₂O
- Supprimer les mauvaises odeurs dus à la présence d'"H₂S

L'épuration consiste en l'élimination principalement de trois composées (**A, Demeyer, F. Jacob, M. Jay, G. Menguy et J. Perrier**) le gaz carbonique, le sulfure d'hydrogène et l'eau.

Il y a plusieurs façons de purifier le biogaz. Parmi les procédés de traitement du biogaz, la plus poussée est celle qui consiste à l'épurer de façon à atteindre les normes du gaz naturel. L'épuration du biogaz pour atteindre les normes du gaz Natural peut s'effectuer de différentes manières : absorption dans une liquide ; adsorption sur un solide, etc.

La présence d' H_2S dans le biogaz le rend corrosif pour les métaux. La combustion de l'hydrogène sulfure produit de l'acide sulfurique, composé très corrosif pour les appareils de chauffage, les cuisinières, les moteurs, etc. **(B.D La Farge)**

L'épuration de sulfure d'hydrogène peut se faire par un passage sur de la limaille de fer, cette technique est simple à mettre en œuvre : il s'agit de faire circuler le gaz à travers une masse épurant d'oxyde de fer. La régénération du produit est possible mais délicate à réaliser. On peut également faire l'épuration de l' H_2S en le piégeant dans l'eau et de la chaux.

On peut aussi éliminer le sulfure d'hydrogène et même le gaz carbonique par lavage à l'eau. Le CO_2 et l' H_2S sont très solubles, dans l'eau, le CH_4 est peu soluble. La solubilité des gaz dans l'eau croît lorsque la pression augmente et quand la température diminue. Un laveur est généralement constitué de deux étages, un pour l'épuration de gaz, et l'autre pour la régénération de l'eau par aération. La mise au point de ces appareils est assez délicate ; car il faut déterminer les débits de gaz ; d'eau ; le volume du laveur et la qualité du garnissage utilisé. Il est préférable que la pompe de recyclage de l'eau de lavage soit en acier inoxydable sous peine d'être très rapidement corrodée **(B.D La Farge)**

Quant à l'épuration de l'eau, elle peut se faire par condensation, c'est au niveau du gazomètre de stockage qu'elle peut intervenir. Mais on peut faire cette déshydratation par passage du gaz dans une colonne sèche remplis de chlorure de calcium ou de chaux vive.

4.1.4. Les caractéristiques du biogaz

Tableau 07. Les caractéristiques du biogaz et du méthane déterminé à $0^\circ C$ et 1atm **(B. D La Farge, 1995).**

Caractéristique	Méthane (100% CH_4)	Biogaz (70%)
PCI (kWh)	9,94	6,96
Densité/air	0,55	0,85
Vitesse de déflagration (m/s) Limites	0,38	0,21
d'inflammation (%) Potentiel de combustion	5 – 15 54,55	6 – 18 24,71

Il est évident que le pouvoir calorifique du biogaz est également proportionnel à sa teneur en méthane comme l'indique le tableau suivant :

Tableau 08. Pouvoir calorifique du biogaz en fonction de la proportion de méthane (**De La Farge, 1995**).

Proportion en CH4 (%)	PCS (KWh / m3)	PCI (kWh / m3)
50	4,8	4,3
60	5,7	5,1
70	6,7	6,0
80	7,6	6,9
90	8,6	7,8
100	9,5	8,6

A titre indicatif, le pouvoir calorifique d’1m3 de biogaz (contenant 70% de méthane et 30% de gaz carbonique), peut être comparé à celui d’autres combustibles ou d’autres sources énergétiques (**A, Demeyer et al., 1980**).

4.1.5. Valorisation énergétique du biogaz

Le biogaz est utilisé en tant que combustible ou carburant pour éviter le rejet à l’atmosphère du méthane, gaz participant à l’effet de serre. Il peut servir à la production de la chaleur ou de l’électricité ou les deux à la fois (cogénération). Par ailleurs, il peut aussi être injecté dans les réseaux locaux de gaz naturel. Les quantités de biogaz récupérées lors du traitement des effluents sur les installations anaérobies peuvent être importantes et l’économie énergétique non négligeable (**Z. Jin Bai, 2011**).

4.1.6. Le stockage du biogaz

A l’échelle de la ferme, le biogaz peut être stocké dans des gazomètres à basse pression, soit à l’eau (type cloche), soit sec (type ballon gonflable). A l’échelle industrielle, le méthane peut être liquéfié et transporté en l’état (méthanier) ou mis en réserve dans des poches souterraines, tout comme le gaz naturel (**A, Demeyer et al, 1980**).

4.2. Digestat et éluât

Le digestat est un résidu semblable à l’humus, partiellement stable et riche en composants organiques. Dans le cas de l’utilisation des intrants solides pour la biométhanisation, il a, à la sortie du digesteur, une consistance pâteuse et émet souvent des odeurs désagréables.

L'excès de liquide peut être extrait pour réalimenter le système en eau et en microorganismes spécialisés et/ou pour minimiser les quantités de matières à être transportées. Dans plusieurs cas, la fraction solide du digestat est ensuite compostée et le résultat utilisé comme amendement des sols. La partie liquide, l'éluât, peut être utilisée directement comme fertilisant liquide à cause de sa richesse en éléments nutritifs

Une autre possibilité d'utilisation du digestat est sa combustion dans les fours des cimenteries ou des centrales thermiques. Selon (**Camacho et Prévôt, 2008**), le digestat séché – avec une siccité de 90 % – à un pouvoir calorifique de 3 500 kcal/kg.

En plus, ces matières peuvent être considérées comme étant une source d'énergie renouvelable donc carboneutre. Une grande partie des pathogènes présents dans le digestat est éliminée dans les digestions thermophiles où les réactions se produisent à des températures plus élevées. Dans le cas des systèmes à températures moyennes, de longs temps de séjours sont habituellement suffisants pour leur inactivation.

De plus, des traitements additionnels peuvent être mis en place avant ou après la digestion anaérobie afin d'assurer une absence de microbes pathogènes viables dans le digestat (**Amarante, 2010**).

5. Facteurs affectant la stabilité du processus de biogaz

Les facteurs affectant la production de biogaz sont principalement basés sur les conditions opératoires ainsi que l'alimentation du digesteur. Les conditions de fonctionnement telles que le pH et la température influencent directement les micro-organismes. Les perturbations par l'alimentation incluent la composition et la concentration de déchet, et les composés toxiques et les inhibiteurs.

5.1 Le substrat

Le type et la composition du substrat déterminent directement le rendement de biogaz. En anaérobie le substrat d'alimentation est souvent mesuré en termes de la demande chimique en oxygène totale (DCO) ou en termes de solides volatils totaux (SV).

Un lisier de porc ou un effluent de volaille donnera un gaz beaucoup plus riche en méthane qu'un fumier moins riche en azote obtenu à partir d'un élevage bovin. Ainsi le rapport C/N caractéristique de chaque substrat est un facteur de la composition du biogaz obtenu. Plus celui-ci est petit et plus le biogaz résultant est riche en méthane. Or, une forte augmentation de l'apport en azote peut mener à une production accrue d'ammoniac, ce qui peut nuire aux microorganismes et inactiver la méthanisation (**de La Farge, B**).

Des études indiquent que la proportion désirable se situe entre 20 et 30, 25 étant le ratio idéal (**Ostrem, K. GreeningWaste**)

De plus, selon la qualité du substrat, le gaz obtenu sera plus ou moins riche en Hydrogène sulfuré (H₂S), qui est mélangé à l'eau et au dioxyde de Carbone rend le biogaz très corrosif.

Tableau 9. Proportion de H₂S dans le biogaz selon le type de substrat (Aile, Solagro, Ademe, Trame. 2006)

Types de substrat	Proportion de H ₂ S dans le biogaz
Fumier bovin	Moins de 0,3 %
Lisier de porc	De l'ordre de 0,7 %
Fientes de volailles	Proche de 1 %

Les caractéristiques du substrat utilisé pour la méthanisation s'avèrent donc être des paramètres importants de la valorisation énergétique de celle-ci. Il ne faut pas oublier que les caractères physiques du substrat (état, température, viscosité, ...etc) jouent beaucoup dans 25 l'élaboration du procédé. Il faudra ainsi tenir compte de ces considérations pour le choix du système et adapter celui-ci aux différents paramètres du substrat valorisé.

5. 2 La température

La température a un effet direct sur les propriétés physico-chimiques de tous les composants dans le digesteur et affecte aussi la thermodynamique et la cinétique des processus biologiques.

Comme pour les autres processus biochimiques, l'élévation de la température engendre une augmentation de l'efficacité de la méthanisation. Le maintien de la température dans une de ces plages est essentiel pour l'efficacité du processus (Ostrem, K. GreeningWaste).

5. 3 Le pH

Le pH est un des paramètres les plus importants pour la méthanisation et un contrôle accru de sa variation est fondamental pour le bon fonctionnement des réacteurs. Un pH stable indique un système en équilibre et une méthanisation performante. En revanche, des variations du pH, plus souvent sa diminution, sont signes de problèmes. Les bactéries méthanogènes sont très sensibles aux variations du pH : de petites altérations peuvent même menacer la production du gaz. À cause de cela, le contrôle de l'alcalinité est important afin de maintenir le pH dans les valeurs voulues (Bernet, N. et Buffière). Si la plage de fonctionnement acceptable d'un réacteur se situe entre 5,5 et 8,5, les valeurs idéales pour les

microorganismes méthanogènes varient entre 7,0 et 7,2. La chute du pH en dessous de 5,0 est mortelle pour ces organismes (**Ostrem, K. GreeningWaste**) et même des valeurs proches de 6,0 causent souvent un arrêt du procédé.

Comme la digestion anaérobie est une séquence de réactions, chacune ayant des sous-produits différents, les uns peuvent influencer négativement les autres. Une surproduction des acides volatils par les organismes acidogènes peut mener à une baisse du pH et, conséquemment, à une inhibition de la méthanogène. Cela peut être une situation causée par un grand apport de matières fraîches au digesteur. En revanche, une surconsommation des acides pour la formation de méthane peut engendrer une augmentation du pH et un ralentissement de l'acidogène.

5.4 Degré d'humidité

L'humidité a une grande influence sur l'action des bactéries, principalement dans le cas où ces valeurs sont basses. Des études montrent que des taux d'humidité supérieurs à 60 % augmentent la production de gaz, qui atteint un maximum environnant 80 %. Au-delà de cette concentration, la production se stabilise dans ce plateau élevé. Ce principe est utilisé dans quelques lieux d'enfouissement, par la recirculation du lixiviat, pour accélérer la méthanisation des matières putrescibles et pour augmenter la production de biogaz (**Bernet, N. et Buffière**).

5.5 Composés toxiques ou inhibiteurs

Les composés inhibiteurs sont l'un ou l'autre présent déjà dans le substrat ou produit pendant la dégradation. La plupart des inhibiteurs sont formés pendant la dégradation du substrat, tels que l'AGV, l'ammoniac et le sulfure. Quelques inhibiteurs sont présents déjà en substrat, tels que les métaux lourds.

- **Ammoniac (NH₃)** : l'ammoniac en concentrations au-delà de quelques grammes par litre peut inhiber la phase méthanogène de la digestion anaérobie. Ces concentrations de NH₃ peuvent être causées par un apport élevé de matières riches en protéines, comme les restes d'élevage et les déchets agroalimentaires (**Bernet, N. et Buffière**). Par contre, une adaptation des microorganismes à des doses plus élevées d'ammoniac, allant jusqu'à 5 g/l, peut être développée naturellement (**B.D La Farge**).
- **H₂S** : des substrats riches en protéines soufrées et en sulfates peuvent mener à une augmentation de la production de H₂S. Il est également toxique pour les microorganismes méthanogènes, en plus d'être corrosif pour les matériaux. La précipitation de certains cations avec les sulfures

dissouts peut causer une carence d'éléments essentiels tels le nickel et le cobalt (**Bernet, N. et Buffière**).

- **Substances toxiques** : les hydrocarbures aliphatiques chlorés et les acides gras à longue chaîne sont les substances organiques les plus toxiques pour la digestion anaérobie. À propos des éléments inorganiques, les plus toxiques sont les cations comme le sodium (Na⁺), le potassium (K⁺) et les métaux lourds comme le cuivre, le nickel, le zinc et le plomb, en plus du NH₃ et du H₂S.

6. Les avantages de la bio-méthanisation

(FAQ – bio-méthanisation : version octobre 2012 rédigée par Edora et Valbiom 3) Outre le fait que la bio-méthanisation est une source importante de production d'énergie, elle répond également à des considérations relatives à la gestion des déchets et à l'environnement.

La bio-méthanisation se décline aujourd'hui sous de multiples solutions environnementales :
Le traitement des déchets.

- ✓ La valorisation de sites pollués.
- ✓ La réduction des émissions de gaz à effet de serre (CH₄, CO₂).
- ✓ La production de fertilisants naturels peu énergivores plus rapidement assimilables.
- ✓ La production d'énergie (production Méthane CH₄) exploitable sous différentes

Formes :

- Production d'énergie thermique.
- Production d'énergie électrique.
- Production de carburant.

La production d'énergie renouvelable pouvant être :

- ✓ Stockée.
- ✓ Transportée sans pertes.
- ✓ Utilisée et transformée dans des lieux et à des moments différents de la production.
- ✓ La valorisation de ressources disponibles et parfois mal valorisées.
- ✓ La diversification des activités agricoles.

7. Combien de biogaz puis-je récupérer avec mes rejets organiques ?

Il est très difficile de fournir une réponse à cette question, car les substrats sont très nombreux et les paramètres (% M.S., %M.O.) peuvent être différents pour un même substrat. A titre d'information,

voici, selon le vademécum du facilitateur bio-méthanisation, quelques-uns des substrats les plus fréquents dans notre région.

(FAQ _ Bio-méthanisation : version octobre 2012 rédigée par Edora et Valbiom

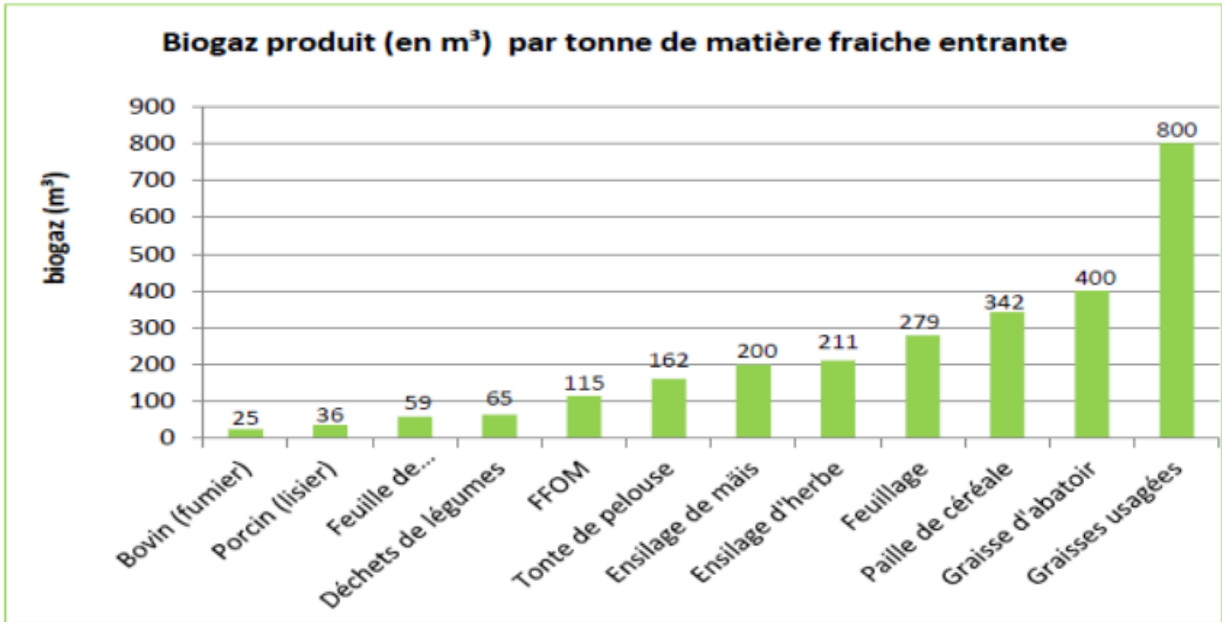


Figure 04. Biogaz produit (en m³) par tonne de matière fraîche entrante.

Chapitre 03 : Matériels et méthodes

1. Introduction

Dans ce chapitre, nous nous efforcerons de présenter une conception d'un système de compostage-bio-méthanisation utilisant différents types de déchets afin de générer une production de biogaz

2. Le digesteur utilisé

* Prenant soin de ne pas fuite.



Figure 05. Tuyau en plastique.



Figure06. Balance Électronique.



Figure 07. La colle.



Figure 08. Chignole.



Figure 09. Le digesteur utilisé.

2.1 Expérience : La production du biogaz

2.2 Expérimentation sur le terrain

Lieu :

Salle R1, Faculté des Sciences Agronomiques, Université 20 août 1955-Skikda

Coordonnées : 36.850048, 6.894597



Figure 10. Salle R1, lieu d'expérimentation.

Pour commencer notre conception, nous avons choisi des échantillons (le fumier de vache, le fumier de poules domestiques, fumier de poules française).

Construction de l'installation :

Dans cette section, nous décrivons la construction du système de biogaz/compostage réalisé sur le terrain.

Matériaux utilisés :

- ✓ Tuyau en plastique
- ✓ Chignole
- ✓ Balance
- ✓ Colle
- ✓ Bidon en plastique
- ✓ Bouteille en plastique

Procédure :

- Nous commençons par placer les déchets de volaille dans un seau fermé.
- Le seau est relié par un tuyau en plastique à une bouteille d'eau remplie d'eau.
- Cette bouteille d'eau est elle-même reliée à une bouteille en plastique vide.
- Lors de la digestion anaérobie, le gaz produit pousse l'eau de la première bouteille à travers le tuyau vers la bouteille en plastique vide.
- Nous mesurons ensuite le volume d'eau déplacé pour calculer le volume de gaz produit.

2.2.1 La production du biogaz à partir du fumier poules domestiques

Nous avons placé l'échantillon (fumier de poules domestiques) dans un bidon en plastique (M).

-Matériel

- 20Kg de fumier de poules domestiques dans le 1ér bidon (bidon M).



Figure 11. Le bidon M (fumier de poules domestiques).

2.2.2 La production du biogaz à partir du fumier de poules française

Nous avons placé l'échantillon (fumier de poules française) dans un bidon en plastique (L).

Matériel

- 20kg de fumier de poules française dans le 2éme bidon (Le bidon L).



Figure 12. Le bidon L (fumier de poules française).

2.2.3 La production du biogaz à partir du fumier de vache

Nous avons placé l'échantillon (fumier de vache) dans un bidon en plastique (B).

Matériel

- 20kg de fumier de vache dans le 3ème bidon (bidon B).



Figure 13. Le bidon B (fumier de vache).

Détermination du volume de biogaz

En utilisant une balance, on peut mesurer la masse d'eau déplacée par le gaz. Comme la densité de l'eau est de 1 g/ml, la masse d'eau en grammes correspond au volume d'eau déplacé en millilitres, Le volume d'eau déplacé correspond directement au volume de gaz produit, car le gaz remplace l'espace occupé par l'eau dans le système.



Figure14. Déterminer le volume de biogaz avec une balance.

2.3 Expérimentations en laboratoire

Lieu :

Laboratoire agronomie, Faculté des Sciences Agronomiques, Université 20 août 1955-Skikda

Coordonnées : RVXV+QQP, Skikda.



Figure15.Laboratoire agronomie.

2.3.1 Détermination de pH :

Le pH bien qu'étant facilement mesurable, est également le facteur le plus crucial pour le processus de méthanisation. Il indique le niveau d'acidité ou d'alcalinité du milieu. De plus, les microorganismes ne peuvent se développer que dans une plage de pH spécifique.

* Matériels :

- PH-mètre.
- Bécher.

* Méthode :

La première étape avant l'utilisation de cette méthode est l'étalonnage du pH-mètre.

De l'échantillon, on a pesé 10 g du fumier et on l'a mélangé avec 50 ml d'eau distillée stérile dans un bécher de 100 ml, selon un rapport de 1/5. La solution obtenue a été agitée pendant 15 minutes à l'aide d'un agitateur magnétique. Ensuite, on a laissé reposer pendant 15 minutes et mesuré le pH à l'aide d'un pH-mètre (AFNOR 1999).



Figure 16. PH mètre utilisé.

2.3.2 Détermination de la conductivité électrique (CE), des solides dissous totaux (TDS), de la salinité (Sal), et de la température (T°C) :

La conductivité électrique (CE) est la mesure de la concentration des ions solubles afin d'apprécier la salinité du substrat. Elle est déterminée par conductimètre et elle est exprimée en ($\mu\text{S}/\text{cm}$) ou (mmhos/cm^3). La norme internationale prescrit une méthode de sa mesure.

Méthode :

Un échantillon de substrat est extrait avec de l'eau à $20 \pm 1^\circ\text{C}$ (rapport d'extraction de 1/5 pour dissoudre les électrolytes).

La même méthode est utilisée pour mesurer les solides dissous totaux (TDS), la salinité (Sal), et la température (T°C) du substrat.



Figure 17. Conductimètre utilisé.

2.3.3 Détermination de la teneur en matière organique (MO) :

* Matériel :

- Four à moufle.
- Étuve.
- Balance électrique.

Méthode :

Selon le protocole d'analyse (**laboratoire de CRSTRA**), la détermination de la matière organique (MO) et des cendres a été effectuée en deux étapes:

- On pèse 10g de compost et on met l'échantillon dans l'étuve pendant deux heures à 105°C.
- A 450 °C pendant 4 heures dans un four à moufle et on détermine le résidu sec ou masse après calcination.

La matière organique est calculée par la calcination, signifie que la combustion de ce dernier est totale, ce qui facilite la détermination de sa teneur par simple différence entre le poids avant et après calcination, selon la formule suivante:

$$\text{MO (\%)} = [(M_{s1} - M_{s2}) / M_{s1}] \times 100$$

Remarque :

M_{s1} : masse de l'échantillon après séchoir solaire

M_{s2} : masse de l'échantillon après calcination



Figure 18. Balance électrique.



Figure 19. Étuve.



Figure 20. Le four à moufle.

CHAPITRE 04 :

Résultats et

discussions

1. Production du biogaz :

On représente les résultats dans les figures 21 ,22 ,23 ,24 ,25 ,26 et les tableaux 10, 11 et 12:

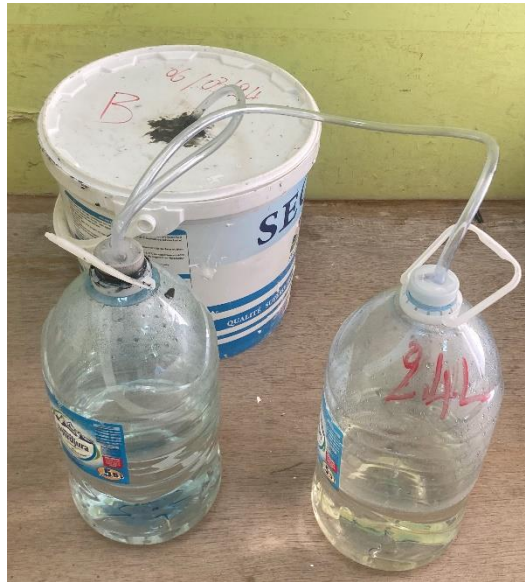


Figure 21. Le résultat d'expérience (B).



Figure 22. Le résultat d'expérience (M).



Figure23. Le résultat d'expérience (L).

Tableau 10. La production du biogaz par (m^3) par le bidon B :

B		
06 /03/2024 (1 jour)	V (m^3)	0
	T(C^0)	20
10 /03/2024 (4 jour)	V (m^3)	0.0026
	T(C^0)	21
13 /03/2024 (7 jour)	V (m^3)	0.0035
	T(C^0)	23
16 /03/2024 (10 jour)	V (m^3)	0.013
	T(C^0)	22
19/03/2024 (13 jour)	V (m^3)	0.018
	T(C^0)	19
21/03/2024 (16 jour)	V (m^3)	0.022
	T(C^0)	23
26 /03/2024 (20 jour)	V (m^3)	0.025
	T(C^0)	22
31 /03/2024	V (m^3)	0.028

(25 jour)	T(C ⁰)	23
05 /04/2024	V (m ³)	0.030
	T(C ⁰)	25
11/4/2024	V (m ³)	0.032
	T(C ⁰)	25
21 /04/2024	V (m ³)	0.033
	T(C ⁰)	24
01 /05/2024	V (m ³)	0.035
	T(C ⁰)	25
16 /05/2024	V (m ³)	0,035
	T(C ⁰)	29

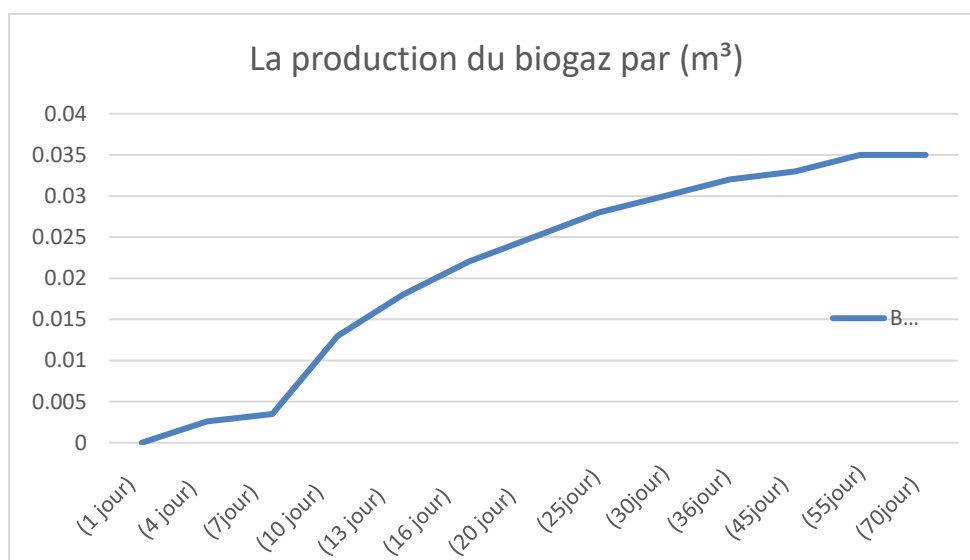


Figure 24. Evolution de production du biogaz par le bidon B.

Nous notons que le tableau 10 et le figure 24 illustre l'évolution de la production de biogaz par le bidon B au fil du temps. Il montre que le volume de biogaz produit augmente progressivement : le premier jour, il est de 0 m³, et atteint 0,035 m³ au jour 55. À partir de ce moment, le volume reste constant jusqu'au jour 70.

Cette augmentation est due à deux facteurs :

Une hausse relative de la température.

La mise en place de conditions appropriées pour la digestion anaérobie.

Tableau 11. La production du biogaz par (m³) par le bidon M:

M		
06 /03/2024 (1 jour)	V (m ³)	0
	T(C ⁰)	20
10 /03/2024 (4 jour)	V (m ³)	0.003
	T(C ⁰)	21
13 /03/2024 (7 jour)	V (m ³)	0.005
	T(C ⁰)	23
16 /03/2024 (10 jour)	V (m ³)	0.015
	T(C ⁰)	22
19/03/2024 (13 jour)	V (m ³)	0.019
	T(C ⁰)	19
21/03/2024 (16 jour)	V (m ³)	0.022
	T(C ⁰)	23
26 /03/2024 (20 jour)	V (m ³)	0.026
	T(C ⁰)	22
31 /03/2024 (25 jour)	V (m ³)	0.029
	T(C ⁰)	23
05 /04/2024 (30jour)	V (m ³)	0.032
	T(C ⁰)	25
11/4/2024 (36 jour)	V (m ³)	0.035
	T(C ⁰)	25
21 /04/2024 (45jour)	V (m ³)	0.038
	T(C ⁰)	24
01 /05/2024 (55 jour)	V (m ³)	0.0385
	T(C ⁰)	25
16 /05/2024 (70 jour)	V (m ³)	0,040
	T(C ⁰)	29

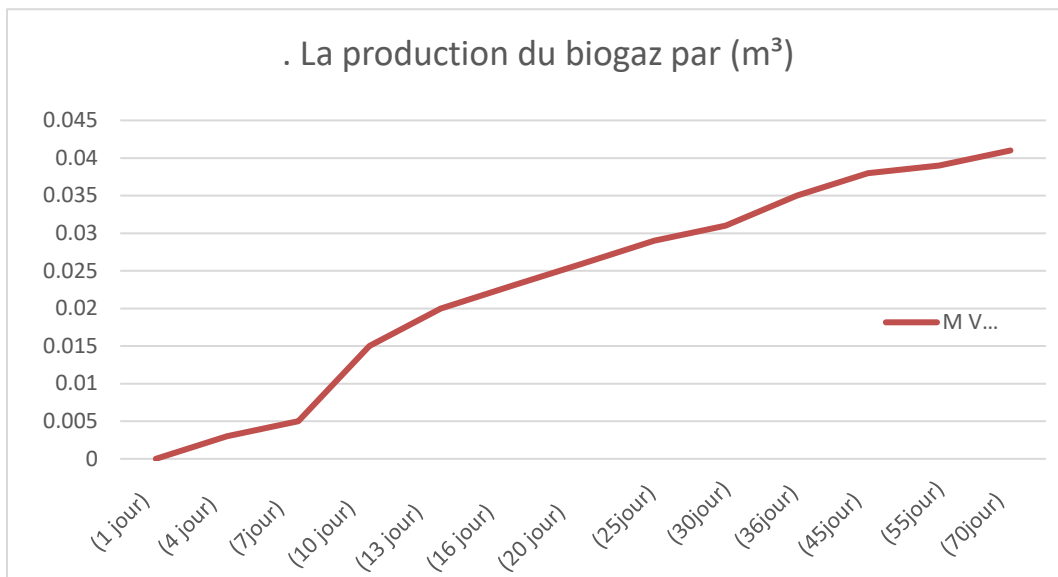


Figure 25. Evolution de production du biogaz par le bidon M.

Nous notons que le tableau 11 et le figure 24 montre l'évolution de la production de biogaz par le bidon M au fil du temps. Le volume de biogaz produit augmente un peu rapidement : le premier jour, il est de 0 m³, et atteint 0,040 m³ au jour 70.

Cette augmentation est due à quatre facteurs :

Une hausse relative de la température.

La mise en place de conditions appropriées pour la digestion anaérobie.

Le bidon est riche en matières organiques et contient un teneur élevé d'azote.

Les microbes présents à l'intérieur du bidon jouent un rôle majeur dans l'accélération de la digestion anaérobie.

Tableau 12. La production du biogaz par (m³) par le bidon L :

L		
06 /03/2024 (1 jour)	V (m ³)	0
	T(C ⁰)	20
10 /03/2024 (4 jour)	V (m ³)	0.004
	T(C ⁰)	21
13 /03/2024	V (m ³)	0.0065

(7 jour)	T(C ⁰)	23
16 /03/2024	V (m ³)	0.017
(10 jour)	T(C ⁰)	22
19/03/2024	V (m ³)	0.024
(13 jour)	T(C ⁰)	19
21/03/2024	V (m ³)	0.027
(16 jour)	T(C ⁰)	23
26 /03/2024	V (m ³)	0.03
(20 jour)	T(C ⁰)	22
31 /03/2024	V (m ³)	0.033
(25 jour)	T(C ⁰)	23
05 /04/2024	V (m ³)	0.037
(30jour)	T(C ⁰)	25
11/4/2024	V (m ³)	0.040
(36 jour)	T(C ⁰)	25
21 /04/2024	V (m ³)	0.045
(45jour)	T(C ⁰)	24
01 /05/2024	V (m ³)	0.050
(55 jour)	T(C ⁰)	25
16 /05/2024	V (m ³)	0,055
(70 jour)	T(C ⁰)	29

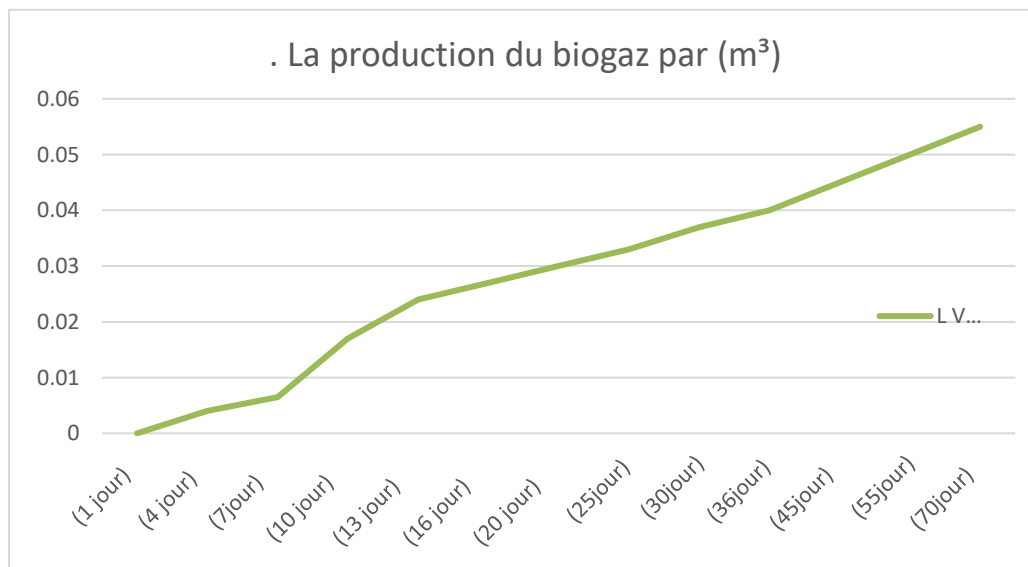


Figure 26. Evolution de production du biogaz par le bidon L.

Le tableau 12 et le figure 24 illustre l'évolution de la production de biogaz par le bidon L au fil du temps. On observe une augmentation rapide du volume de biogaz produit : dès le premier jour, la production est de 0 m³, et elle atteint 0,055 m³ au bout de 70 jours. Cette production continue d'augmenter avec le temps.

Cette augmentation est due à quatre facteurs :

Une hausse relative de la température.

La mise en place de conditions appropriées pour la digestion anaérobie.

Le bidon est riche en matières organiques et contient un teneur élevé d'azote.

Les microbes présents à l'intérieur du bidon jouent un rôle majeur dans l'accélération de la digestion anaérobie.

Note :

B : fumier de vache.

M : fumier de poules domestiques.

L : fumier de poules française.

Nous avons remarqué d'après les tableau 10 et 11 et 12 et les figures 24 et 25 et 26 :

- L : le mélange le plus productif du biogaz et aussi le plus rapide.
- B : le mélange le moins productif du biogaz et aussi le moins rapide.
- M : le mélange la moyenne productive du biogaz.

Ainsi, le mélange L (fumier de poules françaises) se dégrade plus rapidement que les autres mélanges (M et B).

Mais en général les trois mélanges convenables pour la production du biogaz.

1. Détermination du PH, CE, T, TDS, SAL, MO :

Les résultats avant les expériences (**déchets**):

2.1 Le PH :

Les résultats remportés ses présents dans la figure 27 :

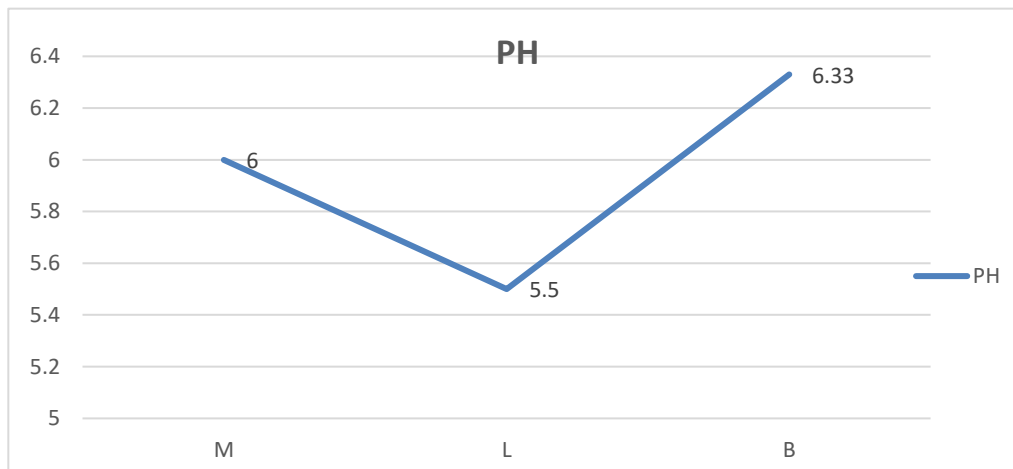


Figure 27. Résultats de mesure du pH.

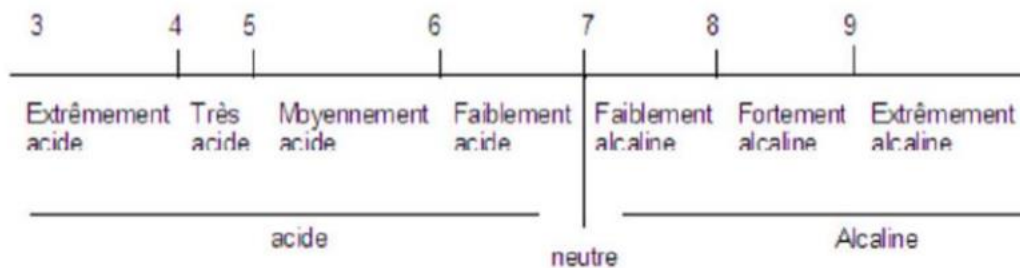


Figure 28. Gamme de l'évolution du pH (E. Pousset, 1999).

D'après les figures 27 et 28 :

- M : faiblement acide.
- L : moyennement acide.
- B : faiblement acide.

2.2 CE :

Les résultats obtenus ses présents dans la figure 29 :

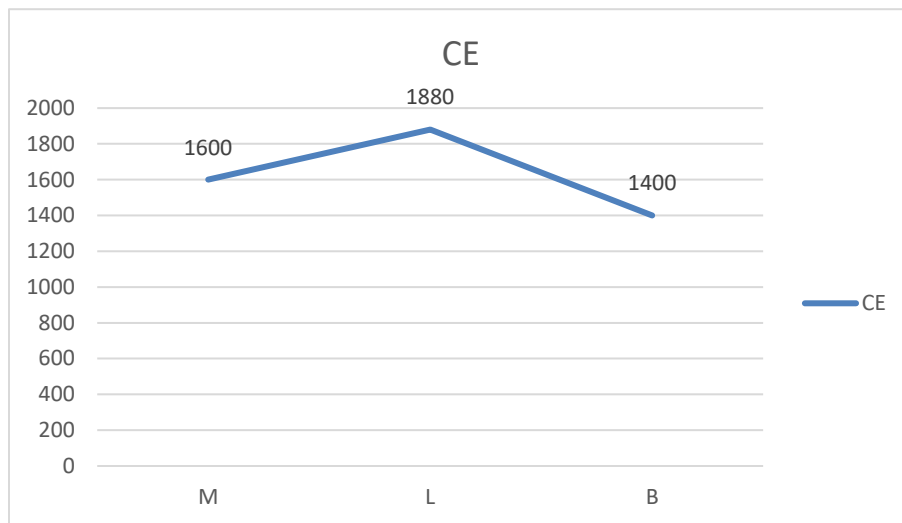


Figure 29. Résultats de mesure de CE ($\mu\text{S/cm}$).

Notons que le mélange L présente la plus grande conductivité électrique (CE), suivi par le mélange M, puis le mélange B.

2.3 La température :

Les résultats sont ci-dessous :

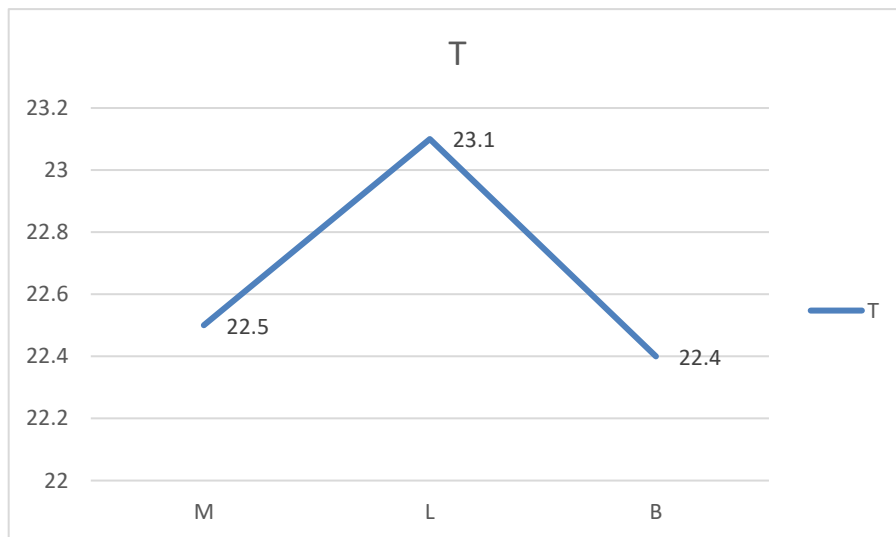


Figure 30. Résultats de mesure la température (C°).

On remarque :

- La température est similaire dans 03 mélanges
- La température est inférieur à 30-40°C dans les 03 mélanges.

2.4 TDS :

Les résultats sont ci-après :

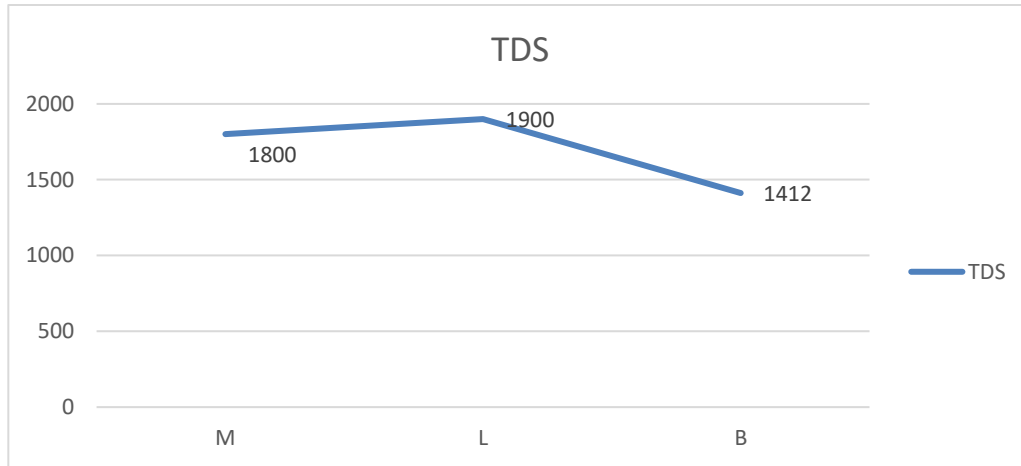


Figure 31. Résultats de mesure de TDS (mg/l).

Notons que le mélange L il y'a les plus grands totaux dissous solides (TDS) puis M puis B.

2.5 SAL :

Les résultats sont présents dans la figure 32 :

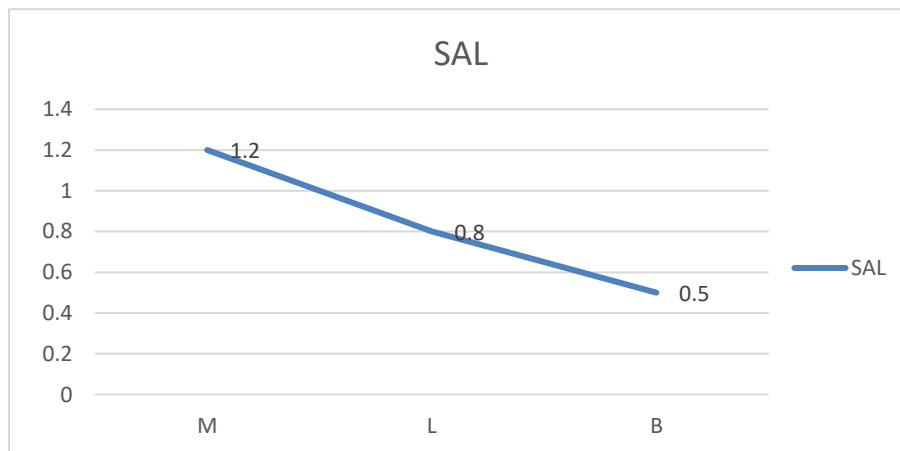


Figure 32. Résultats de mesure de SAL.

On observe:

- La salinité est inférieure à 2 dans les 03 mélanges.
- le mélange M il y'a le plus salinité (SAL) puis L puis B.

*** Discussion :**

D'après toutes les résultats on note :

- Si la conductivité électrique (CE), les solides dissous totaux (TDS), la température (T) et la salinité (SAL) sont élevées, la production de biogaz est élevée.
- De même, un pH moyennement acide favorise également une production élevée de biogaz.
- La température est inférieure à 30-40°C, donc la réaction est terminée dans les 03 mélanges.

Les résultats après les expériences (**composts**) :

2.6 Le PH :

Les résultats sont existants dans la figure 33 :

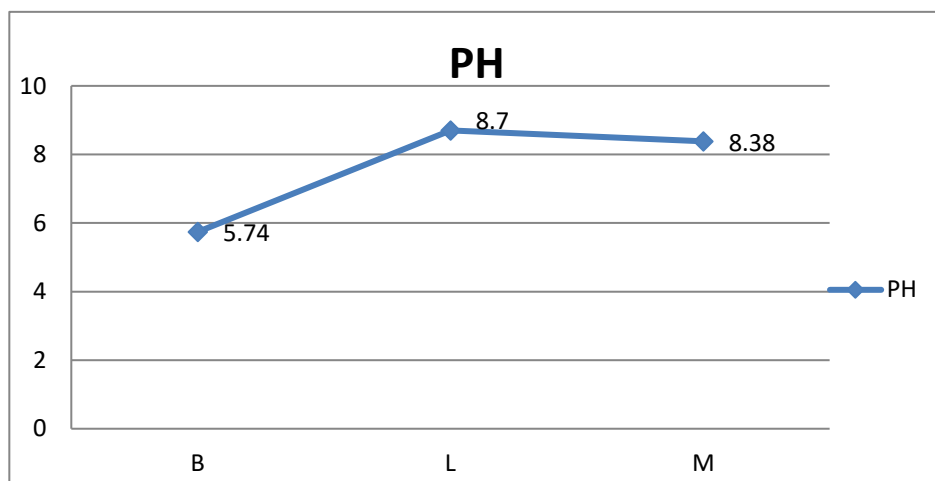


Figure 33. Résultats de mesure du pH.

D'après les figures 33 et 28 :

- B : moyennement acide.
- L : fortement alcaline.
- M : fortement alcaline.

2.7 CE :

Les résultats obtenus dans la figure 34 :

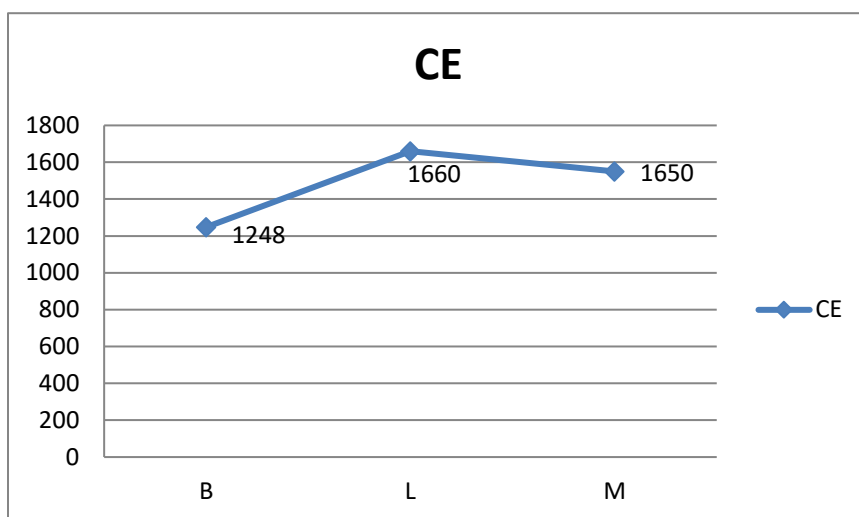


Figure 34. Résultats de mesure de CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

On note que les composts L et M ont la plus grande conductivité électrique (CE), suivis du compost B, et nous observons également que la valeur de la conductivité électrique (CE) est presque identique pour les deux composts L et M.

2.8 T:

Les résultats sont ci-dessous :

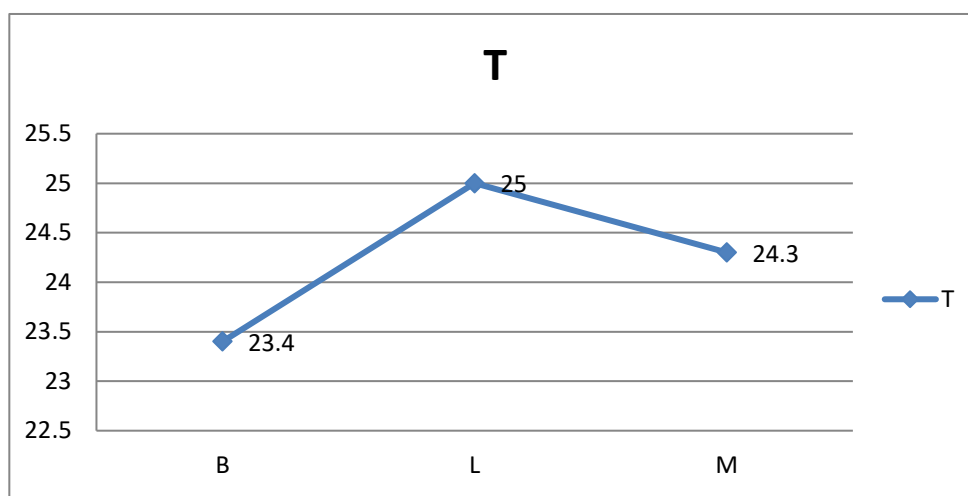


Figure 35. Résultats de mesure la température (C°).

On remarque :

- La température est similaire dans 03 composts Cependant, on constate que la température de le compost L est légèrement plus élevée par rapport aux composts M et B.

- La température est inférieure à 30-40°C dans les 03 composts.

2.9 TDS:

Les résultats sont présentés dans la figure 36:

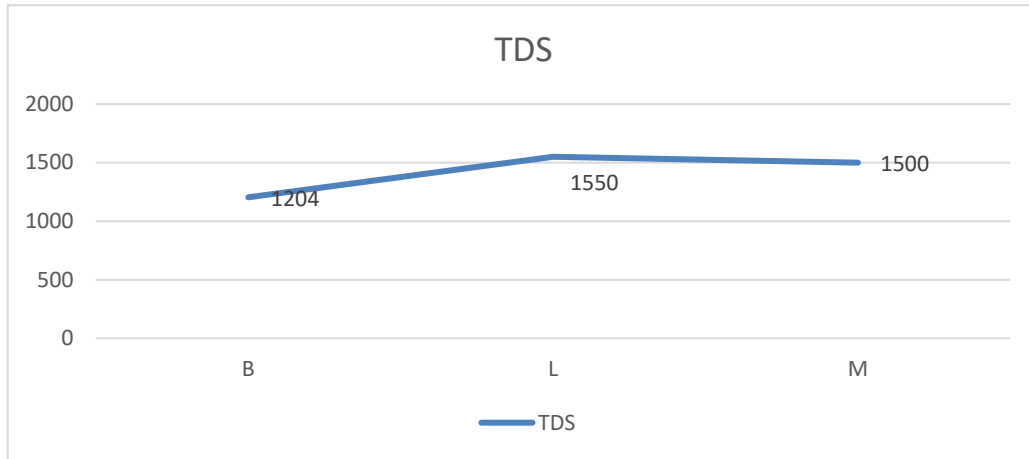


Figure 36. Résultats de mesure de TDS (mg/l).

On remarque que les composts L et M présentent les plus hauts niveaux de solides dissous totaux (TDS), suivis du compost B. De plus, nous observons que les valeurs de TDS sont presque identiques pour les composts L et M.

2.10 SAL :

Les résultats dans la figure 37:

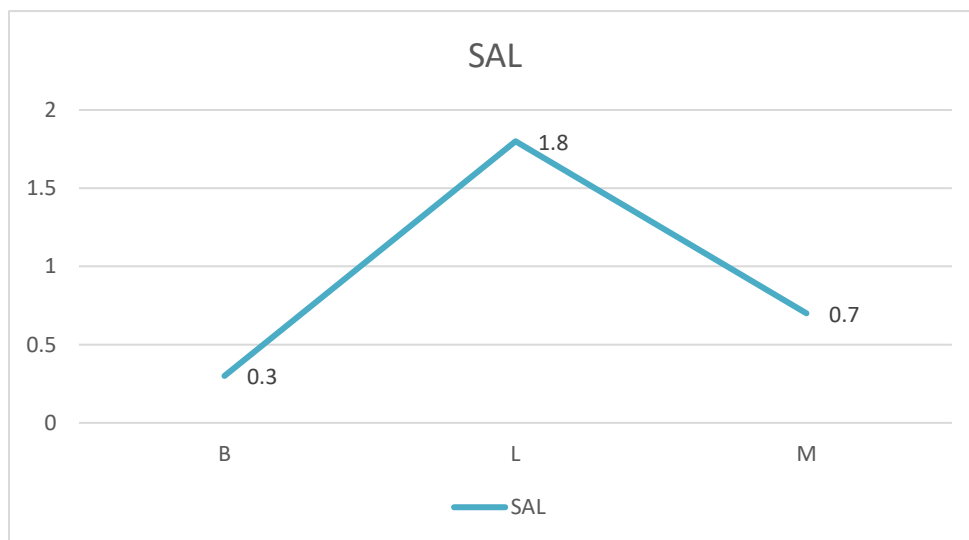


Figure 37. Résultats de mesure de SAL.

On regarde la salinité est inférieure à 2 dans les trois composts. Parmi eux, le compost L a la plus grande salinité, suivi du compost M, puis du compost B.

2.11 MO :

Les résultats obtenus dans la figure 33 :

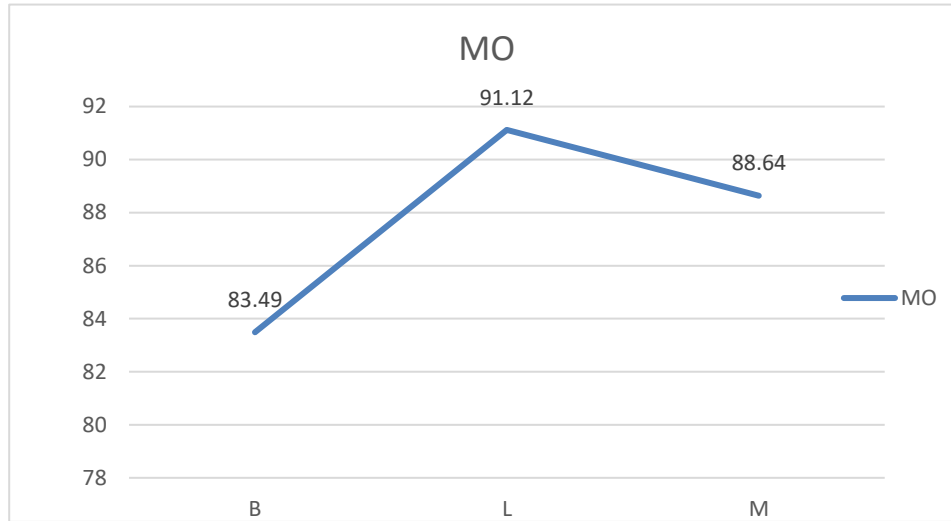


Figure 38. Résultats de mesure teneur de MO.

On regarde :

- ✓ L le plus riche en matière organique puis M ensuite B.

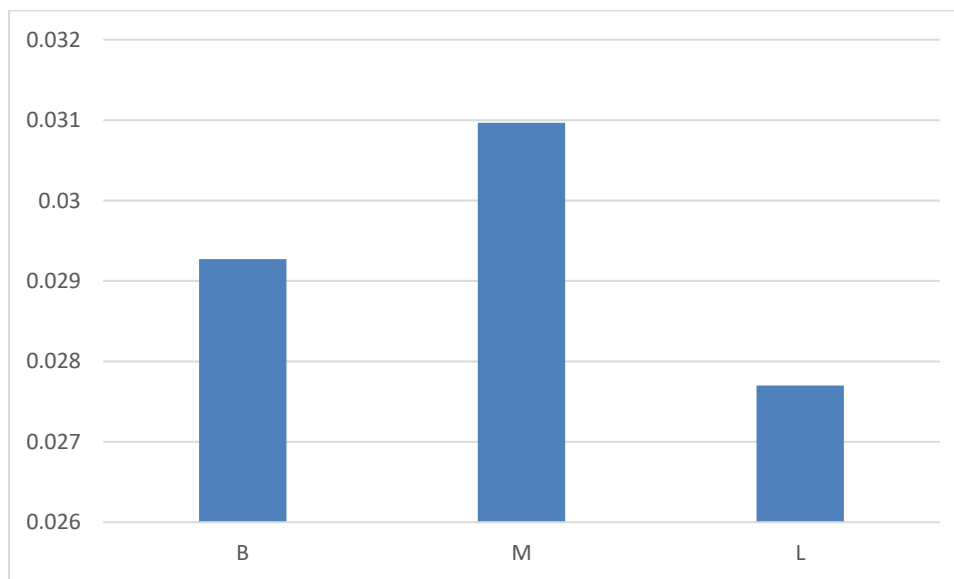


Figure 39 : Analyse de la comparaison entre les différentes moyennes de composte de biogaz.

Tableau 13 : Analyse de la comparaison entre les différents de composte de biogaz.

ANOVA						
<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	8.01E-05	2	4E-05	0.199031	0.820293	3.219942
Within Groups	0.008448	42	0.000201			
Total	0.008528	44				

*** Discussion :**

D'après toutes les résultats on note :

- Les composts L et M présentent les plus hauts niveaux de solides dissous totaux (TDS), la conductivité électrique (CE), la température (T).
- Les composts L et M ont un pH fortement alcalin, tandis que le compost B moyennement acide.
- Le compost L présente la salinité (SAL) la plus élevée et est le plus riche en matière organique.

*** Discussion générale :**

Les résultats obtenus sur la production de biogaz à partir de différents types de fumier montrent une évolution notable en fonction des substrats utilisés : fumier de vache (B), fumier de poules domestiques (M), et fumier de poules françaises (L). Ces observations sont cohérentes avec celles rapportées dans la littérature scientifique, offrant une compréhension approfondie des facteurs influençant cette production.

Pour le fumier de vache (B), la production de biogaz commence à 0 m³ au jour 1 et atteint 0,035 m³ au jour 55, avant de se stabiliser jusqu'au jour 70. Cette progression est due principalement à une augmentation relative de la température et à l'établissement de conditions appropriées pour la digestion anaérobie. Des études antérieures, telles que celle de (Ward et al, 2008), ont démontré que la digestion anaérobie du fumier de vache est relativement lente en raison de la composition organique et de la teneur en matière sèche. Les substrats riches en lignocellulose, comme le fumier de vache, ralentissent le processus de digestion anaérobie, ce qui explique la production plus modeste de biogaz observée dans ce cas.

En revanche, le fumier de poules domestiques (M) montre une augmentation plus rapide de la production de biogaz, passant de 0 m³ au jour 1 à 0,040 m³ au jour 70. Cette performance supérieure peut être attribuée à plusieurs facteurs, notamment une hausse relative de la température, des conditions optimales pour la digestion anaérobie, une richesse en matières organiques, et une teneur élevée en azote. Les microbes présents dans le fumier accélèrent également la digestion anaérobie. **(Kelleher et al., 2002)** ont confirmé que les fumiers de volaille ont un potentiel élevé de production de biogaz en raison de leur composition riche en azote et en matières volatiles.

Le fumier de poules françaises (L) se distingue par une production encore plus élevée, atteignant 0,055 m³ au jour 70, avec une augmentation continue au-delà de cette période. Cette performance exceptionnelle s'explique par les mêmes facteurs que ceux observés pour le fumier de poules domestiques, mais avec une efficacité accrue. **(Holtkamp et al, 2012)** ont noté que la teneur en azote dans les fumiers de volaille améliore l'efficacité de la digestion anaérobie et augmente la production de biogaz, ce qui corrobore les observations faites dans cette étude.

Les propriétés physico-chimiques telles que la conductivité électrique (CE), les solides dissous totaux (TDS), et la salinité (SAL) jouent un rôle crucial dans l'efficacité de la production de biogaz. Les résultats montrent que le mélange L présente la plus grande conductivité électrique, suivi de M et B. Des niveaux élevés de CE et de TDS sont associés à une meilleure production de biogaz. **(Selon Liu et al, 2013)**, une conductivité électrique élevée peut être indicatrice d'une concentration optimale de nutriments nécessaires aux microbes anaérobies, favorisant ainsi une production accrue de biogaz.

Le pH est un facteur déterminant dans la digestion anaérobie. Dans cette étude, les mélanges L et M montrent un pH moyennement acide à alcalin, ce qui est favorable à la méthanogènes. **(Angelidaki et Ahring, 1993)** ont montré que le pH optimal pour la production de biogaz se situe entre 6,8 et 7,2. Un pH moyennement acide semble donc favoriser une production plus élevée de biogaz, comme observé pour les mélanges L et M. Cette étude démontre que le fumier de poules françaises (L) est le substrat le plus productif pour la production de biogaz, suivi par le fumier de poules domestiques (M) et le fumier de vache (B).

Les analyses physico-chimiques indiquent que des paramètres tels que la conductivité électrique, les solides dissous totaux, et le pH influencent fortement l'efficacité de la production de biogaz. Ces résultats sont en accord avec les études scientifiques antérieures, confirmant que des niveaux élevés de CE, de TDS, et un pH optimal favorisent la production de biogaz. En général, les trois mélanges sont appropriés pour la production de biogaz, mais le fumier de poules françaises se

distingue par son efficacité supérieure.

Conclusion

Conclusion

Ce travail nous a permis de comprendre de manière approfondie le phénomène de bio méthanisation, grâce à une recherche bibliographique poussée. La bio méthanisation est un processus biologique de décomposition de la matière organique en absence d'oxygène, produisant du biogaz principalement composé de méthane (CH₄) et de dioxyde de carbone (CO₂). Ce domaine s'inscrit pleinement dans le cadre des énergies renouvelables, car il valorise les déchets organiques en une source d'énergie propre et renouvelable.

D'autre part, nous avons mené cette étude dans le but de vérifier expérimentalement les concepts théoriques et les résultats documentés dans la littérature. Pour cela, nous avons mis en place une série d'expériences visant à mesurer la production de biogaz à partir de différents substrats organiques.

D'après les résultats obtenus, nous observons que si le compost présente une alcalinité, une teneur en matière organique (MO), une conductivité électrique (CE), une concentration en solides dissous totaux (TDS) et une salinité (SAL) plus élevées, la production de biogaz est plus intense. De plus, une température élevée favorise une production de biogaz plus rapide. Cette étude démontre que le fumier de poules françaises (L) est le substrat le plus productif pour la production de biogaz, suivi par le fumier de poules domestiques (M) et le fumier de vache (B). En général, les trois mélanges sont appropriés pour la production de biogaz, mais le fumier de poules françaises se distingue par son efficacité supérieure.

En conclusion, notre travail a su allier théorie et pratique, offrant ainsi une vision globale et détaillée du processus de bio méthanisation. Nos expériences ont confirmé les facteurs influençant la production de biogaz. Ce travail nous a non seulement enrichis en connaissances techniques, mais a également mis en lumière le potentiel réel de la bio méthanisation comme solution durable et efficace pour la gestion des déchets et la production d'énergie renouvelable.

Références
bibliographiques

Références bibliographiques

- A, Demeyer, F. Jacob, M. Jay, G. Menguy et J. Perrier :** ' La Conversion bioénergétique du rayonnement solaire et les biotechnologies', Edition Tec & Doc, 1980, pp. 213-215.
- Anonyme 1, 2001 :** CNRS, INRA, INSERM Gestion des déchets : guide pour les établissements publics d'enseignement supérieur ou de recherche. 194 p.
- Smeester. E., 1993.** Le compostage domestique : comment transformer vos déchets organiques en mine d'or pour le jardin. Ed : Versicolores INC, bibliothèque nationale du Québec. 44p.
- Bertolini G., 1990.** Le marché des ordures. Edition : Le harmattan, Paris.
- Addou, A. (2009).** Traitement des déchets (Valorisation, élimination). Paris.31-32, 37,43p.
- Nignikam., 1992.** Deux propositions pour une gestion optimisée des ordures ménagères dans la ville de Yaoundé : le compostage et la station de transit. Mémoire d'ingénieur à l'ENSP Yaoundé
- Sotamenou. J., 2005.** Efficacité de la collecte des déchets ménagers et agriculture urbaine et périurbaine dans la ville de Yaoundé. Mémoire de D.E.A, Université de Yaoundé II, Cameroun. 100 p.
- Anonyme 2., 2005.** Schéma directeur de gestion des déchets solides urbains groupement de Constantine Direction d'assainissement et d'environnement Constantine
- A. Damien :** Guide du traitement des déchets' 3ème Edition, Dunod, 2004,448p.
- Damien. A., 2006.** Guide du traitement des déchets. 4ème édition, Dunod, Paris. P 3-16, 279-293.
- Desachy. C, 2001.** Les déchets (sensibilisation à une gestion écologique. Paris 2^{ème}
- Leroy, 1997 :** Classification des déchets.
- Leroy. JB., 1997.** Les déchets et leurs traitements : les déchets solides industriels et ménagers. Edition : Presse Universitaires de France, Paris, 3ème édit. 127 p.
- Couplan. F, Marmy. F, 2009 :** Jardinez au naturel : jardin bio facile. Edition : Sang de la terre et groupe Eyrolles. 314 p.

Ademe, 2001. "Déchets organiques - Essai agronomique de plein champ d'un compost des Déchets verts (résultats 8e année d'expérimentation)." Paris, France.

Ademe, 2008. Guide pratique sur le compostage. ADEME édition, Paris, 20 pages.

Aile, Solagro, Ademe, Trame. 2006. La méthanisation à la ferme. [En ligne]. <http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?id=38550&p1=1&ref=12441>

Ostrem, K. Greening Waste: Anaerobic digestion for treating the organic fraction of municipal solid wastes. (2004). Mémoire de maîtrise, Columbia University, New York

J. Grandeau, 1890. Le compostage des déchets verts, direction de la station agronomique de l'est, France

Zurbrugg C. et Ahmed R., 1999. "Enhancing Community Motivation and Participation in Solid Waste Management" SANDEC News 4.

Larbi M., 2006. Influence de la qualité des composts et de leurs extraits sur la protection des plantes contre les maladies fongiques. Thèse, Institut de recherche de l'agriculture biologique FiBL, CH-Frick; l'Université de Neuchâtel. <http://orgprints.org/8935/>

Guittouy-Larchevêque M., 2004. Valorisation d'un compost de boues urbaines en garrigue pour le reboisement : Comportement des jeunes arbres d'une plantation et modifications de la dynamique de la végétation naturelle après amendement, Thèse de Doctorat, Université Paul Cézanne, 227p.

Leclerc B, 2001 : Guide des matières organiques. (Guide Technique de l'ITAB).

Charnay F, 2005 : Compostage des déchets urbains dans les pays en développement élaboration d'une démarche méthodologique pour une production pérenne de compost. Thèse de doctorat en chimie et microbiologie de l'eau, Faculté des sciences et technique, Ecole doctorale Science-Technique-Santé, Université de Limoges, France. 215p.

Francou, C. 2003 : Stabilisation de la matière organique au cours du compostage de déchets urbains : Influence de la nature des déchets et du procédé de compostage Recherche d'indicateurs pertinents. Thèse de doctorat, INAPG, France, 288p

Berger M., 1996. L'amélioration de la fumure organique en Afrique soudano-sahélienne, collection, agriculture écosystème et développement, n° hors série, fiche 1-8 www.ecopatrouille.org.

Humeau. PH, Le Cloirec. P, 2006 : Emissions gazeuses et traitement de l'air en compostage. Edition. Techniques Ingénieur.

AFNOR, Collection of French standard methods 1994: water quality, Ed.AFNOR, (1994).

Mustin, M. 1987 : Le Compost, Gestion de la Matière Organique, F. Dubusceds, pp. Paris.

Karambiri S., 2007. Déterminants socio-économiques de l'adoption de la pratique du compostage à l'aide de l'acteur compost plus: cas des provinces de la Sissili, du Ziro et du Koulpélogo. Licence professionnelle en vulgarisation agricole, IDR/UPB, BoboDioulasso.65p

Misra. RV, Roy. RN, Hiraoka. H, 2005 : Méthodes de compostage au niveau de l'exploitation agricole. Documents de travail sur les terres et les eaux. Organisation Des Nations Unies Pour L'alimentation Et L'agriculture, Rome.

Thauvin P., 2007. Process-type de compostage et méthanisation d'ordures ménagers résiduelles. Département gestion optimisée des déchets/ADEME. 9p

Théoleyre M.A., Héduit M., 1986. La méthanisation des fumiers - Guide pratique pour l'auto construction. GIDA/AFME, Paris, France.

Guet G., 2003. Mémento d'agriculture biologique, guide à usage Professionnel.

Görish, U. et Helm, M. 2008.La production de Biogaz. Paris, Les Éditions Eugen Ulmer, 120 p

Godon, J.-J. 2008. Aspects biochimiques et microbiologiques de la méthanisation. In Moletta, R., La méthanisation (chap. 3, p. 61-85). Paris, Éditions Tec & Doc.

Brauman, A., Fonty, G. et Roger, P. 2008. La méthanisation dans les écosystèmes naturels et cultivés. In Moletta, R., La méthanisation (chap. 2, p. 9- 59). Paris, Éditions Tec & Doc

Amarante, 2010. Bio-méthanisation des déchets putrescibles municipaux technologies disponibles et enjeux pour Le Québec. Essai présenté au Centre Universitaire de Formation en Environnement en vue de l'obtention du grade de maître en environnement (M.Env.) : Centre universitaire de formation en environnements université de Sherbrooke. 72p.

Bernet, N. et Buffière, P. Caractérisation de la mise en œuvre de la méthanisation. In Moletta, R., La méthanisation. (2008). Paris, Éditions Tec & Doc. (chap. 4, p. 87-113)

Moletta, R. et Verstraete, W. 2008. La méthanisation dans la problématique énergétique et environnementale. In Moletta, R., La méthanisation (chap. 1, p. 3-8). Paris, Éditions Tec & Doc.

Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Alley, R.B., Berntsen, T., Bindoff, N.L.,• Chen, Z., Chidthaisong, A., Gregory, J.M., Hegerl, G.C., Heimann, M., Hewitson, B., Hoskins, B.J., Joos, F., Jouzel, J., Kattsov, V., Lohmann, U., Matsuno, T., Molina, M., Nicholls, N., Overpeck, J., Raga, G., Ramaswamy, V., Ren, J., Rusticucci, M., Somerville, R., Stocker, T.F., Whetton, P., Wood, R.A. and Wratt, D. 2007. Technical Summary. In Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M. and Miller, H.L. (Eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

Olivier, M.J. 2009. Chimie de l'environnement. 6^e édition, Québec, Les productions Jacques Bernier, 360 p.

De La Farge B., Heduit M., Brondeau P., Mongin J. P., Saugere D., Cambus L. (1983). La méthanisation des lisiers de porcs. Journées de Recherche Porcine en France, vol. 15, Pp, 11-22.

De La Farge B. (1995). Le Biogaz, Procédé de fermentation méthanique. Edition Masson, Pp, 237.

René Moleta, 2009. La méthanisation', Edition Tec & Doc, 2009, pp3-4.

D. Kherbouche, Valorisation énergétique de la biomasse : Production et Purification du biogaz obtenu à partir de la méthanisation sur sites algériens', mémoire de Magister, Université Abou-Bakr Belkaid, Tlemcen, 2005.

Z. Jin Bai, 2011. Procède de traitement anaérobie des boues et de valorisation du biogaz', (2011)

Bertolini G. (2005). Économie des déchets. Éditions Technip, Paris.

Marchaim U. (1994). Les procédés de production de biogaz pour le développement de technologies durables (bulletin des services agricoles de la FAO N° 95. FAO.

ADEME (2010). L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie. La méthanisation comment se transforme la matière organique en énergie. Fiche Technique. Pp 6.

Rapport, J., Zhang, R., Jenkins, B.M., and Williams, R.B. (2008). Current Anaerobic Recovery. Biochemical Conversion Processes. Anaerobic Digestion. <http://www.calrecycle.ca.gov/Publications/Organics/2008011.pdf>

Saber M. (2013). Les procédés de digestion anaérobie pour la production du Biogaz. Bulletin des Energies Renouvelables. N°28. Pp, 3.

Sigot L. (2014). Épuration fine des biogaz en vue d'une valorisation énergétique en pile à combustible de type SOFC – Adsorption de l'octaméthylcyclotérasiloxane et du sulfure d'hydrogène. Thèse de doctorat. L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. Soutenue le 20 Octobre 2014. Pp, 232

A.Touzi, S. Igoud, S. Kehal, I. Tou, M. Bennouna et M. Slaim, „Installation d'unité de production de biogaz à partir des déchets animaux : impact sur le développement de l'agriculture de montagne“, Troisième Journées Scientifiques de l'INRAA, Bejaia, 2011

(FAQ – biométhanisation : version octobre 2012 rédigée par EDORA et Valbiom 3, FAQ – biométhanisation : version octobre 2012 rédigée par EDORA et Valbiom 4) : Document « FAQ » rédigé par EDORA dans le cadre de la plateforme biogaz, en collaboration avec Valbiom.

Ward, A. J., Hobbs, P. J., Holliman, P. J., & Jones, D. L. (2008). Optimization of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology*, 99(17), 7928-7940.

Kelleher, B. P., Leahy, J. J., Henihan, A. M., O'Dwyer, T. F., Sutton, D., & Leahy, M. J. (2002). Advances in poultry litter disposal technology – a review. *Bioresource Technology*, 83(1), 27-36.

Holtkamp, I., Hartmann, H., & Ahring, B. K. (2012). The effect of ammonia inhibition on the biogas process. *Water Science and Technology*, 45(10), 355-360.

Liu, C., Yuan, H., Zhen, F., & Liu, G. (2013). Improving biogas production by anaerobic co-digestion of rice straw and manure under mesophilic conditions. *Waste Management*, 33(2), 426-432.

Angelidaki, I., & Ahring, B. K. (1993). Thermophilic anaerobic digestion of livestock waste: the effect of ammonia. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 38(4), 560-564.

Thème : Conception d'un système biogaz/compost à base des déchets avicoles.

Présenté par : BOUCHALTA Mohamed, BOUAFIA Mohamed Lamine, ALI MECIAD Mouad

Résumé :

La digestion anaérobie est l'un des processus les plus efficaces pour la production d'énergie renouvelable, offrant de nombreux avantages industriels et environnementaux en créant un environnement plus propre et moins toxique grâce à la production de méthane (CH₄). Elle permet de réduire les déchets organiques et les émissions de gaz à effet de serre, tout en produisant du biogaz utilisable comme source d'énergie thermique et électrique, contribuant ainsi à un environnement plus pur. Pour maximiser la production de biogaz, il est crucial de respecter certaines conditions spécifiques telles que la température, le pH, l'alcalinité, les nutriments, l'absence de composés toxiques, l'exclusion de l'oxygène et l'utilisation d'un bioréacteur.

En respectant les conditions spécifiques de la digestion anaérobie, il est possible d'optimiser la production de méthane et d'en tirer des bénéfices environnementaux, industriels et énergétiques considérables, offrant des solutions durables pour répondre aux besoins énergétiques croissants de notre société.

Le but de cette étude est de traiter la fraction organique des déchets par bio méthanisation, un processus qui dégrade la matière organique en absence d'oxygène pour produire un mélange de méthane (CH₄) et de dioxyde de carbone (CO₂) appelé biogaz. Pour cette étude, nous avons choisi les échantillons suivants : le fumier de vache, le fumier de poules domestiques et le fumier de poules françaises.

À la fin de l'expérimentation, il a été constaté que le compost de poule français présente le pourcentage le plus élevé de matières organiques comparé au compost de poule domestique et au compost de vache. Cette expérience montre également que le fumier de poules françaises (L) est le substrat le plus efficace pour produire du biogaz, suivi par le fumier de poules domestiques (M) et le fumier de vache (B). Bien que les trois types de fumier soient appropriés pour la production de biogaz, le fumier de poules françaises se distingue par sa productivité supérieure.

Mots clés : Biogaz, Bioréacteur, Composte, Déchets, Digestion anaérobie.

ملخص:

يعد الهضم اللاهوائي أحد أكثر العمليات كفاءة لإنتاج الطاقة المتجددة، حيث يوفر العديد من الفوائد الصناعية والبيئية من خلال خلق بيئة أنظف وأقل سمية من خلال إنتاج غاز الميثان (CH₄). فهو يساعد على تقليل النفايات العضوية وانبعثات الغازات الدفيئة، بينما ينتج الغاز الحيوي الذي يمكن استخدامه كمصدر للطاقة الحرارية والكهربائية، وبالتالي المساهمة في بيئة أنظف. لتحقيق أقصى قدر من إنتاج الغاز الحيوي، من الضروري احترام شروط محددة مثل درجة الحرارة، ودرجة الحموضة، والقلوية، والمواد المغذية، وغياب المركبات السامة، واستبعاد الأكسجين واستخدام مفاعل حيوي.

ومن خلال احترام الشروط المحددة للهضم اللاهوائي، من الممكن تحسين إنتاج الميثان واستخلاص فوائد بيئية وصناعية ومتعلقة بالطاقة كبيرة، وتقديم حلول مستدامة لتلبية احتياجات الطاقة المتزايدة لمجتمعنا.

الهدف من هذه الدراسة هو معالجة الجزء العضوي من النفايات عن طريق الميثان الحيوية، وهي عملية تعمل على تحلل المواد العضوية في غياب الأكسجين لإنتاج خليط من الميثان (CH₄) وثاني أكسيد الكربون (CO₂)، يسمى الغاز الحيوي. في هذه الدراسة قمنا باختبار العينات التالية: روث البقر، روث الدجاج المنزلي، وروث الدجاج الفرنسي.

في نهاية التجربة تبين أن سماد الدجاج الفرنسي (L) يحتوي على أعلى نسبة من المواد العضوية مقارنة بسماد الدجاج المنزلي وسماد البقر. كما أظهرت هذه التجربة أيضاً أن سماد الدجاج الفرنسي (L) هو الركيزة الأكثر فعالية لإنتاج الغاز الحيوي، يليه سماد الدجاج المنزلي (M) وسماد البقر (B). على الرغم من أن جميع أنواع السماد الثلاثة مناسبة لإنتاج الغاز الحيوي، إلا أن روث الدجاج الفرنسي يتميز بإنتاجه المتفوق.

الكلمات المفتاحية: الهضم اللاهوائي، السماد، النفايات، الغاز الحيوي، مفاعل حيوي.

Année universitaire 2023/2024