

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**



**Université Mouloud MAMMÉRI de Tizi-Ouzou
Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques
Département des science Agronomiques**



Mémoire de fin d'études

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

Filière : Sciences agronomiques

Spécialité : Production Animale

THEME

**Essai de valorisation d'un sous-produit animal : le
fumier bovin et sa transformation en biogaz dans la
Wilaya de Tizi-Ouzou.**

Réalisé par

Saoudi Nordine

Medjkane Mohamed

Le jury d'examination :

| | | | |
|---------------------|--|------------|--------------|
| Président : | M^{me} Taleb K. | MCA | UMMTO |
| Promotrice : | M^{me} Djouber-Toudert F. | MAA | UMMTO |
| Examineur : | M^r Rezzik H. | MAA | UMMTO |

Soutenu le 17/07/2023

Année universitaire : 2022 /2023



**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

Université Mouloud MAMMERY de Tizi-Ouzou

Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques

Département des science Agronomiques



Mémoire de fin d'études

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

Filière : Sciences agronomiques

Spécialité : Production Animale

THEME

**Essai de valorisation d'un sous-produit animal : le
fumier bovin et sa transformation en biogaz dans la
Wilaya de Tizi-Ouzou.**

Réalisé par

Saoudi Nordine

Medjkane Mohamed

Le jury d'examination :

Président : M^{me} Taleb K.

MCA

UMMTO

Promotrice : M^{me} Djouber-Toudert F.

MAA

UMMTO

Examineur : M^f Rezzik H

MAA

UMMTO

Soutenue le 17/07/2023

DEDICACE.

J'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail

A ma chère mère, qui me donne toujours espoir et qui n'a jamais cessé de prier pour moi, aucun mot ne pourrait exprimer tous les sentiments que je te porte.

A mon chère père, pour ces encouragements, son soutien et son sacrifice afin que rien n'entrave le déroulement de mes études.

A mes frères qui m'ont chaleureusement supporté et encourager tout au long de ce travail, et pour leur sacrifices.

A mes meilleurs amis, au nom de l'amitié qui nous réunit.

Remerciements

Nous tenant à remercier toute personne qui nous a apporté le soutien et l'aide tout au long de ce travail et plus particulièrement :

*Notre promotrice **Mme DJOUBER -TOUDERT F.** Maitre Assistante à l'Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou pour avoir accepté de diriger notre travail pour sa disponibilité et son temps, pour ces conseils et son soutien. Qu'elle trouve ici l'expression de nos sincères remerciements.*

Nous souhaitons remercier aussi :

***M^{me} Taleb K.....** qui nous a fait l'honneur d'accepter la présidence de jury.*

***Mr Rezzik H**D'avoir accepté d'examiner notre travail.*

Enfin nous tenons à exprimer nos chaleureux remerciements à l'égard de toute personne ayant pris part de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Table des matières

Liste des figures

Liste des abréviations

Liste des tableaux

Introduction

Première partie : approche bibliographique

Chapitre I : Généralités sur les différents types de fumier **Erreur ! Signet non défini.**

1 Le fumier : **Erreur ! Signet non défini.**

1.1 L'histoire de la bouse de vache3

1.2 Type de fumier :4

1.2.1 Fumier traditionnel.....4

1.2.2 Fumier amélioré4

1.2.3 Le fumier de bovins5

1.2.4 Le fumier de cheval.....5

1.2.5 Le fumier d'ovins et caprin (moutons et chèvres)6

1.2.6 Le fumier de volailles6

1.3 Compostions des différents types de fumiers6

1.4 Evaluation et caractérisation des fumiers7

1.5 Comment optimiser la qualité agronomique du fumier?8

1.6 Quelle est l'utilité du fumier ?9

Chapitre 2 : La méthanisation et Le biogaz..... **Erreur ! Signet non défini.**

2 Définition de la méthanisation :11

2.1 Description de la méthanisation.....11

3 Le biogaz et la méthanisation.....11

3.1 Origine et composition du biogaz.....12

3.2 Le biogaz dans le monde13

3.3 Energie issue du biogaz en Europe13

3.4 Le biogas en France13

4 Unité de méthanisation.....15

4.1 Types de digesteurs anaérobies15

4.1.1 Digesteurs discontinus.....16

4.1.2 Digesteurs semi-continus conventionnels18

4.1.3 Digesteurs à dôme encastré18

4.1.4 Digesteurs à cloche mobile19

| | | |
|-------|--|----|
| 4.1.5 | Digesteurs infiniment mélangés | 20 |
| 5 | Étapes de la méthanisation | 22 |
| 5.1 | L'hydrolyse | 23 |
| 5.1.1 | L'hydrolyse de la carbohydrates – exemple de la cellulose | 25 |
| 5.1.2 | L'hydrolyse des lipides | 25 |
| 5.1.3 | L'hydrolyse des protéines | 25 |
| 5.2 | L'acidogénèse | 25 |
| 5.2.1 | L'acidogénèse des sucres | 26 |
| 5.2.2 | L'acidogénèse des acides aminés | 26 |
| 5.2.3 | L'acétogénèse des acides gras | 26 |
| 5.3 | La méthanogénèse | 27 |
| 5.3.1 | La méthanogénèse acétotrophe | 27 |
| 5.3.2 | La méthanogénèse hydrogénotrophe | 27 |
| 6 | Paramètres généraux de fonctionnement..... | 28 |
| 6.1 | Facteurs d'influence : | 28 |
| 6.1.1 | Température..... | 28 |
| 6.1.2 | PH | 29 |
| 6.1.3 | Granulométrie | 30 |
| 6.1.4 | Agitation | 31 |
| 6.2 | Paramètres globaux..... | 31 |
| 6.2.1 | Balance nutritionnelle | 31 |
| 6.2.2 | Production de méthane | 32 |
| 7 | Description du fonctionnement d'une installation de méthanisation agricole | 32 |
| 7.1 | Préparation des intrants | 32 |
| 7.2 | Prétraitement des intrants | 33 |
| 7.3 | Introduction des matières dans le digesteur | 33 |
| 7.4 | Digestion..... | 34 |
| 7.5 | Post digestion | 34 |
| 8 | 8 Voies d'utilisation des produits de la méthanisation | 34 |
| 8.1 | Digestat | 35 |
| 8.1.1 | Description du digestat..... | 35 |
| 8.1.2 | Valeur agronomique du digestat | 35 |
| 8.1.3 | Les avantages de l'utilisation du digestat..... | 35 |
| 8.2 | Le Biogaz..... | 37 |
| 8.2.1 | La production de chaleur | 37 |
| 8.2.2 | La production d'électricité..... | 37 |

| | | |
|--|---|------------------------------------|
| 8.2.3 | La production de biogaz carburant | 38 |
| 8.2.4 | L'injection dans le réseau de gaz naturel | 38 |
| Chapitre III :Matériel et méthode..... | | Erreur ! Signet non défini. |
| III.1 | Objectif de l'étude | 39 |
| III.2 | Situation géographique de la région d'étude | 39 |
| III.3 | Présentation de la parcelle d'étude | 40 |
| III.3.1 | Facteurs climatiques de la région d'étude | 40 |
| III.3.2 | Synthèse climatique de la région d'étude | 44 |
| III.4 | Matériels et méthodes | Erreur ! Signet non défini. |
| III.4.1 | Matériels : | 45 |
| III.4.2 | Méthodes | 45 |
| III.5 | Essaie..... | 46 |
| Résultats et discussion | | 48 |
| Conclusion..... | | 49 |
| Références bibliographique | | |
| RESUME | | |

Listes des figures:

| | |
|---|------------------------------------|
| Figure 1 : La bouse de bovin (photo originale, 2023)..... | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure 2 : La bouse de bovin (photo originale, 2023)..... | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure 3: Fumier du cheval (Photo originale, 2023)..... | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure 4: Fumier de l'ovin et caprin (Photo originale, 2023) | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure 5: Représentation schématiques du digesteur type Ducellier-Isman | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure 6: Coupe schématique d'un digesteur CIEH de petite capacité | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure 7: Représentation schématique d'un digesteur à dôme encastré..... | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure 8: Représentation schématique d'un digesteur à cloche mobile..... | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure 9: Coupes schématiques de digesteurs infiniment mélangés | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure 10 : Principales étapes de la digestion anaérobie et leurs groupes de microorganismes respectifs (Lacour, 2012)..... | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure11 : Situation géographique de la région d'étude | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure 12 : Variation des températures moyennes, minimale et maximales de la région de Tizi-Ouzou sur une période de 9ans (2012-2020)..... | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure 13 : Précipitations moyennes mensuelles de la région de Tizi-Ouzou sur une période de 9 ans (2012-2020)..... | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure 14 : Humidité relative (en%) de la région de Tizi-Ouzou sur une période de 9 ans (2012-2020)..... | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure 15 : Nombre d'heures d'insolation dans la région de Tizi-Ouzou sur une période de 9ans (2012-2020)..... | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure16 : Diagramme Ombrothermique de Bagnols et Gausсен de la région de Tizi- Ouzou sur une période de 9 ans (2012-2020)..... | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure 17 : fumier frais..... | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure 18 : Mélange homogène du fumier avec de l'eau | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure 19 Robinet d'eau rationalisé(3/4")..... | 46 |
| Figure 20 :Bidon en plastique de 10litres | 46 |
| Figure 21 : robinet d'eau sur le bouchon du bidon | 46 |
| Figure 22 : remplissage du bidon jusqu'à 5 L..... | 47 |
| Figure 23 : refermé le bidon | 47 |
| Figure 24 : laissé s'effectuer la fermentation..... | 47 |
| Figure 25 : Test du biogaz produit avec l'allumage d'un trépied gaz. | Erreur ! Signet non défini. |

LISTE DES ABREVIATIONS

ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

AGV: Acide gras volatile

AND: Agence Nationale des Déchets

CDER : Centre de Développement des Energies Renouvelables

CIVE : Cultures Intermédiaires à Vocation Energétique

DMA : Déchets ménagers assimilés

MS : Matière sèche

Mtep : Million tonnes équivalent pétrole

PED : Pays en développement

PH : potentiel d'Hydrogène

STEP : Station d'épuration

LISTE DES Tableaux :

Tableau1 : Compositions des différents types de fumiers.....7

Tableau 2 : compositions des composts8

Le développement socio-économique qui s'est produit aux XIX^{ème} et XXI^{ème} siècles aurait été impossible sans énergie. En effet le charbon, le pétrole, le gaz naturel et diverses autres sources d'énergie ont été le moteur de l'économie mondiale (**Tou et al., 2001**).

Actuellement, l'énergie est disponible en grande quantité, et reste relativement bon marché. Elle permet à de nombreuses populations de jouir de très hauts niveaux de confort, de productivité et de mobilité. L'accès à ces grandes quantités d'énergie et leur exploitation est cependant inégalement réparti entre les régions et les pays (**Anonyme 1**).

Le même auteur rajoute que c'est le cas en Algérie, malgré les richesses en hydrocarbures, l'approvisionnement en combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel...) reste l'un des problèmes majeurs des régions enclavées et plus particulièrement les régions montagneuses et celles du sud, ce qui a engendré une consommation accrue en bois, une dégradation poussée des forêts, une érosion des sols et une détérioration du climat et de l'environnement.

Pour répondre aux besoins en énergie de notre pays, afin d'assurer sa pérennité, réduire sensiblement la pollution locale et l'effet de serre, pour la préservation de l'environnement, la prospection et le développement de nouvelles sources d'énergie ont été entrepris notamment l'énergie de la biomasse et plus précisément le biogaz.

Cette énergie renouvelable largement disponible, peu coûteuse et non polluante est utilisée pour compléter l'énergie fossile non renouvelable. La valorisation des déchets organiques et principalement les déjections animales pour la production de biogaz (biométhanisation) pourrait être considérée comme une solution économique, décentralisée et écologique à ces problèmes à travers une autonomie énergétique et un développement agricole durable des zones rurales (**Tou et al., 2001**).

Le biogaz dont les principes de production datent du milieu du XIX^{ème} siècle, connaît depuis une quinzaine d'année un retour sur la scène mondiale comme source d'énergie renouvelable d'origine naturelle. Son exploitation industrielle permet le bouclage d'un cycle d'économie circulaire des ordures ménagères et des déchets organiques industriels ou agricoles (**Bugat, 2016**). Par ailleurs, cette matière organique, au niveau local, permettra de produire de l'énergie à moindre coût pour la cuisson, le chauffage, l'éclairage, et des engrais à haut potentiel fertilisant (boues stabilisées) comme amendements pour les terres agricoles. Le bio méthane reste une énergie méconnue en Algérie et même si elle ne fait pas partie de nos traditions socioculturelles et économiques, elle doit représenter la meilleure solution pour les problèmes déjà évoqués (**Tou et al., 2001**).

C'est dans ce cadre que s'inscrit notre présent travail qui a pour objectif la production du biogaz à partir d'un sous-produit animal qui est représenté par les déjections des animaux.

Pour ce faire nous avons subdivisé notre travail en deux parties principales, la première est une synthèse bibliographique qui traite les Généralités sur les différents types de fumier ainsi que La méthanisation et Le biogaz.

La deuxième partie est l'expérimentation, suivie par les résultats et discussion puis nous terminerons par une conclusion et quelques perspectives.



Première partie

Approche bibliographique

Chapitre

1

**Généralités sur les différents types de
fumier**

Le fumier est composé d'excréments solides et d'urine d'animaux de ferme ou d'élevage, mêlés le plus souvent à une litière (de la paille ou de la sciure de bois), le fumier est très riche en matières organiques (**Figure 1**), de l'ordre de 30%. Tout à la fois d'origine animale et végétale, il contient en quantité plus ou moins importante de l'azote, du phosphore et de potassium.

Pour les fumiers, il n'existe pas, actuellement, de méthode permettant un dosage rapide de la valeur azotée. L'analyse en laboratoire est la seule possible. L'analyse doit porter sur les critères suivants : % de matière sèche, N total, P₂O₅ et K₂O (**Girardin, 1864**).



Figure 1 : La bouse de bovin (photo originale, 2023)

L'histoire de la bouse de vache

Lemoine, (1998) explique que la crise de l'énergie, contrairement à ce que l'on pourrait penser, n'est pas une nouveauté puisque jusqu'au milieu du XIX^e siècle, on vécut dans la crainte d'une pénurie de bois. Les grandes villes en effet ainsi que les industries métallurgiques, correspondant à la révolution industrielle, en faisaient une consommation croissante. La bonne gestion des forêts faisait partie des préoccupations majeures des rois de France et des seigneurs laïcs ou ecclésiastiques. Si aucun substituant au bois n'était utilisé pour fournir de l'énergie, l'exploitation intensive des forêts menait le pays à la catastrophe.

Si l'utilisation de la bouse de vache était courante comme source d'énergie, les différentes préparations bien que fondées sur les mêmes principes, restaient des méthodes artisanales transmises de génération en génération. Les principes de fabrication étaient simples.

Pour la combustion, la bouse de vache doit être évidemment très sèche. Le plus simple est donc de ramasser les bouses sèches au pré et de les utiliser telles quelles. Pour ce qui est du séchage

des bouses, celles-ci peuvent sécher à même le sol. Une autre méthode de fabrication de ces « bouses séchées » consistait simplement à découper le fumier au printemps (mai, juin) accumulé et tassé dans les étables depuis l'année précédente (**Christophe, 2004**).

Chaque région possède ainsi son matériel spécifique, sa méthode artisanale de fabrication et son vocabulaire. En France, la bouse séchée afin d'être brûlée est généralement appelée "argol", ou encore "bouzat". D'une manière générale, dans les pays où ce mode de chauffage est fréquent, il existe un terme spécial pour désigner la bouse séchée par rapport à la bouse fraîche, alors qu'ailleurs un seul mot est employé. La manière dont s'opère la combustion fait davantage l'unanimité : « sans flamme », donnant « un feu très clair », « beaucoup de chaleur », conservant « un feu semblable à celui des mottes de tanneurs » (**Christophe, 2004**).

Type de fumier :

Fumier traditionnel

Le fumier traditionnel est produit dans la ferme. Chargé en sable, non composté, appelé poudrette, il est de mauvaise qualité fertilisante, sanitaire et organique (**Ganry, 1998**).

Fumier amélioré

Est produit également dans la ferme, dans un élevage partiellement sédentarisé au sein d'un système de production en voie d'intensification. Schématiquement, on peut dire que les techniques de fertilisation des cultures, de stabulation des animaux et d'apports d'eau pour le compostage doivent être mises en œuvre dans le système de production pour que le fumier soit amélioré, le compostage étant la phase essentielle de l'amélioration.

A titre d'exemple, nous distinguerons trois types de fumier de bovins produits en stabulation, selon les matières végétales apportées. Les teneurs sont exprimées par rapport à la matière sèche organique ; les apports de terre, fréquents dans la pratique, réduisent ces teneurs.

Le fumier de foin de jachère est plus riche en phosphate, potasse et calcium, mais plus pauvre en azote ; inversement, le fumier de paille de mil et de sorgho est plus riche en azote mais plus pauvre en phosphore et en potassium. On peut très bien expliquer ces résultats par la richesse initiale en phosphore, potassium et calcium du foin : elle est supérieure à celle des pailles de mil et de sorgho, qui, produites en milieu paysan, sont plus pauvres en ces éléments que les pailles produites en culture fertilisée (**Ganry, 1998**).

Et en suivant les animaux qui le produisent, le fumier peut être de différente qualité :

Le fumier de bovins

Pour **Barrington et al., (1997)** le fumier de bovin est composé de bouses et de paille, riche en matières organiques (azote et potassium) de par la grande quantité d'herbe absorbée par les vaches (**Figure 2**). De plus, c'est un fumier qui apporte une grosse quantité d'humus au sol. Il est dit « froid » car il se décompose assez lentement.



Figure 2 : La bouse de bovin (photo originale, 2023)

Le fumier de cheval

Le fumier de cheval ou d'âne représenté par la **Figure 3**, est essentiellement constitué de crottins, donc de matières du fumier de cheval au jardin et au potager riche en potasse. C'est un fumier sec et chaud qui a la capacité de réchauffer la terre (**Galibardy et Cloustale, 2009**).



Figure 3: Fumier du cheval (Photo originale, 2023)

Le fumier d'ovins et caprin (moutons et chèvres)

Est le fumier le plus sec qui en fait un fumier dit « chaud ». Riche en azote et en potassium, il est relativement léger. C'est le fumier utilisé pour les couches chaudes (**Lhoste et al., 1993**).



Figure 4: Fumier de l'ovin et caprin (Photo originale, 2023)

Le fumier de volailles

Est composé de fientes de poules ou d'autres animaux de basse-cour et de litière. C'est le fumier le plus riche en azote qui ne doit jamais être utilisé tel quel. Les fientes de poules doivent absolument être séchées et compostées (**Brown, 2008**).

Compositions des différents types de fumiers

Le tableau ci-dessous montre que la composition chimique de différents types de fumiers se diffère. Toute fois l'azote, le phosphore ainsi que le potassium dont leur teneur est élevée dans le fumier de volaille, Ovins et le bovin respectivement de l'ordre.

Tableau1 : Compositions des différents types de fumiers

| Type de fumiers ou lisier | Matière sèche % | N (kg /t) | P2 O5 (kg/t) | K2O (kg/t) | Densité (t/m ³) | NH4 (%) | C/N |
|-----------------------------------|-----------------|-----------|--------------|------------|-----------------------------|---------|------|
| Bovins laitiers fumier solide | 21 | 5.7 | 3.6 | 5.3 | 0.80 | 31 | 16.6 |
| Bovins laitiers lisier | 5 | 3.1 | 1.5 | 3.4 | 1 | 52 | 10.8 |
| Bovins de boucherie | 27 | 7.1 | 4.4 | 6 | 0.75 | / | |
| Elevage vache - veau | 26 | 4.8 | 2.4 | 4.62 | 0.75 | / | |
| Ovins | 25 | 11 | 5 | 14 | 0.62 | / | |
| Volaille fumier poulet | 74 | 28 | 23 | 18 | 0.27 | / | 14.5 |
| Volaille fumier de poule pondeuse | 83 | 31 | 26 | 16 | 0.50 | / | 15.4 |
| Porcs | 3.2 | 2.7 à 4.9 | 1.5 à 2.3 | 1.6 à 2.9 | 1 | 71 | 3.3 |

Source (MAPAQ, 1997; CRAAQ, 2003 et 2007 in SIBOUKEUR ,2013).

Evaluation et caractérisation des fumiers

L'évaluation d'un fumier ou d'un compost doit rendre compte de sa valeur fertilisante, mais aussi de sa qualité sanitaire et de ses propriétés d'amendement organique. Sa valeur fertilisante peut varier grandement selon la nature des litières et la fertilisation des cultures qui fournissent ces litières.

Selon **Ganry, (2012)**, le phosphore est souvent l'élément le plus limitant. Pour caractériser le fumier, plusieurs étapes sont indispensables. Evaluation rapide de l'état sanitaire et des propriétés d'amendement du fumier En l'absence d'analyses phytopathologiques et malherbologiques, de détermination du rapport C/N, des matières humiques totales, de l'indice de stabilité biologique et du taux de fibres/contenu cellulaire, il sera nécessaire de procéder à des évaluations qualitatives en se fondant sur les réponses apportées aux questions posées précédemment.

La faisabilité de l'apport de fumier composté, quatre conditions doivent être satisfaites pour fonder une politique de développement et d'utilisation réaliste du fumier (fumier de ferme et fumier de parc) (**Ganry, 2012**).

D'après les données du tableau 2, différents types de composts sont répertoriés avec leurs valeurs respectives pour le contenu en éléments nutritifs. Le tableau présente la composition chimique de différents types de fumiers, en mettant en évidence les niveaux de trois éléments clés : l'azote (N), le phosphore (P₂O₅) et le potassium (K₂O).

Tableau 2 : compositions des composts (**Robitaille et al .1996**)

| Types de composts | N (kg/t) | P ₂ O ₅ (kg/t) | K ₂ O (5kg/t) |
|---|----------|--------------------------------------|--------------------------|
| Composts murs (composts de fumier de bovin et composts commerciaux essentiellement) | 5.8 | 10.1 | 4.1 |
| Composts immatures (composts de fumier de bovin essentiellement) | 7.6 | 9.1 | 5.4 |
| Composts de fumier volaille | 14.1 | 25.7 | 7.1 |
| Composts de bovins laitiers | 8.4 | 6.3 | 12 |

Comment optimiser la qualité agronomique du fumier?

Éliminer les pathogènes, l'apparition de la phase exothermique due à la fermentation des pailles est primordiale, car elle entraîne, à l'instar du brûlis, la disparition des germes pathogènes et des graines d'adventices (**Ganry et Sarr, 1983**) et la destruction des zoospores et oospores de *Sclerospora* (**Mbaye, 1994**).

Cette phase exothermique, inexistante dans le cas de la poudrette, caractérise le fumier amélioré. Enrichir le fumier en azote et phosphore. On sait que la fixation biologique de N₂, expérimentalement mise en évidence, permet au moins de maintenir, en présence de matière cellulosique, le stock d'azote de départ malgré les pertes.

Le compost permet une solubilisation du phosphore et du calcium des phosphates naturels incorporés au début du compostage, d'où la possibilité de constituer une fumure organique N-P au niveau de la ferme, celle-ci apportant généralement assez de potassium pour atteindre un objectif de production d'une tonne par hectare, le potassium étant fourni par le sol et recyclé via les pailles (**Gueye et al., 1986**).

Bertrand (1998), donne une explication à la richesse potentielle en potassium des sols de la zone soudanienne. Si possible inoculer le fumier et l'enrichir en matières végétales riches en fibres Cela fait partie de l'optimisation des conditions de production de fumier (**Ganry, 1998**).

Quelle est l'utilité du fumier ?

Constitué de matières fécales et de matière fibreuses (la paille), le fumier présente plusieurs avantages tant pour la terre que pour les végétaux résumés par **Camara, (1996)** :

- Il amende le sol, c'est-à-dire qu'il en améliore la structure et la texture. Ainsi, suivant le type et la qualité du fumier, une terre argileuse peut être allégée et une terre légère sera densifiée. Et logiquement, le sol augmente sa porosité à l'air et sa rétention à l'eau et aux substances fertilisantes. À ce titre, le fumier joue le même rôle que le compost ;

- Il améliore l'activité biologique du sol car la microfaune trouve de quoi se nourrir. Tous les micro-organismes et les vers de terre transforment cette matière en humus ;

- Il a un rôle fertilisant de par sa haute teneur en azote, potassium et phosphore, mais aussi en minéraux. Il favorise ainsi le développement des végétaux. Le fumier peut donc être considéré comme un engrais, mais il reste moins riche que la corne broyée ou le sang séché, ou encore les algues.

- Matériau de construction :

Sur les 700 millions de tonnes de fumier produites annuellement en Inde, la majeure partie (voire la presque totalité) est utilisée comme engrais et comme combustible, la bouse de vache peut être employée à de nombreuses autres fins.

En effet dans de nombreux pays, elle était ou est encore un élément de base dans la construction, que ce soit pour l'édification des murs, le coffrage des sols, le comblement des fissures ou l'imperméabilisation des toitures. Mélangée à d'autres éléments (sable, terre, paille, branches ...), elle servait de liant et donnait ainsi un caractère solide et imperméable au mélange, utilisé alors comme ciment ou mortier. On trouve des exemples de ces utilisations un peu partout : France, Hongrie, Chine, Réunion, Afrique. Ainsi, chez les Masaïs, le toit des maisons est constitué de branches entrelacées et recouvertes de bouse de vache (**Brochier, 1994**).

L'emploi le plus courant de la bouse en construction reste cependant le colmatage des brèches et l'imperméabilisation par le badigeonnage répété d'un mélange de bouse et d'eau sur les murs. Il paraîtrait de plus que cet enduit chasse les insectes. Son emploi pour la fabrication des sols des demeures est largement répandu dans les pays à température élevée, notamment en Afrique où son utilisation procurait un revêtement lisse, agréable et frais selon les divers témoignages.

Dans de nombreux villages de l'Inde, non seulement le badigeonnage des sols et des murs des maisons d'habitation a lieu quotidiennement, mais encore plus spécialement dans une chambre destinée à une accouchée, dans les pièces où le yoga est enseigné et dans les appartements où se déroulera une fête nuptiale.

La réalisation des aires de battages se faisait à partir d'un mélange de terre et de bouse. Une fois la surface du sol aplani, de la bouse diluée et mélangée à de la terre était enduite à même le sol. Après séchage, on répétait l'opération maintes fois pendant plusieurs semaines avant la mise en service de l'aire. Le revêtement constitué par ces couches de bouses rendait le sol suffisamment dur et solide pour résister aux coups de fléaux et aux poids des rouleaux tirés par les chevaux ou les bœufs (**Lemoine, 1998**).

•Biogaz

Le processus général de fabrication d'un digesteur anaérobie pour la bouse de vache consiste à placer de la bouse et de l'eau dans un récipient hermétique, qui doit être maintenu chaud et non perturbé pour que les bactéries puissent faire leur travail. Le gaz qui est produit est retiré par un tube et stocké. Une fois le biogaz formé, il peut être mis en réaction avec l'oxygène pour produire de l'énergie. Le gaz peut être utilisé pour cuire les aliments, chauffer l'eau et remplacer le carburant classique dans les véhicules à moteur. En outre, l'énergie contenue dans le biogaz peut être utilisée pour produire de l'électricité (**Anonyme 2**).

Chapitre

2

La méthanisation et Le biogaz

Définition de la méthanisation :

La fermentation anaérobie ou méthanisation est un processus microbiologique de transformation des matières organiques en absence d'oxygène, qui conduit à la production de biogaz et de digestat. Le biogaz produit présente un pouvoir énergétique et le digestat peut être utilisé comme amendement organique. Les matières agricoles susceptibles à méthanisation passent par un processus de fermentation anaérobie et de digestion par des bactéries dans un réservoir hermétique appelé réacteur anaérobie, digesteur, fermentateur ou méthanisateur. **(Orofino, G. G. 2015).**

Description de la méthanisation

La méthanisation est un procédé biologique de transformation de la matière organique en biogaz, par l'action de bactéries. Il s'agit de bactéries que l'on retrouve à l'état naturel : par exemple dans les lisiers, fumiers, les végétaux...etc. Ce sont ces bactéries qui permettent la digestion des aliments, et elles vivent sans oxygène : on parle de « digestion anaérobie ». **(Solagro, 2005)**

Ce sont principalement des bactéries et des archæ (micro-organismes proches des bactéries) qui réalisent ces conversions complexes de la matière organique. En raison de cette complexité, la totalité des transformations n'est pas réalisée par une seule espèce, mais par un ensemble (un consortium) au sein duquel chaque groupe réalise une partie du travail de décomposition **(Moletta, R. 2015).**

Le biogaz et la méthanisation

Les énergies telles que l'éolien, le rayonnement solaire, l'hydroélectricité et le biogaz sont quelques-unes des solutions émergentes. Parmi elles, le biogaz, en plus d'être une source d'énergie alternative, offre également la possibilité de transformer les déchets organiques en énergie. De plus, sa valorisation est un moyen efficace de réduire les émissions à effet de serre dans l'atmosphère.

Le potentiel de réchauffement global du méthane est en effet 24 fois plus puissant que le dioxyde de carbone, le biogaz apparaît donc une solution prometteuse pour le développement durable. Toutefois, les applications finales telles que la cogénération ou l'injection dans le réseau du gaz imposent le développement de technologies efficaces pour apporter une solution durable. Le biogaz issu des déchets organiques agricoles et d'effluents d'élevage représente notamment un grand défi et une opportunité pour créer de l'énergie.

D'un côté, cela réduirait les émissions de méthane réels et de l'autre côté, il contribuerait à la demande énergétique de manière durable. **(Chamaa, M. A. 2017).**

Origine et composition du biogaz

Provenant de la fermentation anaérobie de la matière organique, le biogaz est composé principalement de méthane (45-70%) et de dioxyde de carbone (15-45%), et est généralement saturé en vapeur d'eau. Il contient également d'autres gaz issus de la fermentation présents en traces (H₂S, H₂....).

Les bactéries responsables de la formation de biogaz sont naturellement présentes dans l'environnement.

La production de biogaz peut se faire de l'échelle locale (petit digesteur) à la grande échelle: stations d'épuration ou centre d'enfouissement technique où les matières organiques sont rassemblées et transformées en biogaz. La technologie utilisée est liée aux conditions environnementales. Par exemple, en Inde, la technologie est très simple résultant en un grand développement de digesteurs domestiques. Les conditions environnementales telles que la température et l'humidité favorisent la formation de biogaz. Les résidus provenant des ménages et les activités agricoles sont transformés en biogaz et finalement utilisés pour la cuisson et l'énergie électrique. **(Igoud, S et al, 2002).**

Le centre d'enfouissement technique est un des moyens les plus singuliers de la production. La dégradation de la matière organique est mise en œuvre selon un processus discontinu. Des paramètres tels que l'âge et le genre de résidus éliminés diffèrent sensiblement des autres types de productions. Il représente en général un risque pour l'environnement en raison des émissions de gaz qui peuvent inclure des gaz toxiques, d'où l'importance du traitement du biogaz et sa valorisation.

Selon les sources, la technologie et les conditions de fonctionnement, la composition du biogaz diffère. En outre, le contenu du biogaz varie au cours de la production quotidienne. Ainsi, des mesures sont prises régulièrement pour indiquer le processus de fermentation et donc la qualité des biogaz. Il est très important de connaître ses caractéristiques afin de concevoir le processus de séparation. Parmi les différents types de production, les plus importants sont : les centres d'enfouissement technique, la digestion des eaux usées et de la ferme. **(Deublein et Steinhauser, 2008; Ryckebosch et al, 2011)**

Le biogaz dans le monde

En 2018, la capacité de production mondiale de biogaz s'élevait à près de 17 700 MW. L'Allemagne domine le marché du biogaz et devrait continuer à le faire assez longtemps selon les prévisions de Global Data. Le gouvernement allemand a été très actif pour la promotion du biogaz notamment en favorisant le développement de la méthanisation dans le monde agricole. (Igoud, S. 2002).

Energie issue du biogaz en Europe

Avec une production d'énergie primaire, évaluée par EurObserv'ER à plus de de 16 millions de tonnes équivalent pétrole, le biogaz a franchi un nouveau palier au sein de l'Union Européenne. (EurObserv'ER, 2017)

Etant le leader mondial dans la production du biogaz, la production de biogaz en Allemagne était de l'ordre de 7,9 Mtep en 2016, suivi par le Royaume Uni, l'Italie, la République Tchèque et la France en Europe avec des productions de 2,4 ; 2,0 ; 0,6 et 0,5 Mtep respectivement.

Quant à la production en électricité, elle s'élève à 62,5TWh au sein de l'Union Européenne où la production en Allemagne était de l'ordre de 33,7 TWh en 2016, suivi par l'Italie, le Royaume Uni, la République Tchèque et la France en Europe avec des productions de 8,2 ; 7,7 ; 2,5 et 1,9 TWh respectivement. **Production primaire de biogaz de l'Union européenne en 2015 et en 2016 (en ktep) (EurObserv'ER, 2017).**

Le biogaz en France

Au cours des dix dernières années, la méthanisation s'est développée de façon soutenue avec la création, en France, de plus de 360 installations entre 2007 et 2017.

463 installations produisent de l'électricité à partir de biogaz (2016), correspondant à une puissance installée de 379 MW. Au cours du premier semestre 2016, 12 MW ont été raccordés, s'ajoutant aux 367 MW raccordés fin 2015.

Les unités de méthanisation représentent plus de la moitié du nombre et de la puissance des installations nouvellement raccordées. La taille des installations du parc est très variable selon le type d'installations. La méthanisation représente ainsi 63 % du nombre d'installations et 26 % de la puissance installée. La puissance des projets en file d'attente atteint 109 MW au 30 juin 2016.

Enfin, les injections de biométhane dans les réseaux de gaz naturel sont en constante progression. Elles ont été multipliées par 2,5 au premier semestre 2016 par rapport au premier semestre 2015.

Une trajectoire figure dans le plan national d'action en faveur des énergies renouvelables, prévu par la directive 2009/28/CE relative à la promotion de l'utilisation des énergies renouvelables. La puissance électrique des installations biogaz devrait finalement atteindre 625 MW en 2020.

La programmation annuelle de l'énergie (PPE) prévoit un premier objectif de puissance installée pour les installations de méthanisation de :

- 137 MW pour fin 2018
- entre 237 et 300 MW pour fin 2023.

(ADEME, base de données SINOE)

Etat des lieux en Algérie

Au fil des années, nous avons assisté à l'émergence croissante de l'économie biobasée et des énergies renouvelables. Cependant, l'Algérie, malgré ses ressources en gaz naturel et en pétrole, est en retard par rapport à d'autres pays qui s'engagent pleinement dans l'économie biobasée et circulaire.

En Algérie, le développement de la filière biogaz est encore à l'échelle de l'expérimentation. Ainsi, la wilaya d'Oran a été retenue pour abriter un projet-pilote pour produire de l'énergie électrique à partir du biogaz généré par le centre d'enfouissement technique de Hassi Bounif. Un projet pilote de méthanisation est en voie de finalisation au niveau de l'ex-décharge publique Oued S'mar pour l'exploitation du biogaz obtenu grâce à la fermentation des déchets organiques. Un autre projet pilote d'installation de taille industrielle est à l'étude à Constantine ; il s'agit d'une unité de tri et de valorisation des déchets par une filiale d'un groupe industriel étatique dédiée à l'environnement. La filiale a obtenu un soutien accru de l'état, qui fixe également des objectifs de développement de la méthanisation. Ce modèle est amené à être étendu à travers le territoire national en vue de traiter différents types de déchets : ménagers, boues de stations d'épuration, rejets agricoles et d'élevage.

Une étude du CDER a en effet montré que le volume du biogaz, obtenu après la décomposition anaérobie (sans oxygène) des matières organiques contenues dans les

DMA, les déchets agricoles et d'élevage, les bios déchets issus des industries agroalimentaires et des stations d'épuration des eaux usées (STEP), est estimé à 1009,76 millions de m³/an. La conversion de cette quantité du biogaz en électricité permettrait de produire plus de 2032,6GWh soit 2 TWh par an. (AND, 2014)

Unité de méthanisation

Le digesteur est constitué d'un réservoir étanche, en béton ou en acier, où les matières à digérer séjournent plusieurs semaines : c'est le digesteur. C'est le cœur du procédé, ou plus exactement son estomac.

La méthanisation se déroule classiquement à 37°C (mode dit « mésophile »), et plus largement entre 20 et 60°C. Pour que les bactéries colonisent l'ensemble de la masse en fermentation, il est nécessaire d'homogénéiser le produit. Un digesteur est donc généralement chauffé et brassé. **Moletta, R. (2015).**

Types de digesteurs anaérobies

La teneur en matière sèche (MS) du substrat disponible et, à l'opposé, la teneur en eau déterminent généralement le choix des procédés de méthanisation et le type de digesteur anaérobie. De façon arbitraire, la digestion anaérobie est dite « humide » dans le cas du traitement des déchets ayant entre 5 et 20% de taux de matière sèche (MS). Elle est dite « sèche » pour des déchets dont le pourcentage de MS est compris entre 20 et 50%. En deçà de 5% de MS, c'est la digestion anaérobie des effluents liquides, tandis qu'au-delà de 55% de MS, le substrat est difficilement traitable par digestion anaérobie (**Moletta, 2008**).

Dans les pays industrialisés, les digesteurs anaérobies sont généralement groupés en 3 grandes catégories, en fonction de leurs modes et fréquences d'alimentation, ainsi que de leurs degrés de sophistication :

- Les digesteurs discontinus ou batch à étape unique ;
- Les systèmes d'alimentation en continu et à étape unique ;
- Les réacteurs en continu et à étapes multiples, dans lesquels la phase d'hydrolyse et acidogénèse est séparée de l'acétogénèse et la méthanogénèse, pour améliorer la stabilité du processus (**Bekkering et al., 2010**).

Ces systèmes s'adaptent généralement à la fois aux voies humides et sèches de la digestion anaérobie.

Les digesteurs anaérobies des PED sont ordinairement exploités par voie humide pour faciliter la manutention de la matière en entrée et en sortie de digesteur. Ils peuvent également être regroupés en 3 grandes catégories, en prenant uniquement en compte leur fréquence d'alimentation (**Héduit, 1993**) :

- Les digesteurs discontinus (ou batch), chargés une seule fois, jusqu'à épuisement du substrat et fin du processus méthanogène ;
- Les digesteurs continus, dont le contenu est en partie renouvelé régulièrement ;
- Les digesteurs semi-continus, correspondant à des procédés continus plutôt rustiques ou non conventionnels.

Digesteurs discontinus

Dans cette catégorie de digesteurs type batch, figurent les principaux types de digesteurs parmi les plus connus:

- Le digesteur Ducellier-Isman, disposant d'un système de pré-fermentation aérobie permettant d'éviter l'acidogénèse, lors du démarrage des réactions biologiques. (Figure 5)
- Le digesteur du CIEH (Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques) ou « puits », généralement disposé en batterie. (Figure 6)

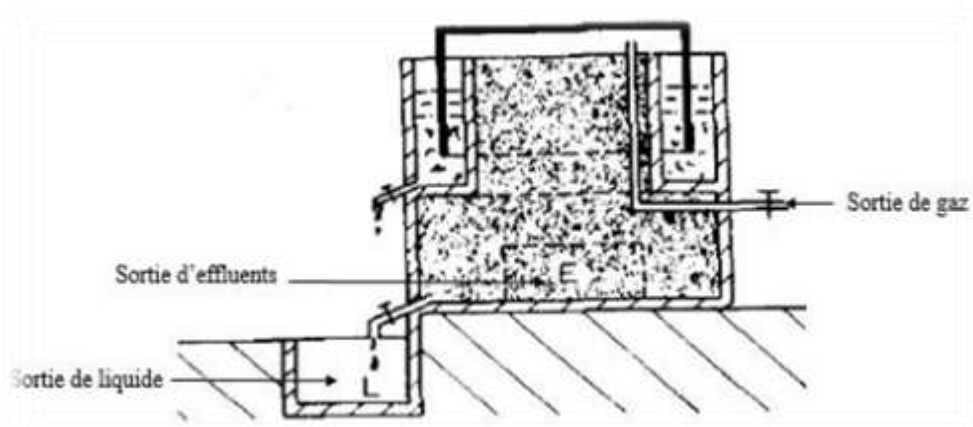


Figure 5: Représentation schématiques du digesteur type Ducellier-Isman

(Source : Brakel (1980))

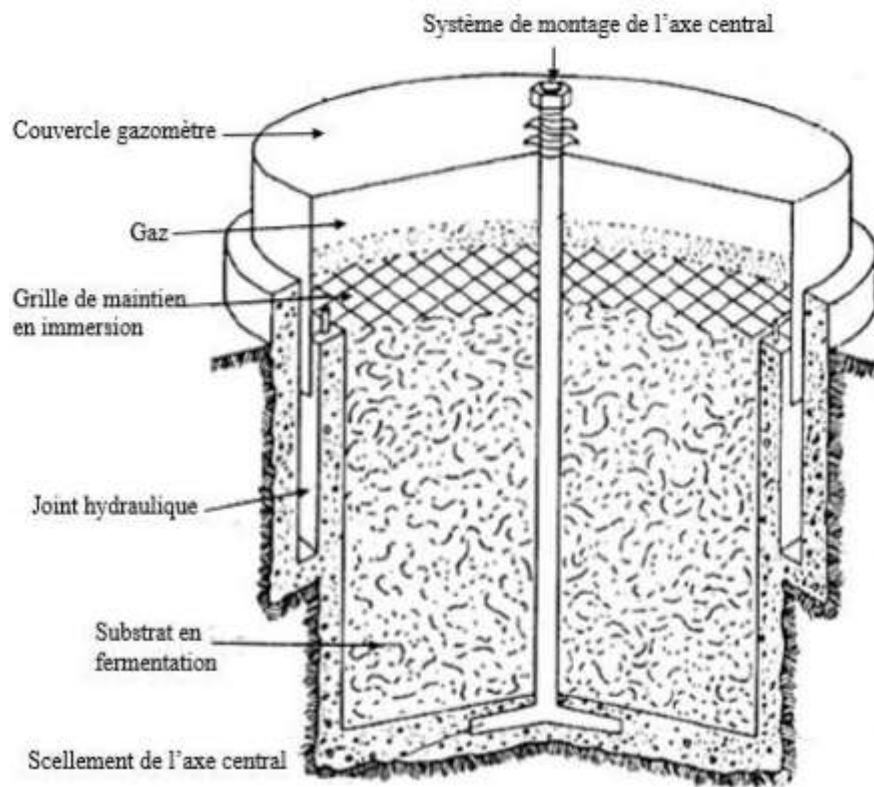


Figure 6: Coupe schématique d'un digesteur CIEH de petite capacité (Source : Degoulet (1984)).

Ces digesteurs dits « batch », sont caractérisés par une opération de chargement du substrat, souvent accompagné d'un inoculum et, dans certains cas, d'un additif chimique (généralement alcalin) pour maintenir le pH proche de la neutralité. Le digesteur, une fois rempli, est fermé jusqu'à la fin de la fermentation. Le processus est généralement réalisé sur une période allant de 30 à 180 jours pendant laquelle la production journalière de biogaz augmente graduellement, jusqu'à un maximum, puis diminue (FAO, 1992).

Ce procédé est souvent improprement assimilé à une « fermentation sèche », puisqu'il supporte des concentrations de MS comprises entre 150 et 300 kg/m³ de digesteur ; le rendement volumique maximal est d'environ 1 m³biogaz.m⁻³digesteur.jour⁻¹ (Hédouit, 1993).

1.1.1 Digesteurs semi-continus conventionnels

D'après **Héduit (1993)**, ces digesteurs sont caractérisés par (I) un chargement aléatoire en qualité et en quantité; (II) une évacuation en continu ; et une nécessité d'arrêt pour le nettoyage. Ils sont adaptés à des effluents liquides ou solides, à faible teneur en composés ligno-cellulosiques. Ils offrent l'avantage d'être relativement simples de construction et de mise en œuvre, à partir de matériaux disponibles localement. Cependant, l'absence de systèmes mécanisés ou tout autre dispositif d'agitation ou d'évacuation des substrats digérés, occasionne une sédimentation qui réduit le volume utile du digesteur et diminue le temps de séjour théorique. D'où la nécessité d'un curage assez régulier. Le rendement volumique est de l'ordre de 0,5 m³/m³ de digesteur, sur un temps de rétention hydraulique qui peut aller jusqu'à plus de 100 jours.

Deux (2) principaux types de digesteurs sont représentatifs de cette catégorie (**FAO, 1992**):

- 1) Les digesteurs à dôme encastré (fixed dome type), dits « type chinois », pour avoir été construit pour la première fois à Jiangsu (Chine), en 1936.
- 2) Les digesteurs à cloche mobile (floating dôme type), aussi appelés « type indien », conçus en 1950 et diffusés pour la première fois dans le cadre du programme de la KVIC (Khadi and Village Industries Commission) de Bombay (Inde).

Digesteurs à dôme encastré

Ce type de digesteur, également connu sous les noms de digesteur hydraulique ou à pression hydraulique, est caractérisé par une structure en forme de dôme rigide et non amovible, posé sur le digesteur, jouant le rôle d'un gazomètre et offrant une voie d'accès pour l'entretien du digesteur. Quand démarre la production méthanogène, le mélange liquide-substrat est migré vers une chambre d'expansion. La pression dans le digesteur augmente avec le volume de gaz stocké et la différence de hauteur entre les 2 niveaux du mélange dans le digesteur et dans la chambre d'expansion (**ISAT-GTZ, 1998**).

En termes de nombres absolus, le type de digesteur à dôme encastré est de loin le plus répandu dans les PED, avec plus de 5 millions d'unités de taille familiale rien qu'en Chine, à la fin du 20^{ème} siècle (**FAO, 1992**). Le succès de ce type de digesteur est probablement dû à la disponibilité locale des matériaux de construction, aux coûts d'installation relativement faibles, à l'absence de composantes amovibles et d'acier corrodable, à une longue durée de vie dans le cas où il a été bien construit et bien entretenu, une économie de l'espace liée à sa construction souterraine, etc. Cependant, les retours d'expérience font état de certains

problèmes fréquemment rencontrés, dont des cas de fuites dans la partie supérieure de la structure en briques et perte de biogaz, fluctuation de pression du gaz en fonction du volume stocké, température généralement relativement faible, en dépit de l'effet tampon de la construction souterraine.

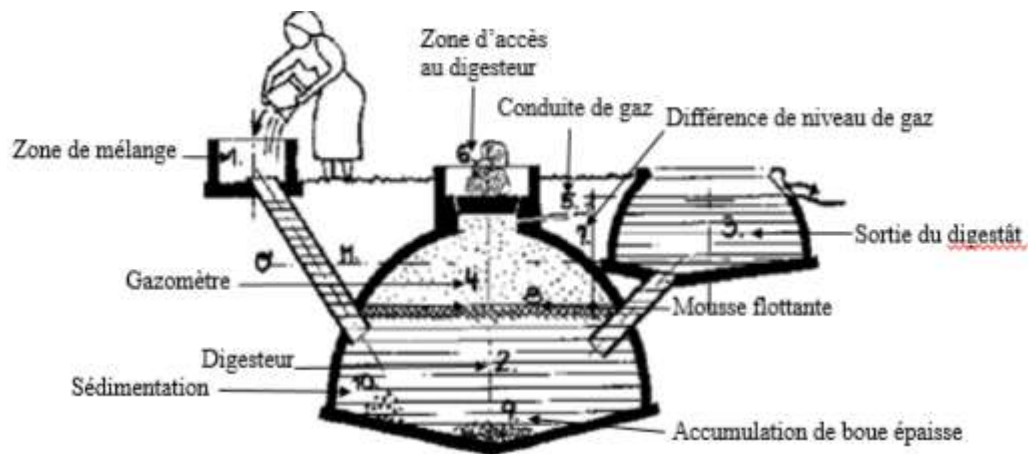


Figure 7: Représentation schématique d'un digesteur à dôme encastré

(Source : Sasse (1988))

Deux modèles de ce type sont présentés par **Singh et Sooch (2004)** :

La principale caractéristique du premier modèle, appelé « modèle Janata » conçu en Inde, est que le digesteur et le gazomètre sont intégrés dans la structure de maçonnerie en briques.

Le second, le « modèle Dheenbandhu », développé à New Delhi (Inde), en 1984, est conçu sur la base du principe de minimisation de la surface occupée par le digesteur dans le but de réduire les coûts d'installation, sans compromettre les caractéristiques opérationnelles de celui-ci. Ce modèle est par conséquent l'un des moins chers de ce type. Il est conçu à partir de 2 sphères de diamètres différents, joints à leurs bases, et fonctionnant à la fois comme digesteur et comme gazomètre.

Digesteurs à cloche mobile

Les murs de ce type de digesteur sont généralement construits en briques (rarement en béton) et surmontés d'une cloche mobile en métal ou en plastique comme gazomètre. Le biogaz produit est stocké dans la cloche mobile, laquelle monte et descend sur un axe central (**FAO, 1992**).

L'une des citernes, plus petite, constitue le gazomètre et est renversée au-dessus de la plus grande qui contient le mélange de substrat à fermenter et la boue active. Le concept est

suffisamment compact pour être utilisé par les ménages urbains de même que par les fermiers du milieu rural (Müller, 2007).

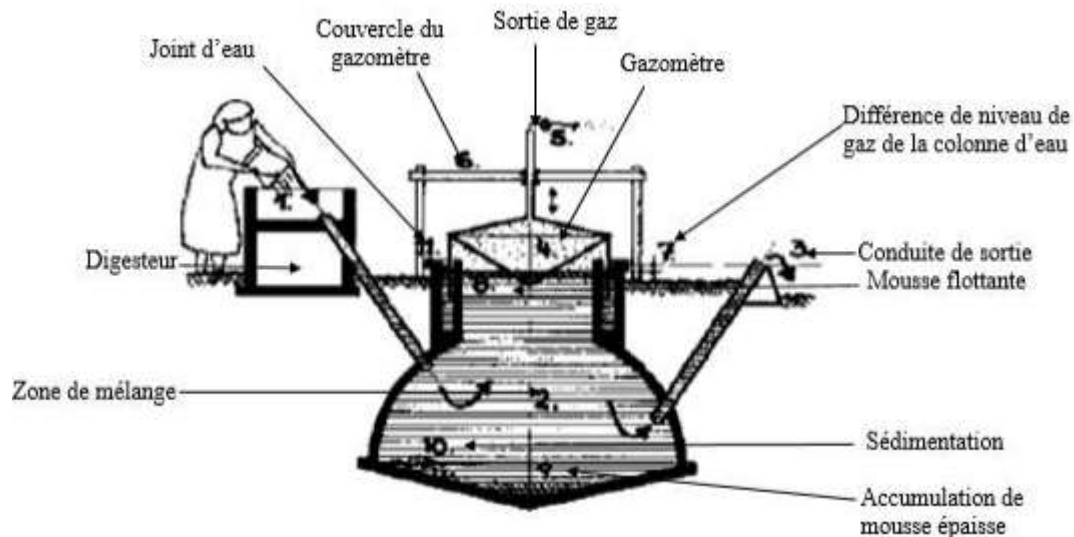


Figure 8: Représentation schématique d'un digesteur à cloche mobile

(Source : Sasse (1988))

Digesteurs infiniment mélangés

Ces digesteurs sont munis de dispositifs d'agitation (hydraulique, mécanique ou par injection de biogaz) permettant d'éviter des dépôts importants de sédiments. Ils sont adaptés à des effluents liquides et des charges de 3 à 5 kg MS/m³/jour. Leur productivité est de 1 à 1,5 m³ de biogaz/m³ de digesteur/jour. Le temps de rétention est généralement de 10-20 jours, tout en assurant une dégradation totale de l'effluent (Héduit, 1993).

La figure 9 représente schématiquement 4 modèles de digesteurs mélangés, avec des dispositifs d'agitation différents :

- (a) un rotor mécanique immergé dans le digesteur
- (b) un dispositif d'agitation hydraulique
- (c) une palette d'agitation disposée sur le côté
- (d) un dispositif d'agitation par injection de biogaz

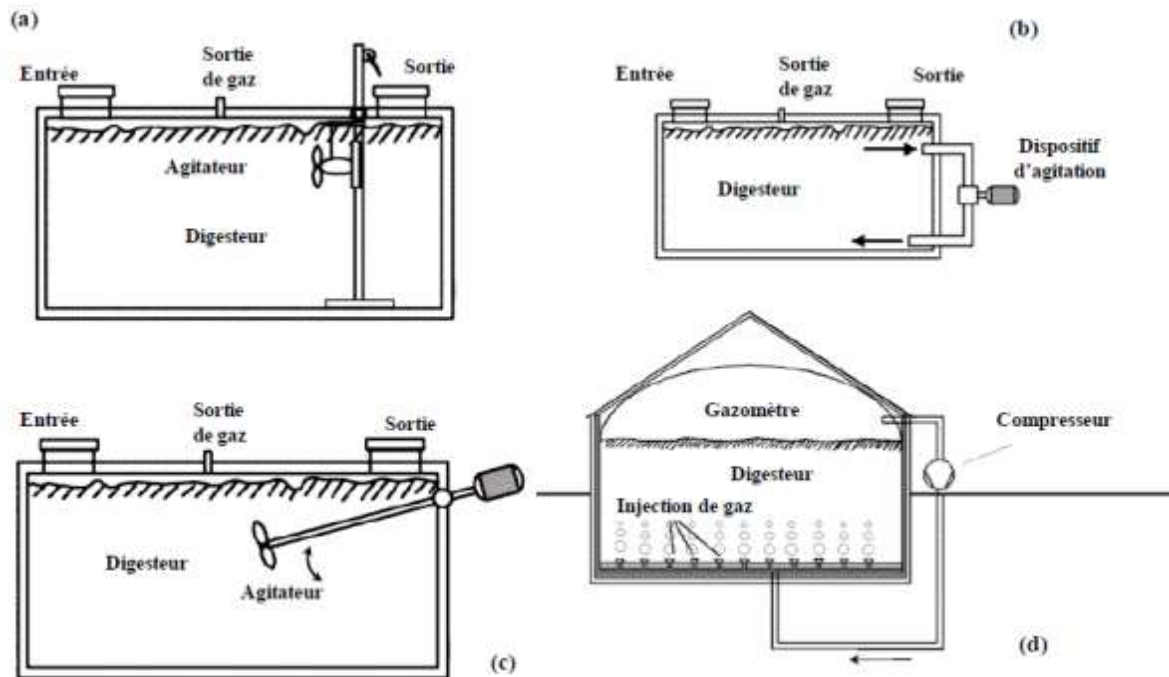


Figure 9: Coupes schématiques de digesteurs infiniment mélangés

(Source : (ISAT-GTZ, 1999)

Digesteurs de type piston

Les digesteurs de ce type peuvent être disposés soit verticalement, soit horizontalement. Ils sont souvent munis d'un système d'agitation qui est assuré optionnellement par (Moletta, 2008)

- une recirculation du digestât à l'aide d'une pompe extérieure ;
- des hélices sur un axe longitudinal (réacteur à piston horizontal) ;
- des pales sur axes transversaux (réacteur à piston vertical).

Représentatif de ce type, le modèle Transpaille mis au point vers la fin des années 1980 par l'Institut de Recherches Agronomiques Tropicales (IRAT), traite les résidus agricoles solides et liquides pour la production de biogaz et la fabrication de compost.

Le dispositif piston est constitué d'un bouclier qui est poussé par un vérin hydraulique actionné manuellement ou mécaniquement. L'évacuation de la boue digérée est concomitante au remplissage. Le recyclage du liquide d'immersion permet un ajout minimal d'eau

(Hédouit, 1993).

Étapes de la méthanisation

Les déchets organiques sont des substrats hétérogènes, composés de molécules diverses, exigeant un processus métabolique complexe pour leur dégradation et faisant intervenir une longue série de réactions biochimiques, avant leur conversion et réduction finales en méthane. Les principales composantes des déchets organiques biodégradables sont représentées par les carbohydrates, les lipides et les protéines. Les carbohydrates sont facilement et rapidement convertis par hydrolyse en sucres simples, puis fermentés en acides gras volatiles (AGV) (Mata-Alvarez, 2002).

Les lipides sont hydrolysés en acides gras à longues chaînes, puis oxydés en acétate ou propionate, dans la mesure où la pression partielle de l'hydrogène est suffisamment faible thermodynamiquement pour permettre cette conversion. Les bactéries méthanogènes hydrogénophiles jouent un rôle majeur dans la réduction de la concentration d'hydrogène. Les protéines sont hydrolysées en acides aminés, lesquels sont ensuite dégradés en AGV par oxydation anaérobie, en fonction du niveau de production d'hydrogène (Mata-Alvarez, 2002).

Les étapes intermédiaires à la formation de méthane sont ici résumées pour faciliter la compréhension de l'ensemble du processus et un contrôle effectif de la mise en opération des digesteurs anaérobies. La figure suivante présente l'ensemble des voies métaboliques, avec leurs groupes de micro-organismes respectifs, en 3 étapes principales :

1. l'hydrolyse et acidogénèse ;
2. l'acétogénèse ;
3. la méthanogénèse.

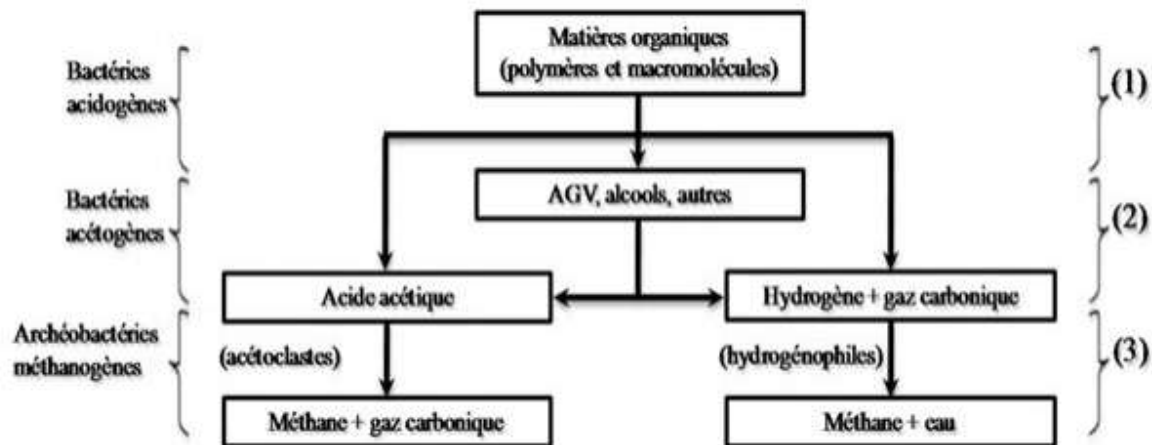


Figure 10 : Principales étapes de la digestion anaérobie et leurs groupes de microorganismes respectifs (Lacour, 2012)

L'hydrolyse

L'hydrolyse est la seule étape extra-cellulaire. Elle consiste en la dépolymérisation de composés organiques complexes. Ces composés peuvent classiquement être décomposés en quatre classes (**Batstone et al, 2002**) :

- Les polysaccharides : Enchaînement de monosaccharides reliés par des liaisons covalentes. La molécule peut être sous forme cristalline ou amorphe. Les principaux polysaccharides rencontrés dans les substrats sont la cellulose (polymère de Dglucoses reliés par des liaisons glycosidiques β -1,4), l'hémicellulose (polymère constitué de molécules monomériques variées telles que le D-glucose, le D-mannose et le Dgalactose reliées par des liaisons glycosidiques β -1,4) et l'amidon (polymère constitué de molécules de Dglucoses reliées par des liaisons glycosidiques α -1,4 et α -1,6). (**Hendrick et Zeeman, 2009**)
- Les protéines : Enchaînement d'acides aminés dont la constitution détermine la nature et la résistance de la protéine. Elles peuvent être sous formes fibrillaires (insolubles, par exemple, les kératines) ou globulaires (solubles, par exemple, la caséine ou la gélatine).
- Les lipides : Biochimiquement, les lipides regroupent l'ensemble des composés organiques hydrophobes. Les principaux lipides susceptibles d'être hydrolysés sont les glycérides constitués d'un glycérol et de 1 à 3 acides gras à longue chaîne (AGLC) qui lui sont reliés par une liaison ester. Ainsi, on peut distinguer : les mono-glycérides (1 glycérol + 1 AGLC), les di-glycérides (1 glycérol + 2 AGLC) et les tri-glycérides (1 glycérol + 3 AGLC).

- Les matériaux composites constitués d'une association de molécules issues des trois classes précédentes.

Cette classification des substrats potentiels, décrite par **Batstone et al. (2002)**, exclut d'autres composés qui peuvent être dégradés par digestion anaérobie mais avec des cinétiques très lentes. C'est le cas de composés comme la lignine, un polymère constitués d'alcool paracoumarylique, d'alcool coniférylique et d'alcool sinapylique reliés par différents types de liaisons covalentes (**Hendrick et Zeeman, 2009**). Ce composé est synthétisé par le monde végétal pour des fonctions de structure, d'imperméabilité et de résistance aux attaques microbiennes et aux attaques oxydatives chimiques. Sa dégradation par des microorganismes bactériens est donc très lente (**Sleat and Robinson, 1984 ; Adney et al., 1991**) et la lignine est considérée comme non biodégradable dans les procédés de digestion anaérobie (**Chandler et al., 1980**).

- L'étape d'hydrolyse conduit à la production de monomères dont les principaux sont les monosaccharides, les acides aminés et les acides gras à longue chaîne. La nature des monomères produits dépend de la nature de molécule hydrolysée. La biomasse intervenant est généralement anaérobie facultative. Elle synthétise des enzymes qui sont excrétées hors de la cellule et viennent catalyser l'hydrolyse des polymères. Cette hydrolyse enzymatique peut être conceptualisée de deux manières différentes :
 - Les biomasses sécrètent des enzymes dans la matrice du digesteur qui s'adsorbent sur les particules à hydrolyser et les décomposent. Les biomasses croissent sur les composés solubles libérés par l'hydrolyse dans la matrice.
 - Les biomasses s'adsorbent sur les particules, produisent des enzymes excrétées au niveau de la surface de contact et se nourrissent des produits hydrolysés.
 - Au vu des travaux de **Vavilin et al. (1996) et de Sanders et al. (2000)**, il semble que le premier phénomène puisse être considéré comme prépondérant dans un digesteur.

L'hydrolyse est un phénomène complexe, de par la variabilité des substrats potentiels et les nombreux facteurs d'impact jouant sur les cinétiques globales. On peut illustrer ce propos avec l'exemple de l'hydrolyse de la cellulose.

L'hydrolyse de la carbohydrates – exemple de la cellulose

Les mécanismes d'hydrolyse de la cellulose seront plus détaillés que les autres voies biochimiques d'hydrolyse du fait que l'hydrolyse des carbohydrates structuraux semble non optimale dans les procédés de digestion. En effet, dans un digesteur, la cellulose n'est digérée en moyenne qu'à 50-60% en 30 à 40 jours (**Chynoweth et al., 1998**) alors que le rumen d'une vache à un rendement de 60-65% en 48h et que les termites digèrent 90% de la cellulose qu'elles ingèrent (**Moletta, 2008**).

L'hydrolyse des lipides

L'hydrolyse des glycérides conduit à la formation de glycérol et de n-AGLC (1 si monoglycéride, 2 si diglycéride, 3 si triglycéride). Cette étape est réalisée par des lipases extra-cellulaires et est souvent considérée comme non-limitante (en comparaison de la dégradation des AGLC) (**Pavlostathis et Giraldogomez, 1991 ; Broughton et al., 1998 ; Becker et Markl, 2000 ; Masse et al., 2003**).

L'hydrolyse des protéines

L'hydrolyse des protéines est réalisée par des protéases extracellulaires. Tout comme les cellulases, il existe différents types de protéases en fonction de leur mode d'action sur les protéines. On peut noter que les protéines globulaires (gélatine, ...) sont hydrolysées plus rapidement que les protéines structurelles (kératine, ...) (**Ganesh Kumar et al., 2008**). Les produits de cette hydrolyse sont les acides aminés constitutifs de la protéine hydrolysée. Ainsi, les différents polymères présents dans les substrats pour la digestion anaérobie présentent des cinétiques d'hydrolyse qui sont très différentes du fait de leur composition biochimique mais aussi de la structuration de la matière organique qui peut limiter son accessibilité aux enzymes hydrolytiques (**Vavilin et al., 1996 ; Sanders et al., 2000 ; Vavilin et al., 2008**).

L'acidogénèse

L'acidogénèse consiste en la transformation des produits de l'hydrolyse (monosaccharides, acides aminés) en composés tels que des acides gras volatils (AGV), des alcools, du dihydrogène, du dioxyde de carbone, de l'ammoniac et de l'eau. Cette réaction ne nécessite pas d'accepteur d'électrons externe et est réalisée par des bactéries anaérobies facultatives (**Gujer and Zehnder, 1983**). Elle est réalisée par la même biomasse que l'hydrolyse. Son rendement énergétique est assez élevé. De ce fait, cette réaction reste possible à des

concentrations en produits (AGV) élevées. Ce mécanisme est intracellulaire, ce qui nécessite que les molécules pénètrent à travers la membrane des bactéries acidogènes.

L'acidogénèse des sucres

Les substrats utilisés ici sont les monosaccharides : hexose (glucose, ...) et pentoses (fructose, ...) principalement. L'acidogénèse des sucres peut conduire à d'autres produits que les acides gras volatils (**Madigan et al., 2000**), en particulier des alcools et de l'acide lactique (**Skiadas et al., 2000**). Celui-ci est rapidement dégradé et n'est donc, en général, présent en concentration significative qu'au cours d'un démarrage de digesteur. Cependant, du fait de son faible pKa (3,86 à 20°C), cet acide a tendance à fortement diminuer le pH et concourt au risque d'acidose lors du démarrage d'un réacteur. L'éthanol est, quant à lui, produit dans des conditions acides (pH<5) qui ne sont en général pas rencontrées sur les digesteurs (**Ren et al., 1997**).

L'acidogénèse des acides aminés

Il existe deux voies conduisant à l'acidogénèse des acides aminés :

- l'oxydoréduction de Stickland : deux acides aminés différents sont utilisés. Un comme accepteur et l'autre comme donneur d'électrons pour produire, à partir de chaque acide aminé, une molécule d'acétate et un acide carboxylique dont la nature dépend de la chaîne carbonée de l'acide aminé dégradé.
- L'oxydation d'un seul acide aminé avec pour accepteur d'électrons de l'hydrogène ou du dioxyde de carbone.

La voie de Stickland semble privilégiée car elle est plus rapide (**Barker, 1981**). On peut noter que les acides aminés aromatiques (phénylalanine, tyrosine, tryptophane) sont dégradés plus lentement que les acides aminés non aromatiques (alanine, glycine, cystéine, ...) (**Ganesh Kumar et al., 2008**).

L'acétogénèse des acides gras

Cette étape intracellulaire regroupe l'ensemble des réactions conduisant à la production d'acétate. Parmi les biomasses impliquées dans cette réaction, on distingue :

- les bactéries homoacétogènes qui convertissent l'H₂ et le CO₂ en acétate.

- les bactéries acétogènes productrices obligées d'hydrogène (OPHA) qui convertissent les acides gras en acétate, H₂ et CO₂. (**Drake, 1994**).

Au cours de cette étape, les AGLC sont convertis en acétate, H₂ et CO₂. Cette étape est thermodynamiquement impossible en conditions standard ($\Delta G^\circ > 0$). En revanche, elle devient rentable énergétiquement si l'un des produits de la réaction, l'H₂, est présent en quantité très faible dans le milieu. Ainsi, pour que cette réaction soit possible, il faut que les archées méthanogènes, entre autres, consomment l'H₂ produit. Il existe donc une syntrophie entre les méthanogènes hydrogénotrophes et les bactéries acétogènes (**Hattori, 2008**).

La méthanogénèse

C'est au cours de cette étape que du CH₄ et du CO₂ sont produits. Deux voies métaboliques sont principalement impliquées dans cette réaction : la méthanogénèse hydrogénotrophe et la méthanogénèse acétotrophe (**Ferry, 1993**).

La méthanogénèse acétotrophe

En présence d'une molécule d'eau, l'acétate est converti en méthane et dioxyde de carbone. Comme le soulignent **Batstone et al. (2002)**, cette étape est principalement réalisée par deux genres d'archées différents : Methanosaeta et Methanosarcina. En général, les deux genres, qui sont majoritaires, cohabitent mutuellement (**Schmidt et Ahring, 1996**). Cette voie représente en moyenne 70% du méthane produit (**Gujer and Zehnder, 1983**).

La méthanogénèse hydrogénotrophe

Dans cette voie, les bactéries hydrogénotrophes réduisent le dioxyde de carbone avec l'hydrogène pour former du méthane et de l'eau (**Ferry, 1993**). Cette voie représente environ 30 % du méthane produit (**Gujer and Zehnder, 1983**). En conditions standards, cette réaction est en général plus rapide que la voie acétotrophe du fait d'une enthalpie libre de réaction plus fortement négative ($\Delta G^\circ = -136 \text{ kJ.mol}^{-1}$ pour la méthanogénèse hydrogénotrophe contre $\Delta G^\circ = -31 \text{ kJ.mol}^{-1}$ pour la méthanogénèse acétotrophe).

Ainsi, la digestion anaérobie est une chaîne réactionnelle syntrophique complexe où des biomasses spécifiques sont impliquées. Selon les caractéristiques de la matière organique des substrats, le réseau trophique en dégradera une part plus ou moins importante avec une cinétique plus ou moins rapide. Cependant, les caractéristiques biochimiques de la matière organique ne sont pas les seules à entrer en ligne de compte. Les critères liés à l'accessibilité physique et chimique de la matière organique doivent être pris en compte. D'autre part, ce

processus étant biologique, il faut que le milieu réactionnel soit propice au développement des différentes flores microbiennes du réseau trophique. La matière organique fournit l'énergie (catabolisme) et le carbone (anabolisme) nécessaires aux micro-organismes impliqués dans la digestion anaérobie. Mais pour croître, les micro-organismes anaérobies ont aussi besoin de nutriments autres que les substrats carbonés. Les nutriments essentiels sont : des micronutriments, des minéraux (macronutriments), des facteurs de croissance et des éléments traces métalliques. Ainsi, **Parkin et Owen (1986)** définissent un ratio C/N optimal dans les substrats dégradés entre 20 et 30 pour satisfaire les besoins en azote des micro-organismes.

D'éventuelles carences en nutriments ne sont pas les seuls mécanismes pouvant impacter les cinétiques de biodégradation. De nombreux composés ou facteurs environnementaux à caractères inhibiteurs peuvent également induire une diminution des cinétiques de croissance des micro-organismes du réseau trophique et donc une diminution des cinétiques de dégradation.

Paramètres généraux de fonctionnement

Facteurs d'influence :

Température

La température opérationnelle à l'intérieur du digesteur est l'un des paramètres majeurs du processus de production de biogaz. Elle a un effet sur le niveau d'activité biométhanogène, la durée de la fermentation et sa stabilité. Desai (1988), rapporté par (**Yadvika et al. 2004**), a remarqué que lorsque la température du digesteur était maintenue à 40°C il était possible de réduire le temps de rétention de plus de 40%.

Généralement, 3 plages de température sont retenues pour la digestion anaérobie, avec des avantages et des limitations spécifiques :

- 1) La digestion anaérobie psychrophile (<25 °C) qui favorise souvent une activité méthanogène limitée ;
- 2) La digestion anaérobie mésophile (25–40 °C) qui représente la plage optimale pour la production de biogaz ;
- 3) La digestion anaérobie thermophile (>45 °C), souvent associée à une production méthanogène plus importante. En effet, les processus thermophiles deviennent plus rapides,

mais également plus instables et moins efficaces économiquement (**Angelidaki et Ahring, 1994**).

Les réacteurs biologiques fonctionnant entre 25 °C et 35 °C sont généralement les plus utilisés pour leur plus grande stabilité (**Tchobanoglous et al., 2003**) et pour être plus adaptés aux conditions tropicales de la plupart des PED, sans besoin de recours à une source de chaleur extérieure. Dans ces conditions, des mesures assez simples sont généralement préconisées pour gérer la température interne du digesteur. Le digesteur anaérobie est généralement orienté de façon à profiter d'une insolation maximale. Il peut également être enterré ou recouvert de résidus végétaux disponibles localement pour éviter des variations journalières importantes de température auxquelles la microflore méthanogène est particulièrement sensible (**Garba, 1996**). Dans le même temps, ces pratiques permettent de limiter et de minimiser les pertes de chaleur dans le digesteur par échange avec son environnement (**Yadvika et al., 2004**).

PH

L'hydrogène représente un produit intermédiaire très important du processus de digestion anaérobie. Dans la plupart des réactions où il est produit, l'hydrogène doit avoir une pression partielle relativement faible pour que la réaction soit possible. La production d'AGV au cours des phases initiales de la digestion anaérobie produit des ions hydrogènes et fait diminuer le pH. Mais la réaction entre le gaz carbonique qui est soluble dans l'eau et les ions hydroxydes pour former des ions bicarbonates tend à rétablir la neutralité du pH, le processus est ainsi autorégulé et bien tamponné. En outre, les bactéries méthanogènes consommatrices d'hydrogène contribuent également à la stabilité du processus et sont absolument nécessaires pour assurer la faisabilité thermodynamique des réactions (**Mata-Alvarez, 2002**). En effet, quand le niveau de production d'acide excède la conversion en méthane, il se crée un déséquilibre dans le processus qui se traduit par une diminution du pH, une baisse de la production de biogaz et l'appauvrissement de celui-ci par une teneur de plus en plus élevée en dioxyde de carbone (**Eckenfelder, 2000**).

Les bactéries impliquées dans la digestion anaérobie supporte des pH variant entre 6 et 8, avec une activité optimale autour de 7 (**Igoni et al., 2008**).

Le pH peut être mesuré à l'aide d'un pH-mètre électrochimique ou d'un papier pH.

Ce paramètre n'est pas toujours facilement contrôlable puisqu'il est lié à de multiples autres paramètres (charge organique, nature du substrat, teneur en graisse, activité microbienne,

etc.) du processus de digestion anaérobie. Cependant, le maintien d'une alcalinité suffisante, en tout temps supérieure à 3000 mg.l-1, assure le tampon du digesteur anaérobie et une production méthanogène optimale. Ce paramètre est mesurable par dosage acido-basique. La chaux est généralement utilisée pour ajuster le pH et rétablir l'équilibre du processus (Eckenfelder, 2000).

Granulométrie

La taille des particules a une influence certaine en particulier sur la biodégradabilité des substrats ligno-cellulosiques et sur le niveau de production méthanogène. De façon générale, l'hydrolyse microbienne du complexe ligno-cellulosique est un processus lent et difficile, en raison même de la structure chimique et physique de ce type de substrat. La lignine s'associe intimement à l'hémicellulose, laquelle recouvre la cellulose et crée une barrière physique empêchant l'action des enzymes hydrolytiques (Noike et al., 1985; Mshandete et al., 2006). En outre, les structures cristallines de la cellulose sont si étroitement liées entre elles par des liaisons hydrogènes qu'elles rendent la cellulose cristalline encore moins accessible aux enzymes (Eriksson et al., 2002).

La surface spécifique des particules de cellulose est une caractéristique importante qui détermine le niveau d'activité initiale de l'hydrolyse d'un substrat (Eriksson et al., 2002; Hu et al., 2005).

Les particules de taille réduite offre une plus grande surface spécifique favorisant une meilleure absorption du substrat qui se traduit par une meilleure cinétique d'activité microbienne et de production méthanogène, ainsi que le confirment de nombreuses études (Hills et Nakamo, 1984; Sharma et al., 1988; Kivaisi et Eliapenda, 1994; Angelidaki et Ahring, 1994; Palmowski et Müller, 2003; Mshandete et al., 2006).

D'un point de vue technique, les substrats frais comme les feuilles sont facilement dégradables, même sans réduction de la taille de leurs particules. Cependant, un broyage préalable réduit significativement le volume occupé par le substrat dans le digesteur, sans modifier la production de biogaz (Gollakota et Meher, 1988; Moorhead et Nordstedt, 1993; Yadvika et al., 2004).

En outre, des particules de taille trop grande peuvent obstruer les canaux de transmission du digesteur, entravant ainsi le processus de digestion anaérobie (Yadvika et al., 2004).

Agitation

L'agitation du contenu du digesteur anaérobie est généralement utile à favoriser le contact entre le substrat et les micro-organismes et, par ricochet, à renforcer l'activité méthanogène. Il existe divers mécanismes et procédés d'agitation plus ou moins complexes comme l'insertion d'un racloir, d'un piston, etc., à l'intérieur du digesteur ; l'incorporation d'une buse pour évacuer le liquide du digesteur ; la recirculation du biogaz ; la désintégration mécanique ou broyage humide ; etc. (Yadvika et al., 2004).

Ces procédés exigent généralement des moyens technologiques et financiers assez relevés, les rendant difficiles de mise en œuvre dans des contextes socio-économiques difficiles. Les coûts d'installation, d'opération et d'entretien d'un dispositif d'agitation sont généralement onéreux dans un processus de bio méthanisation (Ward et al., 2008), donc pas tout à fait adapté aux contextes à précarité logistique et socioéconomique. Cependant, un certain degré d'agitation est utile au bon fonctionnement d'un digesteur (Müller ; 2007). A défaut d'être en continu, une agitation minimale au moment de l'alimentation journalière du digesteur est généralement suffisante et plus accessible aux PED pour imprimer, en tout en partie, l'effet d'optimisation souhaitée.

Paramètres globaux

Balance nutritionnelle

L'équilibre de la nutrition des micro-organismes doit être maintenu par un taux de charge organique adéquat et une composition équilibrée du substrat. Par exemple, pour une quantité déterminée de substrat, les concentrations respectives de carbone et d'azote déterminent la performance du processus anaérobie comme l'un ou l'autre peut constituer un facteur limitant. Il est généralement rapporté que les micro-organismes utilisent le carbone 25-30 fois plus rapidement que l'azote, au cours de la digestion anaérobie (Yadvika et al., 2004).

En effet, le carbone représente la principale source d'énergie pour les micro-organismes tandis que l'azote participe de la croissance microbienne (Igoni et al., 2008).

Différents ratios C/N, allant de 20-30/1 à 35-40/1 (en supposant que le carbone en question est majoritairement biodégradable), sont proposés dans la littérature pour optimiser les processus anaérobies (Malik et al., 1987; Bardiya et Gaur, 1997; Yadvika et al., 2004; Pesta, 2007).

Les substrats pauvres en azote sont généralement associés en co-digestion à d'autres relativement riches pour atteindre un ratio optimal (**Barnett, 1978; Yadvika et al., 2004**).

D'autres éléments trace non métalliques, comme le soufre, interviennent dans la formation des structures cellulaires. Certains métaux comme le nickel, le cobalt, le molybdène et le tungstène sont essentiels pour la croissance et le métabolisme microbien dans le digesteur (**Pesta, 2007**).

Dans ces conditions, l'apport de co-substrats peut de contribuer à l'équilibre nutritionnel. Cependant, la présence de certains inhibiteurs et composés toxiques tels que l'ammoniac, les sulfures, l'acide propionique, les substances pétrochimiques, les nitrates/nitrites, les cyanures, les dérivés phénoliques et des solvants doivent être gérés avec précaution (**Pesta, 2007**).

Production de méthane

La production de méthane est sans doute le paramètre de suivi le plus important dans le contrôle de la digestion anaérobie, puisque celui-ci intègre l'ensemble des autres paramètres du processus. La production journalière de biogaz est fonction du taux de charge organique, de la stabilité générale de l'activité des micro-organismes à l'intérieur du digesteur, de la température dans le digesteur et des procédés d'optimisation de la digestion (pré-traitement du substrat, agitation du milieu, etc.) (**Bekkering et al., 2010**).

La production de biogaz est mesurable en continu à l'aide d'un compteur à gaz (volumétrique ou manométrique), placé entre le digesteur et le gazomètre (mesure de la production) ou entre le gazomètre et le point d'utilisation (mesure de la consommation). Elle peut aussi être évaluée par le suivi de la variation du niveau du gazomètre, à l'aide d'une règle graduée, par temps de zéro consommation ou généralement par la mesure de la pression à l'intérieur du digesteur. La concentration de méthane dans le biogaz est en fonction de la nature et de la composition du substrat, du pH et de l'équilibre entre les groupes de micro-organismes acidogènes et méthanogènes.

Description du fonctionnement d'une installation de méthanisation agricole

Préparation des intrants

Différents intrants (ou substrats) sont utilisés dans la méthanisation agricole. Ils peuvent être classés en trois catégories : solides (résidus agricoles dont CIVE et résidus de cultures, fumiers, ...), liquides (lisier, déchets agro-alimentaires, lactosérum...) et gras (huiles végétales, graisses de flotation...).

Les substrats sont choisis de manière à garantir une qualité et une production suffisante de biogaz et de digestat. Pour ce faire, certains intrants à fort pouvoir méthanogène présentent un intérêt pour la rentabilité de l'installation (optimisation de la valorisation énergétique). De même, la présence de certains substrats est nécessaire pour faciliter la digestion elle-même (matières fibreuses, graisses...). **(Fernandez, H. L. C. 2021).**

Prétraitement des intrants :

Avant la phase d'introduction dans le digesteur, les substrats, en fonction de leur nature, sont soumis à des étapes de prétraitement avec différents objectifs :

- faciliter l'alimentation du digesteur (viscosité, prémélange solide / liquide) ;
- limiter l'introduction de corps étrangers (concassage, puits à cailloux...) ;
- faciliter la digestion en divisant la structure de la matière (broyage...)
- hygiéniser les sous-produits animaux (SPAN) pour des raisons sanitaires (étape mise en œuvre uniquement pour certains types de déchets).

Une fois prétraitées, ces matières sont envoyées en continu directement en digestion ou vers une étape. Cette dernière permet d'homogénéiser le mélange et de tester différentes recettes avant introduction dans le digesteur. Elle garantit la stabilité du processus de digestion malgré la variabilité des substrats (qualité, quantité) potentiellement utilisés au cours de la vie de l'installation. Elle permet également de tester la compatibilité et la réactivité de nouveaux substrats au mélange, réactivité pouvant conduire par exemple à des phénomènes de moussage. Cette étape limite ainsi l'apparition de tels phénomènes dans le digesteur et permet d'adapter le dosage des différents substrats dans la ration pour garantir l'équilibre nutritionnel. **(Fernandez, H. L. C. 2021).**

Introduction des matières dans le digesteur :

En fonction de la conception et de la technologie choisies, et notamment de la présence ou non de l'étape de mélange, plusieurs configurations d'alimentation du digesteur existent. Une alimentation séparée des matières solides et liquides implique des équipements de type bols d'alimentation et trémies, pour les solides, et pompes pour les liquides. L'alimentation du digesteur après mélange des substrats peut se faire par l'intermédiaire de pompes.

L'alimentation se fait en respectant les rations admissibles par le digesteur **(SELMANE HEMZA, T. S. 2017).**

Digestion

Cette étape correspond à la transformation biologique des matières organiques introduites dans le digesteur et permet la production de biogaz et de digestat. Plusieurs techniques de digestion en voie semi-liquide existent. Elles sont classées en fonction de la température (mésophile, thermophile) et du mode de mélange (mécanique (axial, latéral), recirculation du digestat, réinjection du biogaz) pour assurer l'homogénéité au sein du digesteur. Le mode mésophile (35-42°C) avec une agitation mécanique (mélangeur principal à axe vertical et brasseurs axiaux) est le plus courant en milieu agricole. (Zerrouki, S et al., 2017).

Le biogaz agricole est constitué de méthane (50 - 65 % vol.), de dioxyde de carbone (35 – 45% vol.), de vapeur d'eau (2 - 7 % vol.) et d'éléments en traces tels que l'ammoniac, l'hydrogène sulfuré (jusqu'à 0,8 % vol./ 12 000 mg/m³), les composés organiques volatils... Mellak, A. (2020).

Post digestion

L'étape de post-digestion est une étape essentielle pour stabiliser et améliorer l'innocuité du digestat. Elle permet aussi la production de biogaz supplémentaire obtenu par la digestion de la matière fermentescible résiduelle. La part de biogaz produite au niveau de la post-digestion représente entre 5 à 15 % de la production totale de biogaz. Cette étape est conçue sur le même principe que la digestion : le post-digesteur est maintenu en température. La postdigestion constitue également une première étape de stockage du digestat.

Le digestat conserve les éléments nutritifs des matières premières. Il est notamment constitué d'azote, de phosphore, de potassium, de soufre, de calcium, de magnésium. Il conserve également les éléments traces introduits par les substrats (tous les éléments traces métalliques et certains composés organiques) ou encore certains microorganismes présents initialement ou qui se sont développés au cours du processus. (INERIS, 2018)

Voies d'utilisation des produits de la méthanisation

La méthanisation a pour objectifs le traitement d'effluents et de résidus agricoles et/ou de déchets organiques et une double valorisation énergétique et matière des produits qui en sont issus : le biogaz d'une part et le digestat d'autre part.

Digestat :

Description du digestat :

La matière résiduelle résultante du procédé de méthanisation, qui peut représenter de 70 à 80% de la masse initiale, est appelée digestat. La valorisation de ce digestat est essentielle pour rentabiliser la filière de la méthanisation afin de ne pas créer un nouveau type de déchet.

D'ailleurs, celui-ci s'y prête bien, puisqu'il conserve les éléments majeurs fertilisants présents initialement dans les intrants organiques, en plus de hausser la disponibilité de certains. Par exemple, la hausse de pH qui survient pendant la digestion anaérobie favorise la conversion de l'azote organique des intrants en azote ammoniacal (N-NH₄), directement assimilable par les cultures. (Martel et al., 2013)

Valeur agronomique du digestat

La composition du digestat dépend évidemment de la matière première utilisée et de la gestion du processus de biométhanisation.

Une fois digéré, le digestat contient moins de matière sèche (MS) qu'initialement.

Approximativement 50% de la matière sèche est convertie en méthane (CH₄) et en dioxyde de carbone (CO₂) provoquant ainsi une diminution de la quantité de carbone. Cependant, la teneur en azote du digestat est augmentée de ~20% par rapport au lisier de bovins ordinaire mais reste identique pour le lisier de porc. En effet, dans la matière organique la plupart de l'azote est liée aux protéines, c'est pourquoi il n'est pas directement assimilable par les plantes. Pendant le processus de biométhanisation, une partie cet azote organique lié est réduit par désamination en ammonium dissout. Par conséquent, la teneur en azote total est renforcée de 0.2% à 27% dans le digestat par rapport aux effluents bruts. Cette augmentation est liée au temps de séjour des matières dans le digesteur et de la diminution de matière sèche. Par conséquent l'azote est mieux absorbé (et plus rapidement) par les plantes.

Néanmoins, de part la faible présence de phosphore (P) dans le digestat, il est conseillé de compléter l'épandage du digestat par une fumure phosphatée pour éviter tout déficit en cet élément dans le sol. (Mignon, 2009)

Les avantages de l'utilisation du digestat :

Augment le potentiel de fertilisation :

Pendant la biométhanisation, l'azote contenu dans le substrat subi une minéralisation. Une+) se transforme en ammoniac (NH₃). Aussi, l'ammoniac est plus partie de l'ammonium

(NH₄Volatil que l'ammonium. C'est pourquoi l'application de quelques conseils lors du stockage du digestat est important (par exemple couvrir la cuve).

D'après une étude (**Sorensen, 2008**), l'azote du digestat est beaucoup mieux utilisé par les plantes que celui contenu dans le lisier brut. De plus, la disponibilité de l'azote (en % de l'azote total) est plus élevée dans le cas du digestat que celle du lisier non digéré.

Lorsque le digestat est épandu sur les plantes en croissance, il s'écoule plus vite de la plante et s'infiltre plus rapidement dans le sol que les effluents bruts. Cela signifie pour l'agriculteur que les risques de pertes d'ammoniac après application sur une terre arable sont moins importants et donc les nuisances olfactives aussi.

Les conclusions de cette étude danoise sont les suivantes :

- -moins d'azote organique et donc moins de risque de lessivage à long terme.
- -meilleure utilisation de l'azote la première année mais moins d'effet résiduel par la suite.
- -meilleure disponibilité de l'azote pour les plantes et moins de matière organique pour le sol.
- -amélioration de l'infiltration
- -réduction des gaz à effet de serre (CH₄, N₂O, CO₂)
- -Réduction de l'application d'engrais

Grâce à la meilleure valeur fertilisante du digestat, l'azote minéral (ou engrais azoté) est moins utilisé. Par conséquent, une économie financière est réalisée. Cependant, il faut noter que les engins agricoles qui épandent du digestat liquide (contenant beaucoup d'eau) consomment plus de fuel. (**J. Mata Alvarez, 2010**).

Stockage et valorisation du digestat

En installation agricole, le digestat est majoritairement valorisé par épandage du digestat brut ou des différentes phases obtenues après séparation de phases. Il s'avère donc nécessaire de stocker le digestat brut ou les différentes phases plusieurs mois sur le site. La séparation de phases du digestat brut permet de produire deux types de digestat : liquide et solide. Ces deux phases peuvent être directement épandues à des périodes différentes sur les terres cultivées ou les cultures, ou subir des traitements complémentaires en fonction des secteurs géographiques et des excédents potentiels en azote des sols. Le digestat solide peut dans ce cas subir un traitement complémentaire par séchage (diminution du volume et des coûts de transport) ou

par compostage. Le digestat liquide peut également subir un traitement poussé (filtration membranaire, osmose inverse, évapoconcentration, traitement biologique...). Ce traitement est généralement coûteux donc applicable uniquement sur des installations de capacité relativement importante. (INERIS, 2018)

Le Biogaz

La valorisation du biogaz procure une image positive aux installations de stockage de déchets, qui deviennent ainsi des sites de valorisation énergétique d'une énergie renouvelable. Différents types de valorisation sont possibles : la production de chaleur, la production d'électricité, la purification du gaz en vue de son utilisation comme carburant pour les véhicules automobiles, la purification du gaz en vue de l'injection dans le réseau de transport ou de distribution de gaz naturel, la production combinée de chaleur et d'électricité par cogénération. (ADEME, 1999 ; Bereza et al., 1999 ; Mortgat, 1998)

Le prétraitement du biogaz brut (via des procédés physiques ou chimiques) permet de diminuer en grande partie sa teneur en vapeur d'eau (par condensation), en H₂S (injection d'un filet d'air ou ajouts FeCl₃,...) et en éléments polluants en trace (H₂S résiduel, COV, NH₃) par adsorption sur filtre à charbon afin :

- de limiter la corrosion chimique (eau + H₂S = H₂SO₄) ;
- d'augmenter le pouvoir calorifique du biogaz traité avant valorisation ;
- d'optimiser le rendement énergétique de la valorisation.

La production de chaleur

La combustion est un moyen de valorisation le mieux adapté au biogaz. Le procédé est simple et n'exige pas un grand investissement. La composition du biogaz importe peu, à condition qu'il comporte au moins 20% de méthane. Ce type d'application s'accommode bien de gaz à haute teneur en H₂S, à condition que les matériaux constituant les équipements soient suffisamment résistants. **Phan, T. S. (2020).**

La production d'électricité

Cette voie nécessite des investissements plus lourds, mais les groupes électrogènes peuvent aussi fournir de la chaleur (cogénération) ce qui permet d'améliorer nettement la rentabilité de l'opération. L'efficacité maximale en électricité des groupes électrogènes fonctionnant au biogaz atteint actuellement 40%. L'électricité ainsi produite peut être revendue. La composition du biogaz nécessite au moins 40% de méthane. Le traitement du biogaz à

envisager dépend de la solution retenue (« moteurs à biogaz », « turbine à vapeur », ...). En général il est suffisant de le désulfurer et de déshydrater. **Couturier, C. (2009).**

La production de biogaz carburant

Les investissements à réaliser sont onéreux liés à la nécessité d'une purification plus poussée, mais peuvent être rapidement (~10 ans) amortis pour les grandes agglomérations.

Composition du biogaz nécessite au moins 50% de méthane. Il est nécessaire de le débarrasser, en particulier, de l'eau, du H₂S et du gaz carbonique. **ADEME et al., (2008).**

L'injection dans le réseau de gaz naturel

Le biogaz peut être injecté dans le réseau de gaz naturel à condition qu'il réponde aux spécifications de qualité du gaz distribué. Il doit donc être épuré de l'eau, de l'hydrogène sulfuré, des composés organo-halogénés tels que dérivés chlorés et fluorés, qui peuvent se transformer en acides très corrosifs et avoir un impact sanitaire négatif lors de la combustion **Leroux et al. ,(2010).**

A blue horizontal scroll graphic with rounded corners and a vertical strip on the left side. The text is written in white serif font.

Deuxième partie

Partie expérimentale

Chapitre

3

Matériel et méthode

III.1 Objectif de l'étude

L'objectif de cette étude est d'évaluer le potentiel de l'utilisation du fumier bovin pour la production de biogaz. Par ailleurs elle vise à caractériser la valorisation du fumier bovin, à déterminer les conditions optimales de fermentation anaérobie pour maximiser la production de biogaz et à évaluer les rendements énergétiques obtenus. Elle cherchera également à analyser les avantages environnementaux de cette approche, tels que la réduction des émissions de gaz à effet de serre et la gestion durable des déchets organiques. Les résultats de cette étude contribueront à éclairer les décisions en matière de développement et d'adoption de systèmes de production de biogaz à partir du fumier bovin en particulier et autres matières organiques, en mettant en évidence les aspects technologiques, économiques et environnementaux pertinents.

III.2 Situation géographique de la région d'étude

La présente recherche est réalisée dans la wilaya de Tizi-Ouzou, qui est située au nord de l'Algérie : délimitée au nord par la mer méditerranée, au sud par la wilaya de Bouira, à l'est par la wilaya de Bejaïa et à l'ouest par la wilaya de Boumerdes. Le site de l'expérimentation se situe au niveau de la commune d'Ain-El Hammam (Wilaya de Tizi-Ouzou), qui est Situé à 45 km au sud-est du chef-lieu de la wilaya. Ain-el hammam est caractérisé par un relief diversifié : des terrains plats au pieds des montagnes imposantes (Figure 11).



Figure11 : Situation géographique de la région d'étude

III.3 Présentation de la parcelle d'étude

La collecte du fumier et la mise en place du méthaniseur domestique se sont déroulés dans un élevage bovin privé dans la région d'Ain-el hammam, qui est délimité au nord par un champ d'olivier, au sud par un chemin privé, à l'est par un ruisseau et à l'ouest par une piste agricole.

III.3.1 Facteurs climatiques de la région d'étude

Le climat est considéré comme l'un des principaux facteurs ayant un impact majeur sur le développement et la répartition des espèces animales et végétales. Il joue aussi un rôle prépondérant dans l'évolution géomorphologique et pédologique (**Dajoz, 2006**). Les principales variables bioclimatiques étudiées sont l'ensoleillement et la température. Ces dernières sont utilisées par la majorité des auteurs pour la détermination du type de climat. D'autres facteurs climatiques comme l'humidité et la pluviométrie y sont présentées.

Les données climatiques recueillies sur 9 ans (2012-2020) sont à l'origine des enregistrements de la station météorologique de Boukhalfa relevant de l'Office Nationale de Météorologie (ONM Tizi-Ouzou).

III.3.1.1 Température

Selon **Ramade (1993)**, la température est le facteur climatique le plus important pour la croissance des plantes et le déroulement de tous les processus physiologiques, elle influe sur la répartition géographique des espèces et contrôle l'ensemble des réactions métaboliques.

En effet chaque espèce (animale ou végétale) ne peut vivre que dans un certain intervalle de la température qui lui est favorable (**Dajoz, 2006**).

Les températures mensuelles moyennes, ainsi que les températures minimales et Maximales de la wilaya de Tizi-Ouzou sont présentées dans la figure ci-dessous.

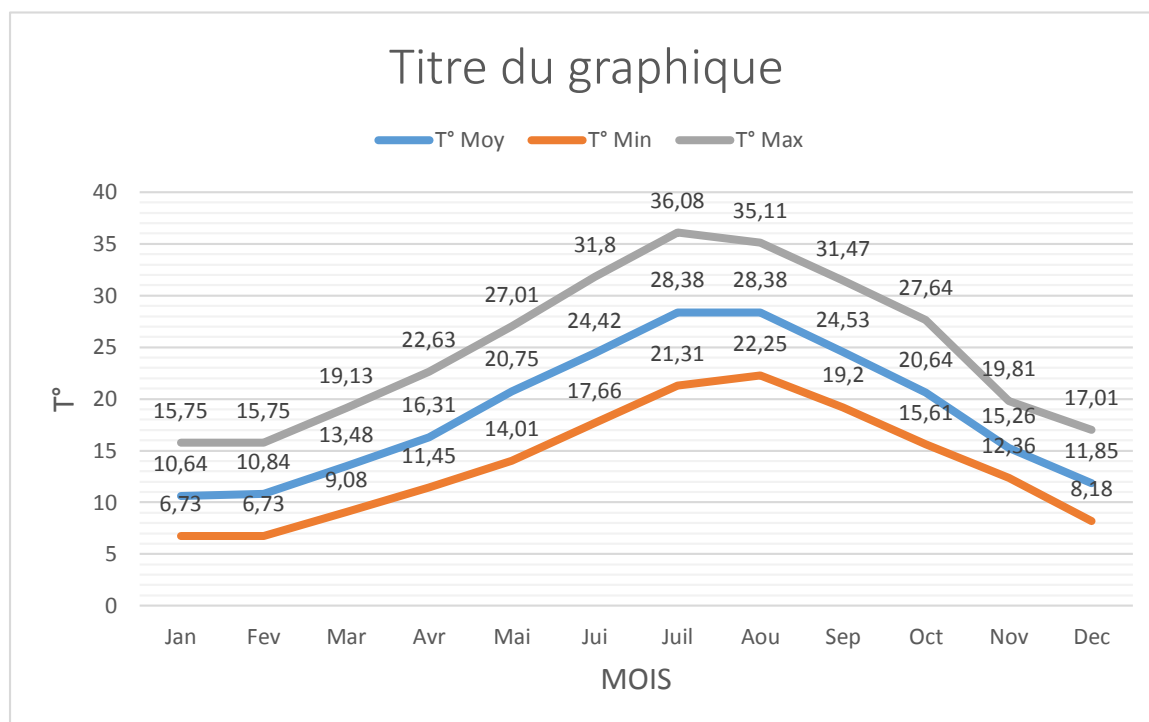


Figure 12 : Variation des températures moyennes, minimale et maximales de la région de Tizi-Ouzou sur une période de 9ans (2012-2020).

Les valeurs des températures, montrent clairement que le mois le plus chaud est le mois de Juillet avec une valeur de 36,1°C. Par contre, les mois les plus froids sont les mois de janvier et février avec une basse température qui est de 6,73°C.

III.3.1.2 Pluviométrie

La pluviométrie constitue un facteur écologique d'importance fondamentale, l'activité trophique et reproductrice des êtres vivants sont influencées par ce facteur (**Dajoz, 2006**).

D'après **Emberger (1952)**, dans les pays méditerranéens, les pluies interviennent principalement en automne, en hiver et au printemps, l'été est généralement sec. Les périodes de sécheresse prolongées ont un effet néfaste sur la faune et la flore.

Les valeurs des précipitations moyennes mensuelles enregistrées dans la région de Tizi- Ouzou sont illustrées dans la figure suivante.

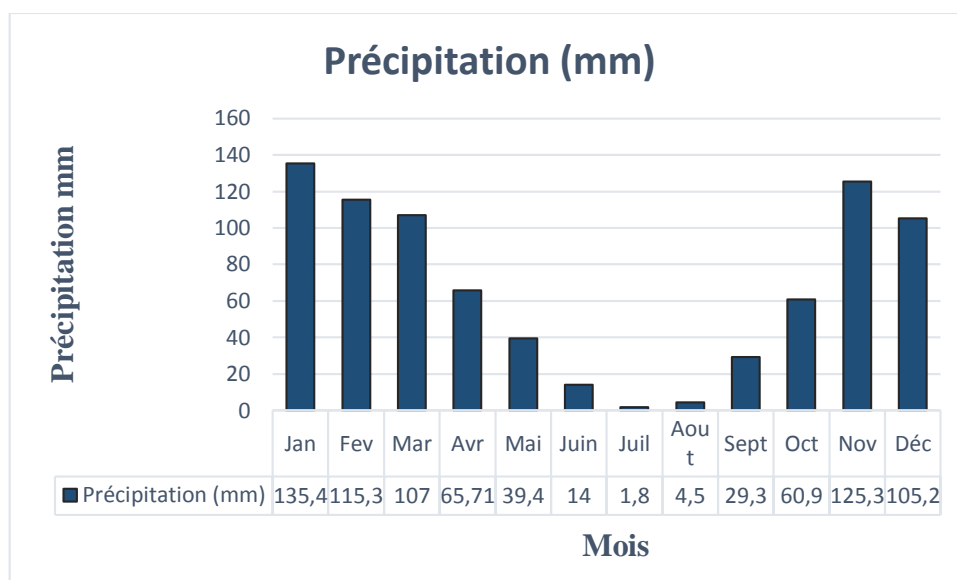


Figure 13 : Précipitations moyennes mensuelles de la région de Tizi-Ouzou sur une période de 9 ans (2012-2020).

Selon les valeurs, nous avons remarqué que la période la plus pluvieuse a été enregistrée durant le mois de Janvier avec une valeur de 135.4 mm Tandis que le taux de précipitation le moins élevé a été enregistrés au mois de juillet avec une valeur de 1.8 mm

III.3.1.3 Humidité

La disponibilité de l'eau dans le milieu et l'hygrométrie atmosphérique jouent un rôle essentiel dans l'écologie des organismes.

Selon **Dajoz (2006)**, l'humidité relative de l'air influe sur la densité des populations en provoquant la diminution du nombre d'individus lorsque les conditions hygrométriques deviennent défavorables.

L'humidité relative moyenne et mensuelle de l'air de la région de Tizi-Ouzou est représentée dans la figure suivante.

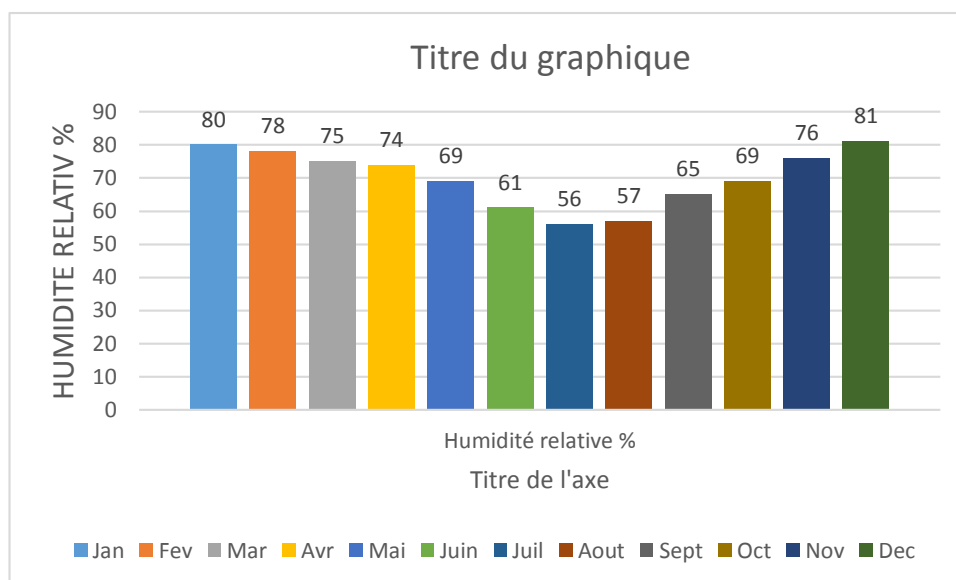


Figure 14 : Humidité relative (en%) de la région de Tizi-Ouzou sur une période de 9 ans (2012-2020).

La figure montre que la valeur la plus élevée d'humidité relative est enregistrée en Décembre avec 81%, contrairement aux mois de Juillet et Août considérés comme les moins humides (56% et 57%).

III.3.1.4 Lumière

Selon **Sacchi et Testard (1971)**, la plupart des rythmes biologiques exogènes des organismes vivant sont directement liés à l'alternance des périodes et durée relative de la lumière.

Les taux d'ensoleillement de la région de Tizi-Ouzou sont représentés dans la figure suivante

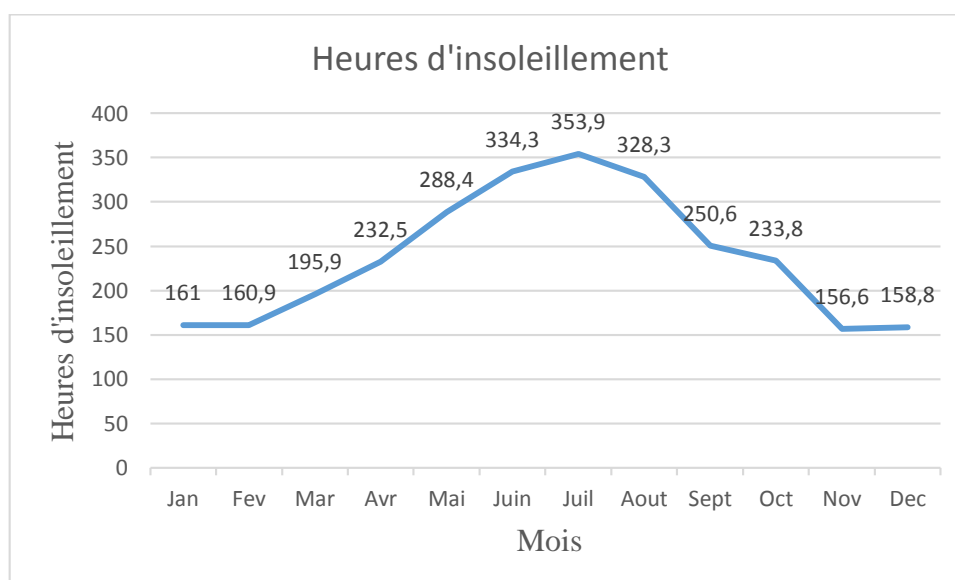


Figure 15: Nombre d'heures d'insolation dans la région de Tizi-Ouzou sur une période de 9ans (2012-2020).

Nous constatons que le mois le plus ensoleillé est le mois de Juillet avec 353,9 heures d'ensoleillement. Le mois le moins ensoleillé est le mois de Novembre avec 156,6 heures d'ensoleillement.

III.3.2 Synthèse climatique de la région d'étude

La synthèse climatique d'une région donnée peut se faire par l'analyse du diagramme Ombrothermique de **Bagnouls et Gausson (1953)** et par le climagramme **d'Emberger (1952)**.

Le climat méditerranéen est un climat de transition entre la zone tempérée et la zone tropicale, il est caractérisé par une saison sèche correspondant à l'été et une saison humide froide qui correspond à l'hiver (**Estienne et Godard, 1970**).

III.3.2.1 Diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gausson

Selon **Bagnouls et Gausson (1953)**, les mois secs sont tous les mois de l'année où les précipitations sont inférieures ou égales au double de la température (PT

Le diagramme de la région de Tizi-Ouzou est illustré dans la figure suivante.

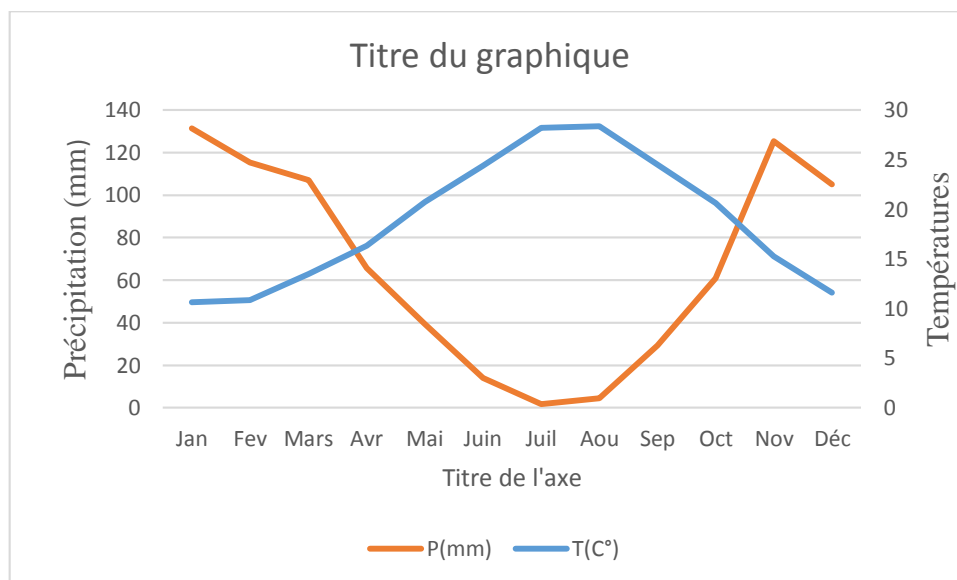


Figure16: Diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gausson de la région de Tizi- Ouzou sur une période de 9 ans (2012-2020).

D'après **Bagnouls et Gausson** la période qui s'étend entre le croisement des deux courbes correspond à la durée de la période sèche. De ce fait, la période sèche caractéristique de la région d'étude s'étend sur 7 mois (du mois d'Avril jusqu'au mois d'Octobre). La période humide s'étend sur 5 mois (du mois de Novembre jusqu'au mois de Mars).

III.4.1 Matériels :

- Echantillon de fumier bovin frais (figure 17)

Nous nous sommes procurés du fumier de bovin frais au niveau d'une ferme située à Ifarhounen ;

- Bidon en plastique de 10 litres ;
- Robinet d'eau rationalisé (3/4").
- Clé crocodile ;
- Couteau en inox ;
- Cutteur ;
- Marqueur de peinture permanent ;
- Une bouteille d'eau 5L vide ;
- Entonnoir;
- Briquet à gaz ;
- Table pliante blanche ;
- Réchaud à gaz pour tester notre système ainsi réalisé.

III.4.2 Méthodes

La méthodologie adoptée pour atteindre nos objectifs est la suivante :

- ❖ Une recherche documentaire d'une durée de deux mois. Elle nous a permis de faire une synthèse de quelques études se rapportant à la méthanisation des déchets en général et à la valorisation du fumier bovin en particulier.
- ❖ Les travaux de terrains se sont déroulés pendant deux mois du 1er Mai au 1 juillet 2023. Ils se sont effectués en quatre étapes :
 - L'identification du site puis la collecte et traitement du substrat ;
 - Assemblage et mise en place des composants du dispositif expérimental ;
 - Fermentation du mélange réalisée ;
 - L'obtention du biogaz.

III.5 Essaie

Après la collecte du fumier frais (**Figure 17**) nous sommes directement passés à l'étape de préparation du substrat en mélangeant les 5kg du fumier avec de l'eau dans le but d'obtenir un mélange plus au moins homogène (**Figure 18**)



Figure 17 : fumier frais



Figure 18 : Mélange homogène du Fumier avec de l'eau

En parallèle nous avons procédé à l'assemblage des différents composants du méthaniseur domestique à savoir placer le robinet cité ultérieurement, sur le bouchant du bidon (**figures 19 ; 20 et 21**).



Figure 19 : Robinet rationnalisé (3/4")



Figure 20 : Bidon en plastique



Figure 21 : robinet d'eau sur le bouchant du bidon

Puis à l'aide des deux parties de la bouteille déjà citée on a rempli le bidon jusqu'à 5 L c'est-à-dire la moitié puis nous avons refermé le bidon et laissé s'effectuer la fermentation comme l'illustrent les **figures 22 ; 23 et 24**.



Figure 22 : remplissage du bidon jusqu'à 5 L



Figure 23 : refermé le bidon



Figure 24 : laissé s'effectuer la fermentation

Résultats et discussion

La production de biogaz dépend de la nature et de la composition du substrat utilisé (tels que la matière végétale, les déjections animales, les excréments humains, etc.), du type de digesteur utilisé et des conditions de fermentation (notamment l'absence d'oxygène, la température, le pH, l'agitation et le temps de rétention).

Pendant le processus de digestion, le biogaz a commencé à se former après environ 5 jours de bioconversion.

La quantité de biogaz produite augmente progressivement à mesure que le substrat organique reste dans le digesteur.

Le méthane brûle avec une flamme bleue lorsque sa combustion est complète. Celle-ci s'accompagne d'un fort dégagement de chaleur.

- Dans ces conditions, 1 m^3 de méthane peut atteindre en brûlant une température de $1400 \text{ }^\circ\text{C}$ et dégage une quantité de chaleur de 8 500 à 9 500 kcal.



Figure 25 : Test du biogaz produit avec l'allumage d'un trépied gaz.

- La comparaison du pouvoir calorifique du biogaz avec celui des combustibles usuels permet d'énoncer les équivalents approximatifs suivants :

- 1 m^3 de biogaz équivaut, du point de vue énergétique, à 1,25 kilowattheure; Sa combustion produit une quantité d'énergie équivalente à celle de 0,7 litre de pétrole ou 0,6 litre de gasoil.



Conclusion générale

Conclusion

Conclusion

La maîtrise de la température, du pH et de la biomasse microbienne joue un rôle crucial dans la production de biogaz. Selon notre étude, il est possible d'utiliser les effluents d'élevage pour répondre à une partie de nos besoins énergétiques dans les prochaines décennies. La méthanisation est une technologie clé de l'économie circulaire et de la croissance verte, offrant diverses solutions environnementales telles que le traitement des déchets, la réhabilitation des sites pollués et la réduction des émissions de gaz à effet de serre (CH₄, CO₂). De plus, elle permet la production d'un fertilisant naturel peu énergivore et plus facilement absorbé par les plantes. En Algérie, l'utilisation de ces fertilisants à base de déchets peut améliorer les rendements agricoles et les revenus des agriculteurs.

Cependant, le développement de projets de méthanisation pour les exploitants agricoles en Algérie est actuellement difficile. Outre la nécessité de renforcer la formation et la recherche, le secteur a besoin d'un soutien réglementaire et financier de la part des autorités publiques. Des mesures incitatives, telles que des garanties d'investissement à long terme et la mise en place de tarifs d'achat garantis pour l'électricité produite à partir du biogaz, similaires à ceux prévus pour l'énergie solaire et éolienne, sont essentielles.

Notre étude vise à promouvoir les filières de bioénergie en Algérie, car elles offrent de nombreux avantages et sont indispensables pour la transition énergétique. L'autonomie énergétique basée sur le concept de ferme durable est très en vogue, car elle contribue à la sécurité alimentaire. Il est primordial de soutenir ces sources d'énergie renouvelable pour assurer un avenir énergétique durable et assurer l'énergie aux populations vivant dans les zones enclavées notamment les régions montagneuses.



Références bibliographique

ADEME, Base de données SINOE, consulté en Mai 2023, accessible sur <http://www.sinoe.org>

ADEME, É., AFGNV, A., SUEZ, G., & IFP, M. (2008). État des lieux et potentiel du biométhane carburant. Synthèse 8pp.

ADEME, Le biogaz et sa valorisation. Guide méthodologique, ADEME-GDF, Paris, 1999, p 63.

Agence Nationale des Déchets. Caractérisation des déchets ménagers et assimilés dans les zones nord, semi-aride et aride d'Algérie 2014, consulté en Mai 2023, accessible sur <https://and.dz/site/wp-content/uploads/2016/04/etude-caracterisation-2014-1.pdf>

Angelidaki I., Ahring B. K. Anaerobic digestion of manure at different ammonia loads: effect of temperature. *Water Res.*, 1994, vol. 28, 727-731.

Anonyme 1 : Document Geacute; Neacute; Ral. Les énergies du Futur, Technologie et Politique du XXI^{ème} siècle', NATO Parliamentary Assembly, Report AT-271-STC-9.

Anonyme 2. BIOGAZ, T. À. S. I. A. Le biogaz en France.

Bagnouls, F. et Gaussen, H. (1953). « Saison sèche et indice xérothermique ». Bulletin société histoire naturelle, Toulouse, 193-239p.

Bardiya, N., Gaur A.C. Effects of carbon and nitrogen ratio on rice straw biomethanation. *Rural Energy*, 1997, vol. 4, n° 1-4, pp. 1-16.

Barker, H.A. Amino acid degradation by anaerobic bacteria. *Annual Review of Biochemistry*, 1981, vol. 50, 23-40.

Barnett, A. Biogas technology in the third world: a multidisciplinary Review. IDRC. Ottawa, Canada, 1978, P. 51

Barrington, S., Massé, D., Laguë, C., Fortier, M., & Côté, D. (1997). Les fumiers de bovins laitiers: une ressource qui se gère. In Proceedings of the conferences presented at the 21^e Symposium sur les bovins laitiers (pp. 93-128).

Batstone, D.J., Keller, J., Angelidaki, I., Kaluzhnyi, S.V., Pavlostatis, S.G., Rozzi, A., Sanders, W.T.M., Siegrist, H., Vavilin, V. Anaerobic Digestion Model No.1, Scientific and Technical Report No.13, IWA Publishing, 2002, P. 77

Bekkering, J., BROEKHUIS A.A., VAN GEMERT W.J.T. Optimisation of a green gas supply chain – A review, *Bioresource Technology*, 2010, vol. 101, 450-456.

Bereza, M., Le Corre, O., Tazerout, M. Valorisation du biogaz par moteur à allumage commandé. Une approche méthodologique du dimensionnement, *Déchets, Sciences et Techniques*, 1999, n° 13, 24-28.

Brakel, J. V. Biogas before 1970: a review. *Tropical Science*, 1980, vol. 22, n° 2, 105-148.

- Brochier, J. L. (1994).** Etude de la sédimentation anthropique. La stratégie des ethno-facies sédimentaires en milieu de constructions en terre. Bulletin de correspondance hellénique, 118(2), 619-645.
- Brown, C. L. (2008).** Concentration et valeur des éléments nutritifs assimilables contenus dans le fumier de différents types d'élevages. Ontario Ministère de l'agriculture, de l'alimentation et des affaires rurales.
- Bugat A., (2016).** Le biogaz. Rapport de l'académie des technologies. EDP. Sciences. France.
- Camara, O. S. (1996).** Utilisation des résidus de récolte et du fumier dans le Cercle de Koutalia: Bilan des éléments nutritifs et analyse économique (No. 18). AB-DLO [etc.].
- Chamaa, M. A. (2017).** Couplage de la Méthanisation et des Électrotechnologies: Intentification de la Production de Biogaz et du Séchage du Digestat (Doctoral dissertation, Université de Bretagne Sud).
- Chandler, J.A., Jewell, W.J., Gossett, J.M., Van Soest, P.J. and Robertson, J.B.** Predicting methane fermentation biodegradability. Biotechnology and Bioengineering Symposium Series, 1980, vol. 10, 93-107.
- Christophe, J. D. (2004).** La bouse: historique, importance et écosystème (Doctoral dissertation).
- Chynoweth, D.P., Wilkie, A.C., Owens, J.M.** Anaerobic processing of piggery wastes: a review. ASAE Annual International meeting, Orlando, Florida 1998.
- Couturier, C. (2009).** Techniques of power production from biogas and syngas. Extended abstract; Techniques de production d'électricité à partir de biogaz et de gaz de synthèse. Rapport final+ synthèse.
- DAJOZ R, 2006 :** Précis d'écologie. Ed., Dunod, Paris, 630p.
- Dajoz, R. (2006).** Précis d'écologie. 7ème Edition, Dunod, Paris, 630p
- Degoulet, J.** Le procédé discontinu CIEH: Fiche technique.
- Deublein, D., Steinhauser, A.** Biogas from Waste and Renewable Resources, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008.
- Drake, H.L.** Acetogenesis. Kluwer Academic Pub, 1994.
- Eckenfelder, J.W.** Industrial Water-Pollution Control. Boston Burr Ridge: McGraw-Hill Higher Education, 2000, pp. 394-411.
- Emberger, L. (1952).** « Une classification biogéographique des climats >>. Université de Montpellier. Série botanique. Fac 7.
- Emberger, L. 1952.** Sur le quotient pluviothermique. C.R. Ac. Sc. 23: 2308-2310.

- Eriksson, T., Borjesson, J., Tjerneld, F.** Mechanism of surfactant effect in enzymatic hydrolysis of lignocellulose. *Enzyme and Microbiology Technology*, 2002, vol. 31, pp. 353-364.
- EurObserv'ER, (2017)** Production primaire de biogaz de l'Union européenne en 2015 et en 2016 (en ktep)
- EurObserv'ER, "Baromètre biogaz 2017"**, consulté le Mai 2023, accessible sur <https://www.eurobserv-er.org/barometre-biogaz-2017>
- FAO.** Biogas processes for sustainable development. MARCHAIM U, 1992.
- Fernandez, H. L. C. (2021).** Prétraitement des déchets agricoles pour l'optimisation de leur valorisation par méthanisation (Doctoral dissertation, Université de Lyon).
- Ferry, J.** Methanogenesis Chapman & Hall, New York, 1993.
- Galibardy, C., et Cloustale, E. (2009).** Etude de caractérisation des fumiers de cheval issus de centres équestres afin d'aider à la décision sur les possibilités de valorisation. Consulté sur: <https://docplayer.fr/20760904-Etude-de-caracterisation-des-fumiers-decheval-issus-de-centres-equestres-afin-d-aider-a-la-decision-sur-les-possibilites-de-valorisation>.
- Ganesh Kumar, A., Kamatchi, P., Umashankari, J., Vidhya, S., Sriyutha Murthy, P., Sekaran, G.** Acidogenic fermentation of proteinaceous solid waste and characterization of different bioconversion stages and extracellular products. *Biodegradation*, 2008, vol. 19, n° 4, 535-543.
- Ganry et Sarr, (1983)** Valorisation du recyclage organique dans un objectif d'économie des engrais et de maintien de la fertilité des sols au Sénégal. Acquis et perspectives. ISRA-CNRA de Bambey. Doc mult.
- Ganry, F. (2012).** La valorisation des fumiers en zone semi-aride: Session 5. Mise en œuvre de la filière. CIRAD.
- Ganry, F., et Badiane, A. (1998).** La valorisation agricole des fumiers et des composts en Afrique soudano-sahélienne. Diagnostic et perspectives.
- Garba, B.** Effect of temperature and retention period on biogas production from lignocellulosic material. *Renewable Energy*, 1996, vol. 9, n° 1-4, 934-641.
- GCL Développement Durable, 2010.** Etat, perspectives et enjeux du marché des engrais. Edited by J. MataAlvarez. ISBN: 1 900222 14 0.
- Girardin, J. (1864).** Des fumiers et autres engrais animaux. Garnier frères.
- Gollakota, K. G., Meher, K. K.** Effect of particle size, temperature, loading rate and stirring on biogas production from castor cake. *Biological Wastes*, 1988, vol. 24, 243-249.

Gueye F., Ganry F., Truong B., (1986). Elaboration d'un compost enrichi en phosphore par le phosphate naturel. Etude agronomique, In Actes séminaire Crdi-Fis. Orstom, Paris, France, p. 145- 153.

Gujer, W., Zehnder, A.J.B. Conversion processes in anaerobic digestion. *Water Science and Technology*, 1983, vol. 15 n° 8-9, 127-167.

Hattori, S. Syntrophic acetate-oxidizing microbes in methanogenic environments. *Microbes and Environments*, 2008, vol. 23, 118-127.

Héduit, M. La filière biogaz dans les pays en développement. Québec: IEPF & ACCT, 1993, P. 82

Hendrick, A.T.W.M., Zeeman, G. Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, 2009, vol. 100, n° 1, 10-18.

Hills, D.J., NAKAMO, K. Effects of particle size on anaerobic digestion of tomato solid wastes. *Agric Wastes*, 1984, vol. 10, 285-295.

Hu, Z.H., Yu, H.Q., Zhu R.F. Influence of particle size and pH on anaerobic degradation of cellulose by ruminal microbes. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2005, vol. 55, 233-238.

Igoni, A.H., Ayotamuno, M.J., Eze, C.L., Ogaji, S.O.T., Probert, S.D. Designs of anaerobic digesters for producing biogas from municipal solid-waste. *Applied Energy*, 2008, vol. 85, 430-438.

Igoud, S. (2002). Le biogaz: une solution énergétique viable. *Bulletin des énergies renouvelables*. Site web: www.cder.edu.dz.

Igoud, S., Tou, I., Kehal, S., Mansouri, N., & Touzi, A. (2002). Première approche de la caractérisation du biogaz produit à partir des déjections bovines. *Revue des Energies Renouvelables*, 5, 123-128.

INERIS. Vers une méthanisation sure, propre et durable. Recueil de bonnes pratiques en méthanisation agricole. Première édition, Février 2018. Ineris, 17-163622-11458A.

ISAT-GTZ. Biogas Digest _ Volume 1 _ Biogas Basics. Information and Advisory Service on Appropriate Technology (ISAT) & , Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), vol. 46, 1998.

Kivaisi, A., K., Eliapenda S. Pretreatment of bagasse and coconut fibres for enhanced anaerobic degradation by rumen microorganisms. *Renewable Energy*, 1994, vol. 5, 791-795.

Lemoine F. (1998). La bouse de vache : folklore et traditions, thèse vétérinaire, ENVT.

Leroux, C., Modelon, H., Rousselle, C., Zdanevitch, I., & Evanno, S. (2010). Health risk assessment based on injection of upgraded biogas in natural gas grid; Evaluation des risques sanitaires et accidentels liés à l'injection de biogaz épuré dans un réseau de gaz naturel. *TSM. Techniques Sciences Methodes, Genie Urbain Genie Rural*.

- Lhoste, P., Dollé, V., Rousseau, J., & Soltner, D. (1993).** Manuel de zootechnie des régions chaudes: les systèmes d'élevage. Ministère de la Coopération.
- Madigan, M., Martinko, J., Parker, J.** Brock Biology of Microorganisms, 9th edition. Prentice Hall, NJ, 2000.
- Malik, R.K., Singh, R., Tauro, P.** Effect of inorganic supplementation on biogas production. Biol. Wastes, 1987, vol. 21, n° 2, 139-142.
- MAPAQ, 1997; CRAAQ, 2003 et 2007 in SIBOUKEUR ,2013**Appréciation de la valeur fertilisante de différents types de fumier
- Martel, S., Desmeules, X., Landry, C., Lavallée, S., Paré, M., Tremblay, F.** Valeur fertilisante des digestats de méthanisation. Agrinova Recherche et Innovation en Agriculture, Quebec, Canada, Mars 2013.
- Mata-Alvarez, J.** Fundamentals of the anaerobic digestion proches. In: Mata-Alvarez J. Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes. Padstow, Cornwall, UK, 2002, pp. 1-20.
- Mbaye D. F.,(1994).** Etude du pathosystème Pennisetum - G la uc u m - Sclerospora. Thèse de doctorat, Ensam, Montpellier, France, 114 p.
- Mellak, A. (2020).** Production du biogaz à partir des déchets issus d'une ferme d'élevages (Doctoral dissertation).
- Mignon, C.** Utilisation du digestat comme fertilisant en agriculture. Valbiom, Valorisation de la biomasse asbl, Gembloux, Belgique, Août 2009.
- Moletta R. (2008).** La méthanisation, Tec & Doc, Lavoisier, 532p.
- Moletta R. (2008).** La méthanisation, Tec & Doc, Lavoisier.
- Moletta, R. (2015).** La méthanisation. Tec et Doc
- Moorhead, K. K., Nordstedt, R. A.** Batch anaerobic digestion of water hyacinth: effects of particle size, plant nitrogen content and inoculum volume. Bioresource Technology, 1993, vol. 44, n° 1, pp. 71-76.
- Mortgat, B.** Le biogaz une source d'énergie qui fermente, Environnement & Technique/Info-déchets, 1998, n° 181, 17-26.
- Mshandete, A., Björnsson, L., Kivaisi, A. K., Rubindamayugi, M.S.T., Mattiasson, B.** Effect of particle size on biogas yield from sisal fibre waste. Renewable Energy, 2006, vol. 31, 2385-2392.
- Müller, C.** Anaerobic Digestion of Biodegradable Solid Waste in Low- and Middle-Income, Countries _ Overview over existing technologies and relevant case studies. Dübendorf: EAWAG & SANDEC, 2007, P. 63

- Noike, T., Endo, G., Chang, J. E., Yagushi, J.I., Matsumoto, J. I.** Characteristics of carbohydrate degradation and rate limiting step in anaerobic digestion. *Biotechnol Bioeng*, 1985, vol. 27, 1482-1489.
- Orofino, G. G. (2015).** Le potentiel de production de biogaz et de méthane des substrats fermentescibles d'origine agricole en France. Inventaire du potentiel méthanogène des différents substrats fermentescibles (matières organiques), à partir de la bibliographie internationale. P. 66
- Palmowski, L.M., Müller, J.A.** Anaerobic degradation of organic materials-significance of the substrate surface area. *Water Science and Technology*, 2003, vol. 47, 231-238.
- Parkin, G.F, Owen, W.F.** Fundamentals of Anaerobic Digestion of Wastewater Sludges. *Journal of Environmental Engineering*, 1986, vol. 12, n° 5, 867-912.
- Pavlostathis, S.G., Giraldogomez, E.** Kinetics of anaerobic treatment. *Water Sci Technol*, 1991, vol. 24, 35-59.
- Pesta, G.** Anaerobic Digestion of Organic Residues and Wastes. In: OREOPOULOU V., RUSS W. *Utilization of By-products and Treatment of Waste in the Food Industry*. New York 2007.
- Phan, T. S. (2020).** Development, characterization and evaluation of a catalyst in the reforming of biogas for the production of green hydrogen (Doctoral dissertation, Ecole des Mines d'Albi-Carmaux).
- Ramade, F. (1993).** Dictionnaire encyclopédique de l'écologie et des sciences de l'environnement. Ed. Edi-Science Internationale, Paris, 822p.
- Ramade, F. (2003).** Eléments d'écologie. Ecologie fondamentales. 3ème édition. Dunod. France. 690p.
- Ren, N., Wang, B., Huang, J.** Ethanol-type fermentation from carbohydrate in high rate acidogenic reactor. *Biotechnology and Bioengineering*, 1997, vol. 54, n° 5, 428-433.
- Robitaille R., Rioux, R. Simard, B. Gagnon et R. Lalande. 1996.** Est-ce qu'il est bon mon compost? Bio-bulle septembre/octobre 1996.
- Sacchi, C.F.et Testard, P. (1971).** Ecologie Animale et Environnement: organisme et milieux. Edition. DOIN, Paris, France. 480p.
- Sanders, W.T.M., Geerink, M., Zeeman, G., Lettinga, G.** Anaerobic hydrolysis kinetics of particulate substrates. *Water Science and technology*, 41, 2000, n° 3, 17-24.
- Sasse, L.** Biogas plants. Eschborn, Federal Republic of Germany: German Appropriate
- Schmidt, J. E., Ahring, B. K.** Granular sludge formation in upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors. *Biotechnology and Bioengineering*, 1996, vol. 49, n° 3, 229-246.
- SELMANE HEMZA, T. S. (2017).** ETUDE ET REALISATION D'UN DIGESTEUR ANAEROBIQUE POUR LA PRODUCTION DE BIOGAZ.

- Sharma, S.K., Mishra, I.M., Sharma, M.P., Saini, J.S.** Effect of particle size on biogas generation from biomass residues. *Biomass & Bioenergy*, 1988, vol. 17, n° 4, 251-63.
- Singh, K.J., Sooch, S.S.** Comparative study of economics of different models of family size biogas plants for state of Punjab, India. *Energy Conversion and Management*, 2004, vol. 45, 1329-1341.
- Skiadas, I.V., Gavala, H.N., Lyberatos, G.** Modelling of the periodic anaerobic baffled reactor (PABR) based on the retaining factor concept. *Water Research*, 2000, vol. 34, n° 15, 3725- 3736.
- Sleat, R., Robinson, J.P.** The bacteriology of anaerobic degradation of aromatic compounds. *Journal of Applied Bacteriology*, 1984, vol. 57, n° 3, 381-394
- SOLAGRO**, La méthanisation « à la ferme », **2005**, pp.1-4
- Sorensen, P.** The fate of nitrogen from animal manures in soil–crop systems: experiences with dairy and pig slurries. Aarhus University, Denmark, January 2008.
- Tchobanoglous, G., Burton, F., Stensel, H.** *Waste-water Engineering: treatment and reuse* _Fourth edition. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2003, P. 1819.
- Technology Exchange (GATE) & Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), 1988,
- Tou I., Igoud S. et Touzi A. (2001).** Production de Biométhane à Partir des Déjections Animales. *Rev. Energ. Ren. : Production et Valorisation – Biomasse*,103-108.
- Vavilin, V. A., Fernandez, B., Palatsi, J., & Flotats, X. (2008).** Hydrolysis kinetics in anaerobic degradation of particulate organic material: An overview. *Waste Management*, vol. 28, n° 6, 939-951.
- Vavilin, V.A., Rytov, S.V., Lokshina, L.Y.A.** Description of hydrolysis kinetics in anaerobic degradation of particulate organic matter. *Bioresource Technology*, 1996, vol. 56, n° 2-3, 229- 237.
- Ward, A.J., Hobbs, P.J., Holliman, P.J., Jones, D.L.** Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology*, 2008, vol. 99, pp. 7928-7940.
- Yadvika, S., Sreekrishnan, T. R., Sangeeta, K., Vineet, R.** Enhancement of biogas production from solid substrates using different technique - A Review. *Bioresour. Technol.*, 2004.
- Yadvika, S., Sreekrishnan, T. R., Sangeeta, K., Vineet, R.** Enhancement of biogas production from solid substrates using different technique - A Review. *Bioresour. Technol.*, 2004, vol. 95, pp. 1-10.
- Zerrouki, S., Rihani, R., & Bentahar, F. (2017).** Etude de la digestion anaérobie des effluents issus de l'industrie agroalimentaire. *Nature & Technology*, (17).

RESUME

Les zones rurales en Algérie font face à des défis majeurs en matière d'accès à l'énergie, avec une électricité souvent inexistante ou intermittente, et une dépendance prédominante aux combustibles traditionnels comme le bois de chauffage. Pour remédier à cette situation, il est crucial de promouvoir les énergies renouvelables, notamment des solutions telles que la valorisation des déchets organiques pour produire du biogaz, car cette dernière est une source d'énergie propre et renouvelable obtenue grâce à la décomposition anaérobie des matières organiques, comme les déchets agricoles, les résidus alimentaires et les excréments animaux. Son utilisation dans les zones rurales offrirait des avantages significatifs, En privilégiant le biogaz, les communautés rurales pourraient réduire leur dépendance aux combustibles fossiles, contribuer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et promouvoir une gestion durable des déchets organiques. De plus, cette transition énergétique favoriserait la création d'emplois locaux dans la production et l'utilisation du biogaz, tout en permettant des économies substantielles sur les dépenses en combustibles traditionnels et La promotion des énergies renouvelables, notamment par le biais de la valorisation des déchets organiques pour la production de biogaz, offre une solution durable en répondant aux besoins énergétiques fondamentaux tout en préservant l'environnement. Cette transition permettrait également de stimuler l'économie locale en créant des opportunités d'emploi et en réduisant les dépenses liées aux combustibles traditionnels.

Mots Clés : Bio digesteur; Méthanisation; Biogaz; Algérie; Energie.

Rural areas in Algeria face major challenges in terms of access to energy, with electricity often non-existent or intermittent, and a predominant dependence on traditional fuels such as firewood. To remedy this situation, it is crucial to promote renewable energies, including solutions such as the recovery of organic waste to produce biogas, because the latter is a clean and renewable source of energy obtained through anaerobic decomposition of organic matter, such as agricultural waste, food residues and animal excrement. Its use in rural areas would offer significant benefits, By favoring biogas, rural communities could reduce their dependence on fossil fuels, contribute to the reduction of greenhouse gas emissions and promote sustainable management of organic waste. In addition, this energy transition would promote the creation of local jobs in the production and use of biogas, while allowing substantial savings on traditional fuel expenditure and the promotion of renewable energies, particularly through the recovery of organic waste for biogas production, offers a sustainable solution by meeting basic energy needs while preserving the environment. This transition would also stimulate the local economy by creating employment opportunities and reducing spending on traditional fuels.

Key words: Bio digester; Mechanization; Biogas; Algeria; Energy.

