

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



LAVALEF

Département de Génie Chimique

Laboratoire de Valorisation des Energies Fossiles

Thèse de Doctorat en Génie Chimique

Production du biogaz à partir des déchets issus d'une ferme d'élevages

Par

Aziza MELLAK

Sous la direction de Mr. BOUARAB Rabah Professeur ENP

Et Mr. AHMED-ZAID Toudert Professeur ENP

Présentée et soutenue publiquement le 17/10/2020

Composition du Jury :

Président	Mr. BENYOUSSEF El Hadi	Professeur	ENP
Directeur de thèse	Mr. BOUARAB Rabah	Professeur	ENP
Co-directeur de thèse	Mr. AHMED-ZAID Toudert	Professeur	ENP
Examineurs	Mme. KIES Fairouz	MCA	ENP
	Mme. AZIZA Majda	DR	CDER
	Mr. LOUNICI Hakim	Professeur	U. Bouira
Invité	Mr. BENMESSAOUD Nacer	MAA	ENSA

ENP 2020

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



LAVALEF

Département de Génie Chimique

Laboratoire de Valorisation des Energies Fossiles

Thèse de Doctorat en Génie Chimique

Production du biogaz à partir des déchets issus d'une ferme d'élevages

Par

Aziza MELLAK

Sous la direction de Mr. BOUARAB Rabah Professeur ENP

Et Mr. AHMED-ZAID Toudert Professeur ENP

Présentée et soutenue publiquement le 17/10/2020

Composition du Jury :

Président	Mr. BENYOUSSEF El Hadi	Professeur	ENP
Directeur de thèse	Mr. BOUARAB Rabah	Professeur	ENP
Co-directeur de thèse	Mr. AHMED-ZAID Toudert	Professeur	ENP
Examineurs	Mme. KIES Fairouz	MCA	ENP
	Mme. AZIZA Majda	DR	CDER
	Mr. LOUNICI Hakim	Professeur	U. Bouira
Invité	Mr. BENMESSAOUD Nacer	MAA	ENSA

ENP 2020

DEDICACES

Je dédie ce travail :

A l'unique personne qui m'a réellement soutenu depuis le 1^{er} jour, qui a toujours été là pour moi et qui continue à l'être jour après jour. A toi PAPA

A celle qui met toujours la barre très haut à ses enfants pour les pousser vers l'avant et dans le seul but de leur vouloir que le MEILLEUR !! A toi MAMAN

A mes sœurs, Radia et Chemssy. A HANA ma nièce chérie.

A mon époux et ma belle-famille.

&

A toute personne qui a cru en moi

Je vous dis MERCI

REMERCIEMENTS

Le travail présenté dans ce projet de thèse a été réalisé au sein du laboratoire de valorisation des énergies fossiles, département de Génie Chimique de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, sous la direction de Monsieur R.BOUARAB et Monsieur T.AHMED-ZAID, professeurs à l'Ecole Nationale Polytechnique.

Je souhaiterais dans un premier temps remercier les professeurs R.BOUARAB et T.AHMED-ZAID, de m'avoir accompagnée tout au long de ce projet de thèse. Pour leurs précieux conseils et leur investissement dans l'élaboration de ce dernier. J'aimerais exprimer ma reconnaissance pour la confiance qu'ils m'ont toujours accordée, pour leur soutien, leur grande disponibilité et leur aide pour la correction de ce travail.

Je tiens également à remercier Monsieur Yves LE ROUX et Monsieur Stéphane PACAUD, professeurs à l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires à Nancy, France pour leur grande aide et implication dans l'élaboration de la partie expérimentale au niveau du laboratoire de la ferme expérimentale –LA BOUZULE-, Nancy, France.

A Monsieur E-H.BENYOUSSEF, professeur à l'ENP, je suis très touchée de l'honneur que vous me faites en acceptant de présider le jury de ma soutenance. Soyez assuré Monsieur, de tout mon respect et de ma profonde gratitude.

Madame F.KIES : Maître de conférences (A) à l'ENP, Madame M.AZIZA : Directeur de recherche (Division Bioénergie) au Centre de Développement des Energies Renouvelables de Bouzeréah, Monsieur H.LOUNICI, professeur à l'Université de Bouira. Veuillez accepter mes plus vifs remerciements pour votre présence dans ce jury.

Je ne peux terminer ces remerciements, sans adresser un immense Merci à Monsieur N.BENMESSAOUD, Maitre-Assistant (A) à l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie pour sa contribution et son aide dans la partie prospective.

ملخص

تعتمد الجزائر بشكل أساسي على الطاقات الأحفورية لتلبية احتياجاتها من الطاقة. مع تراجع الهيدروكربونات ، بدأت الحكومة الجزائرية في التفكير في الحلول الاقتصادية والبيئية من خلال الاستثمار في الطاقات المتجددة. في عام 2015 ، تم تخطيط ادخال الطاقة الحيوية ومساهمتها في 1000 ميغاواط كهربائية بحلول عام 2030. في هذا السياق ، تبحث هذه الدراسة الإمكانيات الميثانوجينية لمختلف نفايات الحيوانات من أجل التوليد المشترك للطاقة والحرارة ، وتقييم الطاقة التي يمكن تقديرها مع مراعاة حجم القطيع. أظهرت النتائج أن أعلى إنتاجية من الميثان ، 281 ل/كغ من المادة العضوية، تم الحصول عليها من ماشية البقر تليها الدواجن، الأغنام والخيول بـ 276 و 218 و 211 ل/كغ من المادة العضوية على التوالي. يبلغ إنتاج الميثان من الأغنام، الخيول، الدواجن والأبقار 75 و 54 و 47 و 44 لترًا لكل كيلوغرام من المادة الخام ، على التوالي. وبالتالي ، فإن تغطية نفايات الثروة الحيوانية يمكن أن تغطي جزء من احتياجاتنا الطاقوية في العشريات القادمة. حوالي 300 ميغاواط كهربائية يمكن انتاجها مع ظروف الأنظمة الحالية لتربية المواشي في الوطن.

الكلمات الأساسية: الهضم اللاهوائي، الميثانوجين المحتملة، النفايات الحوانية، دراسة مستقبلية.

Abstract

Algeria relies mainly on fossil fuels for its energy needs and economy. With the decline of hydrocarbons, the Algerian government is beginning to consider economic and ecological solutions by investing in renewable energies. In 2015, it planned to introduce bioenergy with a contribution of 1000 MW_{elect} by 2030. In this context, this study examines the methane potential production from different livestock effluents for combined heat and power cogeneration. This potential is assessed considering the livestock size and various assumptions. Our results show that the highest methane yield, 281 L CH₄ / kg volatile solids (VS), can be achieved from dairy cattle followed by poultry, sheep and horses with 276, 218, and 211 L CH₄ / kg VS respectively. Methane production from sheep, horses, poultry and dairy cattle wastes is 75, 54, 47 and 44 L CH₄ / kg of crude matter, respectively. Thus, the valorization of livestock manure could cover part of our energy needs in the coming decades. About 300 MW_{elect} can be installed with the conditions of the current livestock systems.

Keywords: methanisation, livestock effluents, methane potential, prospective study

Résumé

L'Algérie dépend principalement des énergies fossiles pour ses besoins énergétiques. Avec le déclin des hydrocarbures, le gouvernement algérien commence à envisager des solutions économiques et écologiques en investissant dans les énergies renouvelables. En 2015, il prévoit l'introduction de la bioénergie et son apport à 1000 MW_{élect} d'ici 2030. Dans ce contexte, la présente étude examine le potentiel méthanogène de différents effluents d'élevage pour la cogénération combinée de chaleur et d'électricité, et évalue l'énergie qui peut être valorisée en tenant compte de la taille du cheptel. Les résultats montrent que le rendement le plus élevé en méthane, 281 L CH₄/kg MO, a été obtenu à partir de bovins laitiers suivi de volailles, de moutons et de chevaux avec 276, 218, et 211 L CH₄/kg MO respectivement. La production de méthane à partir des rejets de moutons, chevaux, volailles et bovins laitiers est respectivement de 75, 54, 47 et 44 L CH₄ /kg de matière brute. La valorisation des effluents d'élevage pourrait, donc, couvrir une partie de nos besoins énergétiques dans les prochaines décennies. Près de 300 MW_{élect} peuvent être installés avec les conditions des systèmes d'élevage actuels.

Mots clés : méthanisation, effluents d'élevage, potentiel méthanogène, étude prospective

Table des matières

Liste des tableaux	
Liste des figures	
Liste des abréviations	
INTRODUCTION GENERALE	13
PREMIERE PARTIE : APPROCHE BIBLIOGRAPHIQUE.....	16
1. Contexte du biogaz et de la méthanisation.....	17
1.1. Origine et composition.....	17
1.2. Le biogaz dans le monde.....	18
1.2.1. Energie issue du biogaz en Europe.....	18
1.2.2. le biogaz en France.....	18
1.3. Etat des lieux en Algérie.....	19
1.4. Description de la méthanisation.....	20
1.4.1. Unité de méthanisation.....	20
1.4.2. Types de digesteurs anaérobies.....	20
1.5. Etapes de méthanisation.....	31
1.5.1. Hydrolyse.....	31
1.5.2. Acidogénèse.....	35
1.5.3. Acétogénèse.....	36
1.5.4. Méthanogénèse.....	36
1.6. Paramètres influençant la méthanisation.....	38
1.6.1. Facteurs d'influence.....	38
1.6.2. Paramètres globaux.....	41
1.7. Description du fonctionnement d'une installation de méthanisation agricole.....	42
1.7.1. Préparation des intrants.....	42
1.7.2. Prétraitement des intrants.....	43
1.7.3. Introduction des matières dans le digesteur.....	43
1.7.4. Digestion.....	44
1.7.5. Post digestion.....	44
2. Voies d'utilisation des produits de la biométhanisation.....	44
2.1. Biogaz.....	44
2.1.1. La production de chaleur.....	45
2.1.2. La production d'électricité.....	45

2.1.3. La production de biogaz carburant.....	45
2.1.4. L'injection dans le réseau de gaz naturel.....	45
2.1.5. La production combinée d'électricité et de chaleur par cogénération.....	46
2.2. Digestat.....	47
2.2.1. Description du digestat.....	47
2.2.2. Valeur agronomique du digestat.....	48
2.2.3. Les avantages de l'utilisation du digestat.....	48
2.2.4. Stockage et valorisation du digestat.....	49
DEUXIEME PARTIE : APPROCHE EXPERIMENTALE DE LABORATOIRE.....	50
3. Origine et caractérisation des substrats.....	51
3.1. Echantillonnage des déchets.....	51
3.1.1. Choix et collecte d'échantillons de déjections animales.....	51
3.1.2. Choix et collecte d'inoculum.....	51
3.2. Caractérisation des substrats.....	51
3.2.1. Analyses de matière sèche.....	51
3.2.2. Analyses de matière organique.....	52
4. Etude du potentiel biométhanogène.....	53
4.1. Généralités.....	53
4.2. Objectif et Mode opératoire.....	53
4.3. Mesures de pH.....	55
4.4. Evaluation du biogaz produit.....	55
4.4.1. Evaluation du volume cumulé de biogaz produit.....	55
4.4.2. Evaluation du biogaz produit/ gMO (matière organique).....	56
4.4.3. Evaluation du biogaz produit/ gMB (matière brute).....	57
4.5. Evaluation du volume cumulé de CH ₄ produit.....	58
4.5.1. Pourcentage en méthane des différents substrats.....	58
4.5.2. Evaluation du CH ₄ produit/ gMO (matière organique).....	58
4.5.3. Evaluation du CH ₄ produit/ gMB (matière brute).....	59
4.6. Comparaison des potentiels méthanogènes des différents substrats.....	60
4.6.1. Synthèse des résultats.....	60
4.6.2. Discussion des résultats.....	60
TROISIEME PARTIE : ETUDE PROSPECTIVE : VALORISATION DES EFFLUENTS D'ELEVAGE EN ALGERIE	62
5. Données du cheptel et répartition des élevages.....	63

5.1. Caractéristiques des élevages en Algérie.....	63
5.2. Données du cheptel.....	63
5.3. Répartition des élevages.....	63
5.3.1. Elevage bovin.....	63
5.3.2. Elevage ovin.....	66
5.3.3. Elevage avicole.....	67
5.4. Utilisation des effluents d'élevage en Algérie.....	68
6. Scenarios pour la valorisation des effluents d'élevage.....	68
6.1. Construction des scénarios.....	68
6.2. Evaluation des scénarios.....	69
6.2.1. Evaluation du potentiel de biogaz et de CH ₄ selon les deux scénarios.....	69
6.2.1.1. Scénario 01.....	69
6.2.1.2. Scénario 02.....	69
6.2.2. Evaluation des puissances électriques et thermiques selon les deux scénarios.....	71
6.2.2.1. Bases de Calcul pour l'Evaluation de l'Energie Fournie par le Biogaz.....	71
6.2.2.2. Scénario 01.....	71
6.2.2.3. Scénario 02.....	71
6.3. Discussion des résultats.....	72
7. Cas d'étude : ferme expérimentale-LA BOUZULE-.....	73
7.1. Description de la ferme.....	73
7.1.1. Elevage bovin.....	73
7.1.2. Chèvrerie.....	74
7.1.3. Cultures.....	74
7.2. Projet Bouzule 2010.....	74
7.2.1. L'autonomie énergétique.....	74
7.2.2. L'autonomie alimentaire.....	75
7.2.3. L'autonomie en azote.....	75
7.3. Processus de méthanisation au sein de la Bouzule.....	75
7.3.1. Alimentation du digesteur.....	75
7.3.2. A l'intérieur du digesteur.....	75
7.3.3. Biogaz récupéré.....	76
7.3.4. Digestat.....	76
7.3.5. Cogénérateur.....	76
7.4. Bilan énergétique de la ferme.....	77

7.4.1. Tests BMP sur l'inoculum de la ferme.....	77
7.4.2. Production énergétique de la ferme.....	78
7.4.3. Discussion des résultats.....	78
CONCLUSION GENERALE.....	79
REFERENCES.....	82
ANNEXES.....	91

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 01 : Taux de matières sèches des substrats étudiés.....	51
Tableau 02 : Taux de matières organiques des substrats étudiés.....	52
Tableau 03 : Masses sèches et brutes des substrats étudiés correspondant à 3 g de MO	54
Tableau 04 : Valeurs du pH avant et après manipulation.....	55
Tableau 05 : Volumes de biogaz et de CH ₄ produits en L/kg MO et /kg MB.....	60
Tableau 06 : Potentiel du biogaz et du CH ₄ issu du fumier des substrats étudiés selon les deux scénarios.....	70
Tableau 07: Puissances électriques et thermiques produites à partir du méthane issu du fumier des substrats étudiés selon les deux scénarios.....	72
Tableau 08 : Production d'électricité dans la ferme de la Bouzule (Année 2015).....	77
Tableau 09 : Volumes de biogaz et de CH ₄ produits en L/kg MO et /kg MB du mélange fumier/lisier de la Bouzule.....	77
Tableau 10 : Production primaire de biogaz de l'Union européenne en 2015 et en 2016 (en ktep) (<i>EurObserv'ER</i> , 2017).....	91
Tableau 11 : Production brute d'électricité à partir de biogaz de l'Union européenne en 2015 et en 2016 (en GWh) (<i>EurObserv'ER</i> , 2017).....	92
Tableau 12 : ANIMAUX D'ELEVAGE (Espèces bovines) (Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural 2014).....	93
Tableau 13 : ANIMAUX D'ELEVAGE (Espèces ovines) (Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural 2014).....	94
Tableau 14 : ANIMAUX D'ELEVAGE (Espèce chevaline) (Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural 2014).....	95

LISTE DES FIGURES

Figure 01: Représentation schématiques du digesteur type Ducellier-Isman (Source : Brakel (1980)).....	22
Figure 02: Coupe schématique d'un digesteur CIEH de petite capacité.....	23
Figure 03: Représentation schématique d'un digesteur à dôme encastré (Source : Sasse (1988)).....	25
Figure 04: Description schématique d'un digesteur Puxin fonctionnant à partir de déjections animales et excréments humains (Source : Puxin (2009)).....	26
Figure 05: Représentation schématique d'un digesteur à cloche mobile (Source : Sasse (1988)).....	27
Figure 06: Représentation schématique du digesteur ARTY (Source : (Müller, 2007)).....	28
Figure 07: Coupes schématiques de digesteurs infiniment mélangés (Source : (ISAT-GTZ, 1999)).....	29
Figure 08: Les phases de la décomposition des déchets.....	38
Figure 09: Dispositif expérimental des tests BMP au laboratoire de la ferme.....	54
Figure 10: Production de biogaz pour 3g de MO à partir des substrats étudiés.....	56
Figure 11: Evolution de la production de biogaz/ kg MO à partir des substrats étudiés.....	57
Figure 12: Evolution de la production de biogaz/ kg MB à partir des substrats étudiés.....	57
Figure 13: Pourcentages en méthane des différents substrats étudiés.....	58
Figure 14: Evolution de la production de CH ₄ / kg MO à partir des substrats étudiés.....	59
Figure 15: Evolution de la production de CH ₄ / kg MB à partir des substrats étudiés.....	59
Figure 16: Répartition des élevages bovin, ovin et avicole en Algérie.....	66
Figure 17: Prélèvement de l'inoculum dans la ferme expérimentale de l'ENSAIA –La Bouzule-.....	96
Figure 18: Digesteur de la ferme expérimentale de l'ENSAIA –La Bouzule-.....	96
Figure 19: Bouteilles utilisées durant la période des manipulations.....	97
Figure 20: pH mètre utilisé au laboratoire.....	97
Figure 21: Compteur de gaz à tambour et l'analyseur CH ₄ utilisés au laboratoire.....	98
Figure 22: Agitateur du digesteur de la ferme expérimentale –La Bouzule-.....	98

Figure 23: Post digesteur de la ferme expérimentale –La Bouzule-.....	99
Figure 24 : Chambre de cogénération de la ferme expérimentale –La Bouzule-.....	99

LISTE DES ABREVIATIONS

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

AGV: Acide gras volatile

AND: Agence Nationale des Déchets

BMP: Biomethane Methane Potentiel

BLA: Bovin Laitier Amélioré

BLL: Bovin Laitier Local

BLM: Bovin Laitier Moderne

BP: British Petroleum

CDER : Centre de Développement des Energies Renouvelables

CIVE : Cultures Intermédiaires à Vocation Energétique

CNTP : Condition normale de température et de pression

DA : Digestion anaérobie

DMA : Déchets ménagers assimilés

EDF : Électricité De France

ER : Energies renouvelables

GES : Gaz à effet de serre

IRENA : International Renewable Energy Agency

MADR : Ministère de l'Agriculture et du Développement Durable

MB : Matière Brute

MO : Matière Organique

MS : Matière sèche

Mtep : Million tonnes équivalent pétrole

MV : Matière volatile

PCI : Pouvoir calorifique inférieur

PED : Pays en développement

pH : potentiel d'Hydrogène

STEP : Station d'épuration

TeqCO₂: Tonne equivalent dioxyde de carbone

INTRODUCTION GENERALE

L'Algérie s'étale sur une superficie de 2 381 741 km², compte une population estimée à 43 millions et un taux de croissance annuel d'environ 2%. (ONS, 2019) Elle est le premier producteur de gaz naturel en Afrique, le deuxième fournisseur de gaz naturel en Europe, et figure parmi les trois premiers producteurs de pétrole en Afrique. (BP, Statistical Review of World Energy, 2015) Toutefois, la production brute de gaz naturel et de pétrole brut a progressivement diminué au cours de la dernière décennie. La consommation d'énergie de l'Algérie a plus que doubler depuis l'an 2000, passant de 28 à 58 Mtep en 2015. Cela représente une croissance moyenne de 5 % par an, avec une accélération de 6 % au cours des cinq dernières années. (AIE, 2017) Par ailleurs, les réserves prouvées de pétrole algérien ont été estimées à 1,5 milliards de tonnes à la fin de 2014 (12,2 milliards de barils), soit l'équivalent de 22 ans de production. En ce qui concerne le gaz naturel, les réserves prouvées s'élèvent à 4 500 milliards de m³, soit l'équivalent de 54 ans de production. (BP, Statistical Review of World Energy, 2015)

Face à ce déclin d'énergies fossiles, le gouvernement algérien a commencé à investir dans les énergies renouvelables (ER). En février 2015, il avait envisagé l'installation de 22 GW d'ER d'ici 2030, ce qui équivaut à une part d'environ 27% ER dans la production totale d'électricité. Sur ces 22 GW, le programme fixe comme objectif : 13 575 MW de photovoltaïque solaire, 5 010 MW d'éolien, 2 000 MW de solaire thermique, 1 000 MW de biomasse (dont la valorisation des déchets), 400 MW de cogénération et 15 MW de géothermie. (Portail du CDER, 2015)

La valorisation de la biomasse étant l'un des principaux leviers dans le développement des énergies renouvelables, c'est dans ce contexte que nous nous sommes intéressés à la production du biogaz et plus exactement au biogaz issu des effluents d'élevage. Les fermes génèrent souvent de grandes quantités de déchets organiques (provenant d'animaux ou de la végétation). Ces déchets peuvent être convertis en énergie afin de répondre au moins aux besoins énergétiques locaux de la ferme. En effet, le fumier animal issu de l'élevage est à l'origine des premières installations de biogaz dans les exploitations agricoles. En combinaison avec d'autres déchets verts, ils peuvent produire en plus du biogaz, un très bon engrais organique pour les activités agricoles. (IRENA, 2014)

La méthanisation est de plus en plus perçue comme une voie incontournable d'amélioration du bilan environnemental et énergétique. (Béline, 2010) Cette technique permet de produire du méthane (valorisable sous forme d'énergie) à partir des déjections et autres résidus agricoles et semble être un bon moyen de réduire les émissions à effet de serre liées à la

gestion des déjections animales (Amon et al, 2006 ; Clemens et al, 2006). Au-delà de la réduction directe des émissions à la source, la méthanisation intervient aussi par la substitution d'une énergie fossile pour la production d'électricité et/ou de chaleur. La réduction des odeurs, l'amélioration des caractéristiques agronomiques (fertilisation des sols), la réduction des nuisances dues à l'accumulation des déchets, l'amélioration de la qualité de vie des populations rurales en assurant une autonomie énergétique, en préservant leur santé et leur environnement sont également des avantages majeurs de la méthanisation.

La production du biogaz est en nette croissance partout dans le monde. En Algérie, le développement de cette filière est encore à l'échelle de l'expérimentation où des travaux de production de biogaz à partir de déchets organiques sont menés à l'échelle de laboratoire ; nous pouvons citer comme exemple les travaux de Tou et al. (2001), à partir des différentes déjections animales, ceux de Tahri et al. (2012), à partir des déchets d'abattoir et de volaille ainsi que Saidi-Boulahia et al. (2018), à partir des déchets organiques ménagers et des déjections bovines.

A plus grande échelle, quelques projets pilotes de production de biogaz sont à l'étude ; il s'agit de projets de valorisation des déchets : ménagers, boues de stations d'épuration, rejets agricoles et d'élevage.

C'est dans ce contexte que nous inscrivons notre travail sur la valorisation des effluents d'élevage : vaches, chevaux, moutons et volailles. Le travail consiste à examiner le potentiel méthanogène des rejets correspondants et à construire des scénarios pour une mise en perspective constructive pour l'avenir de la méthanisation en Algérie. Pour cela, une étude prospective a été réalisée à l'échelle du territoire afin d'avoir une vision globale des gisements et des contraintes en vue de dégager des solutions optimales. En premier lieu, un recensement des animaux présents en Algérie a été effectué, avec leur localisation et leur système d'élevage. En second lieu, la prospective concernant la production de méthane à partir de ce recensement et d'hypothèses concernant la récupération des rejets a été établie à la suite de plusieurs entretiens avec des experts. Concernant les chiffres avancés pour la production de méthane, ces derniers se sont basés sur des valeurs expérimentales obtenues à partir des différents fumiers des espèces étudiées.

PREMIERE PARTIE :

APPROCHE BIBLIOGRAPHIQUE

1. Contexte du biogaz et de 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.

1.1. 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 (H_2S , H_2 ...).

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.

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)

1.2. 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.

1.2.1. Energie issue du biogaz en Europe

Avec une production d'énergie primaire, évaluée par *EurObserv'ER* à plus 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. (Voir Annexe 01, tableau 10)

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. (Voir Annexe 01, tableau 11)

1.2.2. 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)

1.3. Etat des lieux en Algérie

Depuis plusieurs années, on observe une émergence de l'économie biobasée et des énergies renouvelables. Avec son potentiel de gaz naturel et de pétrole, l'Algérie reste en retrait par rapport à d'autres pays qui se tournent résolument vers 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 biodéchets 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 2032,6 GWh soit 2 TWh par an. (AND, 2014)

1.4. 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)

1.4.1. 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.

1.4.2. 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 :

- 1) Les digesteurs discontinus ou batch à étape unique ;
- 2) Les systèmes d'alimentation en continu et à étape unique ;
- 3) 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) :

- 1) Les digesteurs discontinus (ou batch), chargés une seule fois, jusqu'à épuisement du substrat et fin du processus méthanogène ;
- 2) Les digesteurs continus, dont le contenu est en partie renouvelé régulièrement ;
- 3) 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'acidogenèse, lors du démarrage des réactions biologiques. Ses principaux compartiments sont présentés sur la figure 01.
- Le **digesteur du CIEH** (Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques) ou « puits », généralement disposé en batterie. La figure 02 illustre les principales composantes de ce type de digesteurs.

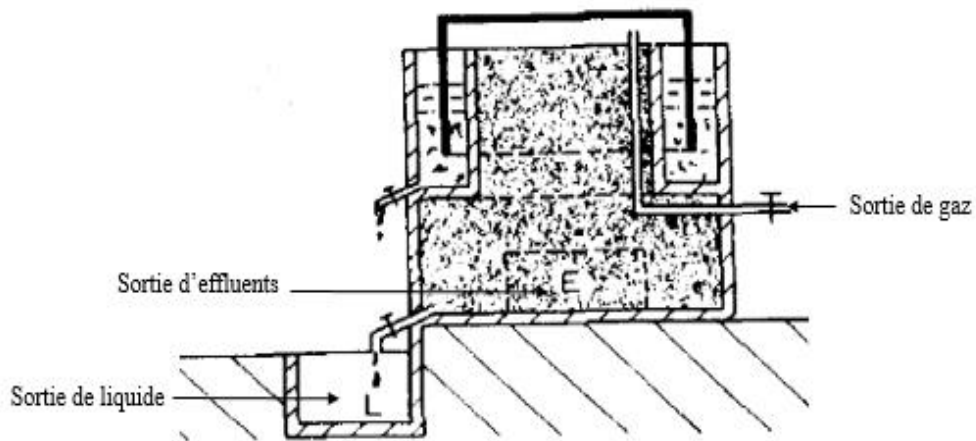


Figure 01: Représentation schématiques du digesteur type Ducellier-Isman

(Source : Brakel (1980))

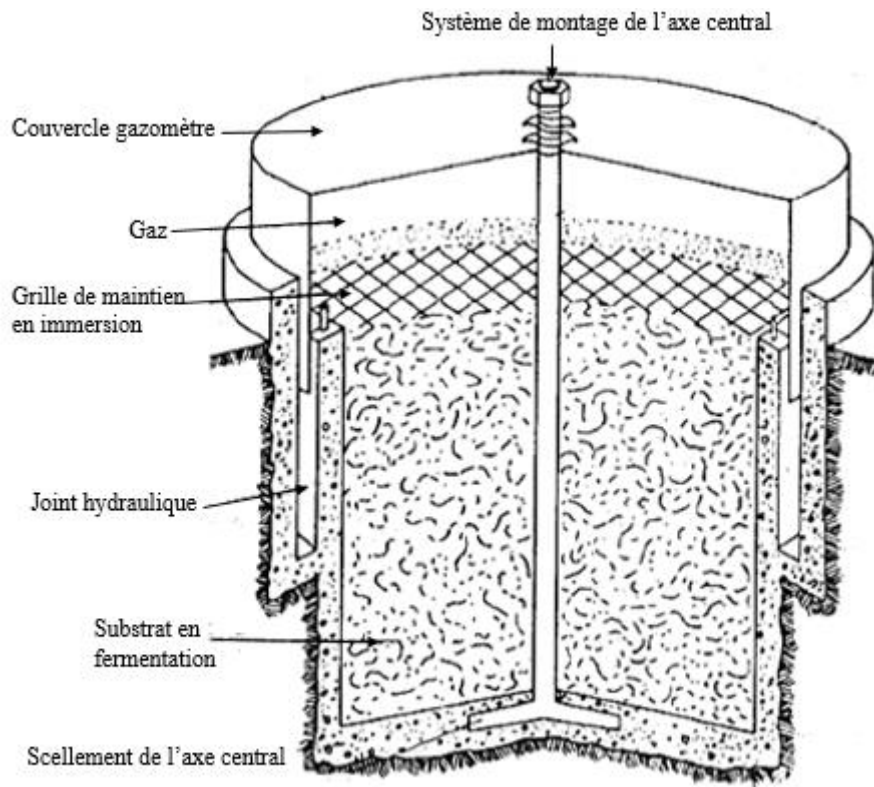


Figure 02: Coupe schématique d'un digesteur CIEH de petite capacité

(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 (Héduit, 1993). Il reste toutefois le plus simple, donc le moins cher, mais aussi le moins performant de tous les procédés.

Plusieurs exemples de réussite de programmes de développement de digesteurs discontinus, sont rapportés dans la littérature. A la ferme Maya (Philippines), par exemple, la fermentation a été réalisée à partir d'une dilution 1:1 de lisier de porc (12,5% MS, 10,0% MV), d'un temps de rétention de 30 jours, à environ 30°C, plus de 30 digesteurs en exploitation extensive, avec une recharge et une vidange tous les jours, pour ainsi garantir une fourniture constante de

biogaz (Maramba, 1978; FAO, 1992). Cette technologie a également été introduite au Sri Lanka par le Centre NERD (National Engineering Research Development), pour le traitement des déchets de marché, paille et plantes aquatiques.

- **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 oeuvre, 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 20ème 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. La figure 03 fait une représentation schématique des différents compartiments de ce type de digesteur.

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.

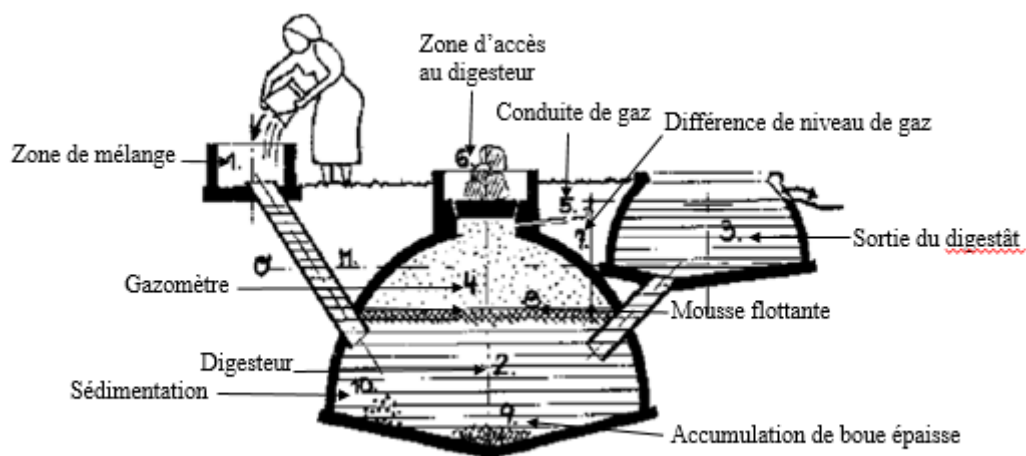


Figure 03: Représentation schématique d'un digesteur à dôme encastré

(Source : Sasse (1988)).

La firme de Shenzhen (Chine), Puxin Science & Technology, impliquée dans la recherche, le développement et la promotion de systèmes d'application à la méthanisation, a développé le **modèle de digesteur Puxin** qui est de type hydraulique. Il est composé du digesteur proprement dit en béton et d'un gazomètre en plastique renforcé par des fibres de verre. La taille d'un digesteur unitaire varie entre 6 et 50 m³. Il comprend une chambre de fermentation, un

goulot, une entrée et une sortie. Pour l'unité de taille familiale (6-10 m³), le gazomètre, de 1,6 m de diamètre (1-1,2 m³), est fixé au goulot du digesteur et scellé avec celui-ci par un joint d'eau (figure 04). Le digesteur Puxin est particulièrement adapté aux déjections animales, et autres déchets assimilés. Ce modèle de digesteur, éprouvé par plus de 20 années d'études, offre de nombreux avantages, par rapport aux autres digesteurs conventionnels (à dôme encastré ou à cloche mobile). Les composantes de ce digesteur (moule en acier, gazomètre, appareils utilisant le biogaz, etc.) ont été exportées dans de nombreux pays comme les Etats-Unis, l'Espagne, le Kenya, l'Indonésie, le Népal, le Timor oriental, la Mauritanie, le Ghana, le Panama et Haïti.

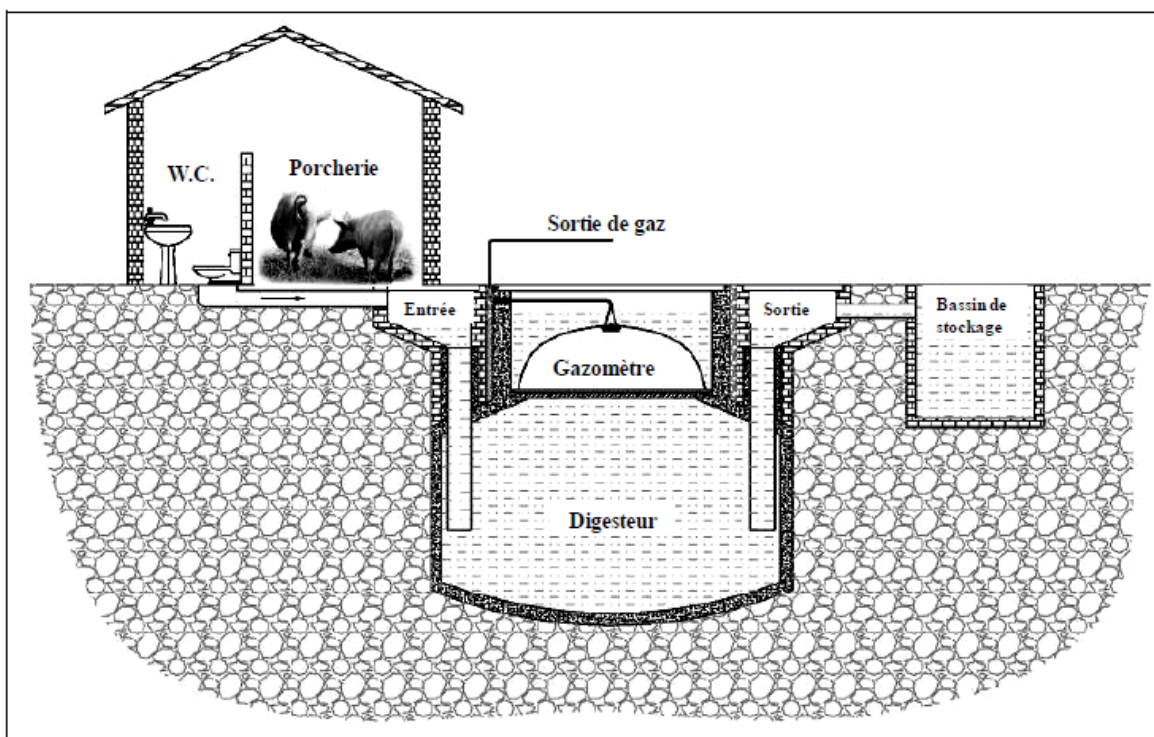


Figure 04 : Description schématique d'un digesteur Puxin fonctionnant à partir de déjections animales et excréments humains (source : Puxin (2009))

➤ 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). Ce digesteur est généralement alimenté à partir de déjections animales et humaines, résidus agricoles ou plantes aquatiques, à travers un tuyau d'entrée, tandis qu'une quantité équivalente de boue digérée est éliminée par le trop-plein (figure 05).

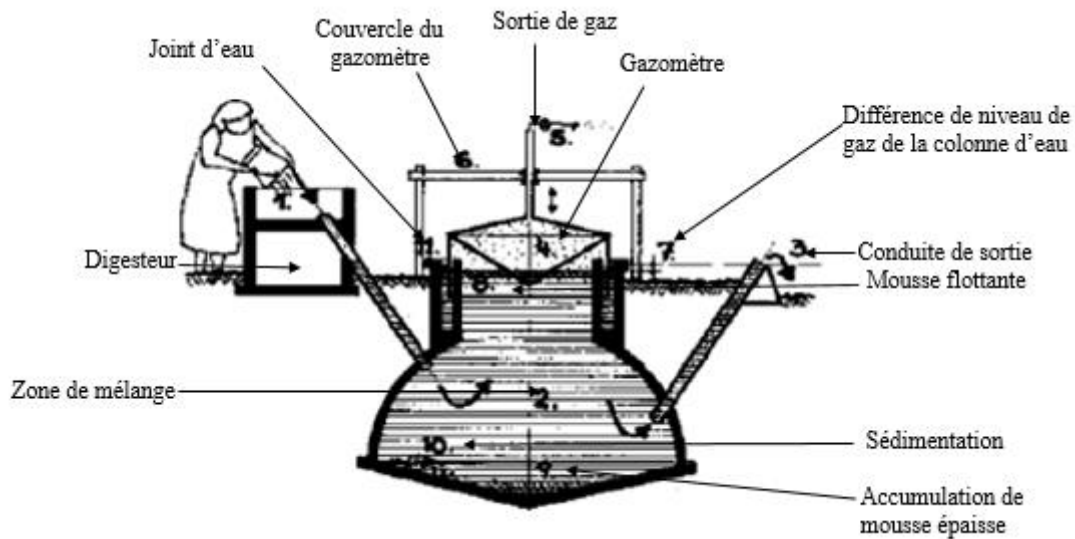


Figure 05: Représentation schématique d'un digesteur à cloche mobile

(Source : Sasse (1988)).

Le digesteur à cloche mobile, sur lequel le **modèle KVIC** s'est inspiré, est très répandu à travers le monde. Des équipes de chercheurs et d'industriels continuent d'améliorer le concept. A titre d'exemple, l'ONG ARTI (Appropriate Rural Technology Institute) basée à Maharashtra (Inde), regroupant des chercheurs et des travailleurs du social, a développé une technologie simple et robuste utilisant prioritairement les déchets alimentaires (résidus de salades et de légumes, aliments avariés, pelures de fruits, fruits pourris, etc.) comme substrat destiné à la fermentation méthanogène pour la cuisson. **Le digesteur ARTI** est conçu à partir de 2 citernes découpées en polyéthylène haute densité (PEHD). 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 (figure 06). Le concept est suffisamment compact pour être utilisé par les ménages urbains de même que par les fermiers du milieu rural (Müller, 2007).

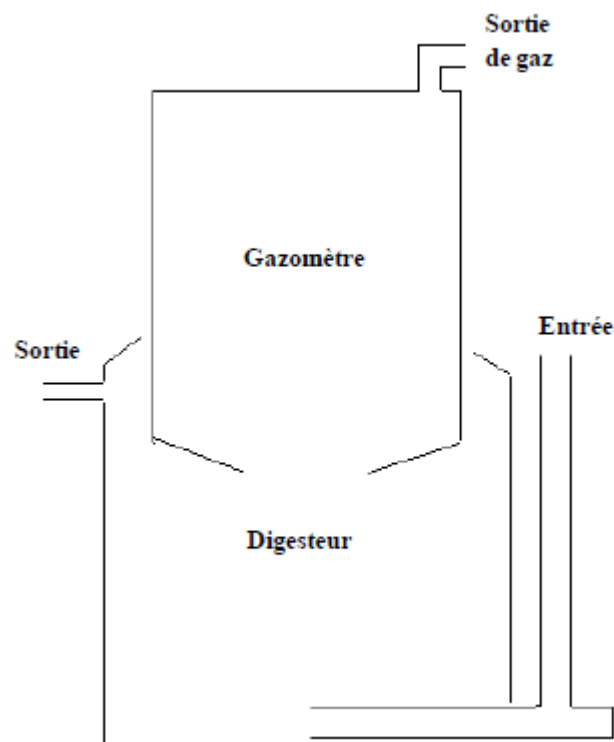


Figure 06: Représentation schématique du digesteur ARTY (Source : (Müller, 2007)).

- **Digesteurs continus**

Les procédés mis en œuvre par les digesteurs continus visent à surmonter les contraintes habituelles du processus de fermentation anaérobie, tels la sédimentation, les chemins préférentiels, les temps de rétention longs, une activité méthanogène relativement faible, etc. Cependant, le niveau de sophistication de ces procédés et, par ricochet, leurs coûts d'installation les rendent inaccessibles à la plupart des communautés des PED, sinon seulement quelques unités sont généralement importées à des fins expérimentales. Parmi les plus communs dans ces milieux, 2 types fondamentaux de ces digesteurs appelés « réacteurs limites » par Moletta (2008) sont présentés :

- le type procédé infiniment mélangé (completely mixed type),
- le type piston (plug-flow type).

- **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 07 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

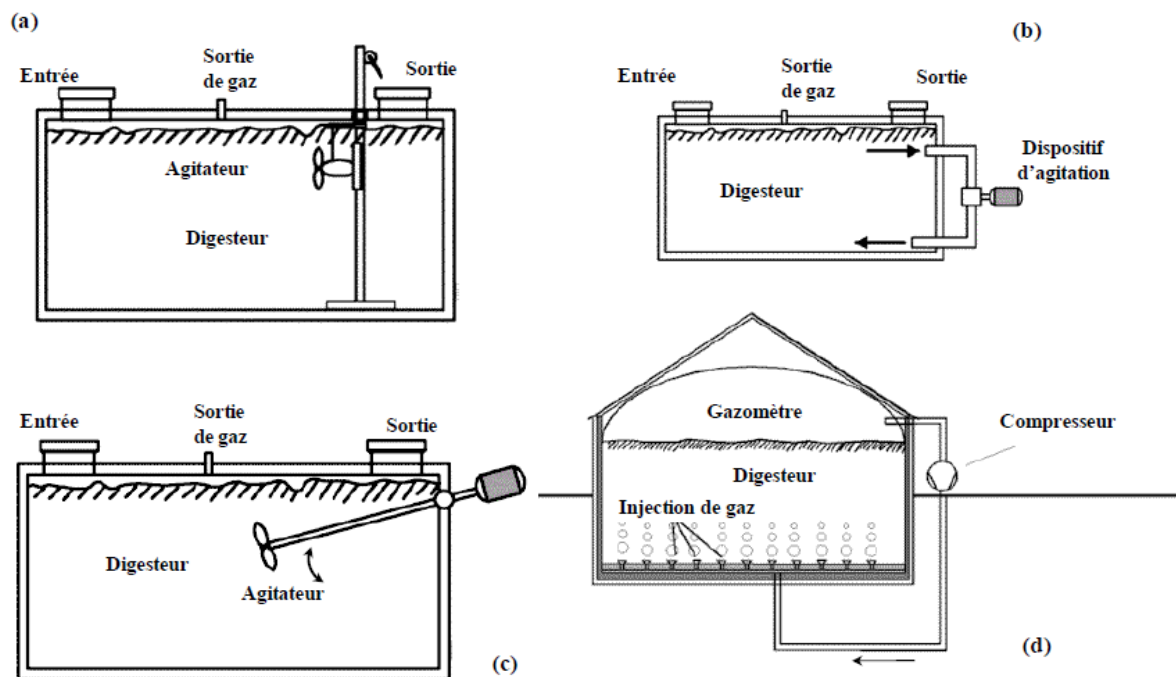


Figure 07: Coupes schématiques de digesteurs infiniment mélangés
 (Source : (ISAT-GTZ, 1999).

➤ 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 (Héduit, 1993). Le volume du digesteur varie en fonction des situations, avec des unités de taille familiale de 3 m³, des unités à l'usage des exploitations agricoles de 10-20 m³, voire des unités industrielles de plus de 100 m³. Le rendement volumique de biogaz est de 0,8 m³/m³ de digesteur/jour, avec une charge de 130 kg MS/m³ et un temps de rétention de 30 jours. Le temps de rétention est régi par la course du bouclier rapportée à la longueur du digesteur (Héduit, 1993). Les tests réussis sur de petites unités Transpaille installées dans des fermes agricoles des zones rurales du Sénégal, ont rassuré le projet mené par le groupe d'intérêt économique, Agriforce, en 1988. Ce projet consistait en la mise route d'une unité Transpaille de 40 m³ dans l'abattoir de Thiès (Sénégal), permettant théoriquement de produire 15 000 kWh d'énergie et 80 tonnes de compost par an.

Le **digesteur plastic (Plastic Bag Digester)** taïwanais a été conçu dans les années 1960 pour alléger les contraintes d'accessibilité et de coûts liées aux digesteurs en béton, maçonnerie ou acier. Ce type de digesteur est essentiellement constitué d'un long cylindre en PVC, ou PEHD (polyéthylène haute densité) auquel sont intégrés des tubes d'entrée et de sortie de substrats et un tube de sortie de gaz. Il fonctionne comme un digesteur type piston, avec possibilité de stockage du biogaz dans un gazomètre séparé ou non. Le digesteur taïwanais est particulièrement adapté au traitement du lisier de porc, avec un temps de rétention variant de 60 jours, entre 15 et 20°C, à 20 jours entre 30 et 35°C. Le rendement volumique est de 0,25-0,60 m³ de biogaz/m³ de digesteur/jour. En raison de sa simplicité d'installation et la possibilité d'être préfabriqué, le coût de ce digesteur est relativement faible, soit moins de 100 dollars pour une unité de taille familiale. Cet avantage fait de ce modèle de digesteur l'un des plus compétitifs, en dépit de la grande vulnérabilité de sa structure vis-à-vis des impacts physiques et des aléas climatiques.

Le Centre for Sustainable Technologies (CST-ASTRA), Indian Institute of Sciences de Bangalore, Inde a développé le **modèle de digesteur piston à 3 compartiments (3-zones plug flow like digester)**, dont les principales caractéristiques et les avantages comparatifs majeurs se résument par le fait qu'il approche le mode de fonctionnement des réacteurs à étapes multiples des Pays industrialisés, tout en évitant le niveau de sophistication de ces systèmes (Chanakya *et al.*, 2009). Ce modèle est relativement simple dans sa conception et sa mise en opération, donc peu onéreux. Il fonctionne suivant le principe des digesteurs à cloche

mobile, mais se comporte comme un digesteur type piston disposé horizontalement. Il est robuste et flexible, s'adaptant à des formes d'exploitation différentes et à des déchets de natures diverses.

1.5. 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 8 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.

1.5.1. 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 D-galactose 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).

Ainsi, l'hydrolyse enzymatique de la cellulose se déroule en plusieurs phases (Walker et Wilson, 1991) :

- Transfert de l'enzyme (cellulase) de la bactérie qui l'a synthétisée vers la particule à hydrolyser.
- Adsorption de la cellulase sur la cellulose et formation d'un complexe enzyme-substrat
- Hydrolyse de la cellulose.
- Transfert des cellodextrines (plus de 2 glucoses reliés par des liaisons glycosidiques β -1,4), des cellobioses (2 glucoses reliés par une liaison glycosidique β -1,4) et de glucose (produit de l'hydrolyse) vers la phase aqueuse.
- Hydrolyse des cellodextrines et cellobioses en glucose dans la phase aqueuse.

Le point critique résiderait dans l'adsorption de l'enzyme sur la particule (Walker et Wilson, 1991). Autrement dit, la biodégradabilité de la cellulose est caractérisée par la possibilité pour les cellulases de se fixer sur la cellulose. Ceci dépend en premier lieu des caractéristiques structurales de la cellulose pour lesquelles deux paramètres cruciaux interviennent (Walker et Wilson, 1991 ; Lee et Fan., 1982) :

- la surface de contact (limitation spatiale pour l'adsorption des cellulases).
- l'état de cristallinité (cristallin ou amorphe) de la cellulose (limitation de l'accès pour les cellulases à la surface de contact et stabilité accrue de la molécule).

Un autre aspect souligné par Lee et Fan (1982) concerne l'association de la cellulose avec d'autres composés comme la lignine qui peuvent limiter l'accès des cellulases aux molécules de celluloses (composés lignocellulosiques constitués de cellulose, d'hémicellulose et de lignine entremêlées) par des effets stériques.

Plusieurs types de cellulases interviennent dans la dégradation de la cellulose (Schwarz, 2001):

- Les exoglucanases : Ces enzymes attaquent la cellulose en bout de chaîne et conduisent à la production de cellodextrines solubles (principalement de la cellobiose). Elles peuvent attaquer les fibres de cellulose hautement cristallines. Ce groupe était autrefois supposé être exclusivement synthétisé par les champignons, mais des travaux (Langsford et al., 1984 ; Gardner et al., 1987) ont montré que des bactéries étaient aussi capables de les synthétiser.
- Les endoglucanases : Elles attaquent les fibres de cellulose de manière aléatoire et les découpent ainsi en polymères moins longs (cellodextrines). Elles augmentent le nombre d'extrémités et donc de sites d'attaque pour les exoglucanases. Ces enzymes ne peuvent pas agir sur les formes cristallines de la cellulose.
- Les β -glucosidases : Ces enzymes sont capables de dégrader des oligomères (cellobiose-triose et tetrose) en glucose.

Il existe donc une grande diversité de cellulases, qui sont classées en famille. Un micro-organisme ne synthétise pas une cellulase mais un jeu de cellulases adapté à son substrat. Ceci étant, Tarantili et al. (1996) ont également observé des synergies entre des cellulases issues de différents micro-organismes.

▪ **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 structurales (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).

1.5.2. 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).

1.5.3. 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).

1.5.4. 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 (Guyet 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 (Guyet 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.

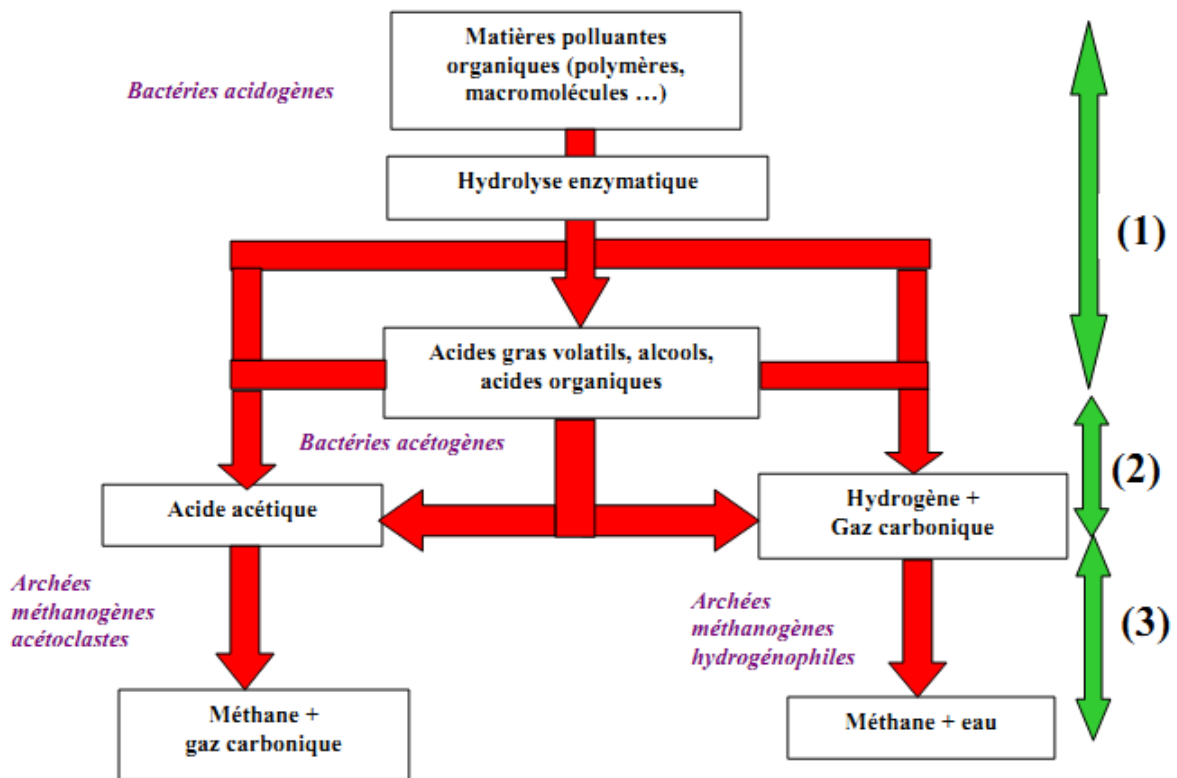


Figure 08: Principales étapes de la digestion anaérobie et leurs groupes de microorganismes respectifs (Lacour, 2012)

1.6. Paramètres généraux de fonctionnement

1.6.1. 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).

▪ **Pré-traitements**

Des opérations de prétraitement simple sont parfois nécessaires pour accroître la digestibilité anaérobie des substrats et améliorer les performances de tout le processus. Ces opérations de préparation des substrats consistent généralement à favoriser le contact entre la matière organique et les micro-organismes et à accélérer les processus réactionnels mis en œuvre par ceux-ci. Une première tâche souvent nécessaire est la ségrégation entre la fraction organique du substrat à digérer et la fraction minérale ou inerte considérée comme source d'impureté à l'intérieur du gisement. Cette dernière fraction se retrouve même dans les biodéchets comme par exemple, dans les fientes de poulets où une quantité de sable et de composés solides insolubles est souvent observée en relation au mode d'alimentation.

▪ **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, 2000; 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 biométhanisation (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.

1.6.2. 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.

1.7. Description du fonctionnement d'une installation de méthanisation agricole

1.7.1. 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, lactoserum...) et gras (huiles végétales, graisses de flottation...).

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...).

1.7.2. 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.

1.7.3. 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. La conduite du procédé par un logiciel de supervision se développe actuellement.

1.7.4. 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.

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...

1.7.5. 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 post-digestion 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)

2. 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.

2.1. 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 ($\text{eau} + \text{H}_2\text{S} = \text{H}_2\text{SO}_4$) ;
- d'augmenter le pouvoir calorifique du biogaz traité avant valorisation ;
- d'optimiser le rendement énergétique de la valorisation.

2.1.1 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.

2.1.2 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.

2.1.3 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.

2.1.4 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.

Vu les surcoûts générés par ce niveau d'épuration, cette solution est peu répandue.

2.1.5. La production combinée d'électricité et de chaleur par cogénération

Un système de cogénération est conçu pour produire à la fois de la chaleur et de l'électricité. L'électricité peut combler des charges électriques locales ou être envoyée sur le réseau électrique. Les équipements de production électrique sont habituellement activés par la combustion de pétrole, de gaz naturel ou de biomasse. Une partie de la chaleur de combustion qui n'a pu être convertie en électricité peut être récupérée pour répondre aux besoins de charges thermiques locales : chauffage de bâtiments ou procédé industriel. Sinon, cette chaleur devrait être évacuée sans être utilisée. (Retscreen International, 2005)

La cogénération a bien des attraits autres que la simple fourniture d'électricité et de chaleur : il s'agit d'un des moyens les plus efficaces de produire de l'électricité tout en réduisant les émissions polluantes et la production de déchets. La production thermique d'électricité n'est pas très efficace si on ne récupère pas les rejets thermiques de la centrale électrique. En récupérant ceux-ci, on augmente le rendement global de la centrale, en obtenant plus d'énergie utile par unité de combustible brûlé. On comble donc plus de besoins en rejetant moins de chaleur, moins de gaz à effet de serre et moins de polluants.

Une centrale à cogénération peut alimenter un réseau de chauffage urbain en eau chaude ou en vapeur. De tels réseaux peuvent aussi servir à la distribution d'eau glacée à des immeubles d'un même quartier. Des installations de ce type permettent d'offrir de meilleurs rendements qu'un ensemble d'installations individuelles de chauffage.

▪ Intérêt des systèmes de cogénération

À la base, la production d'électricité ne permet de convertir qu'une faible partie du contenu énergétique d'un combustible : la moitié, voire les 2/3 de l'énergie du combustible, est rejetée sous forme de chaleur et n'a pas pu être convertie en énergie mécanique. Le principal intérêt d'une centrale à cogénération est de pouvoir la localiser proche d'une charge thermique qui pourra bénéficier de ces rejets de chaleur. Au lieu de n'utiliser que de 25 à 55 % du contenu énergétique du combustible, on bénéficiera de 60 à 90 % de cette énergie primaire, selon les équipements et les applications.

▪ Description de la cogénération : équipements et technologies

Comme le principe de base d'une centrale à cogénération est la valorisation énergétique des rejets thermiques des équipements de production d'électricité, il faut commencer par s'assurer que ceux-ci rejettent de la chaleur à une température assez élevée pour qu'elle puisse être utilisée. La plupart des génératrices électriques d'une centrale à cogénération utilisent une

turbine à gaz, une turbine à vapeur ou un moteur à pistons. Des technologies émergentes comme les piles à combustible peuvent également être rencontrées.

Une turbine à gaz ressemble au moteur d'un avion à réaction : on comprime un certain flux d'air d'admission. Un apport de chaleur se réalise dans la chambre de combustion de gaz ou de pétrole, créant une forte augmentation de pression. Cette pression permet de faire tourner à haute vitesse les pales de la turbine à réaction, qui à son tour fait tourner une génératrice électrique.

Une turbine à vapeur utilise de la vapeur d'eau à haute pression, produite généralement par une chaudière qui transforme l'eau en vapeur à partir de la chaleur de combustion de n'importe quel combustible.

Il est possible de faire travailler en série une turbine à gaz et une turbine à vapeur dans une installation dite « à cycle combiné ». Les gaz de combustion de la turbine à gaz sont assez chauds pour produire de la vapeur qui alimente la turbine à vapeur. Une telle installation permet de convertir jusqu'à 55 % de l'énergie primaire en électricité et il s'agit d'un des moyens les plus efficaces de production thermique d'électricité.

▪ **Applications de la cogénération**

La gamme de puissance des centrales à cogénération est très étendue. Cela commence par de petits systèmes alimentant un seul bâtiment. Des installations plus importantes sont réalisées dans des complexes industriels ou immobiliers. De très grandes centrales à cogénération peuvent être implantées proches d'importants besoins d'énergie thermique, comme un site industriel, ou un réseau de chauffage urbain d'envergure.

2.2. Digestat

2.2.1. 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 ($N-NH_4$), directement assimilable par les cultures. (Martel et al., 2013)

2.2.2. 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)

2.2.3. Les avantages de l'utilisation du digestat

▪ Augmentation du potentiel de fertilisation

Pendant la biométhanisation, l'azote contenu dans le substrat subi une minéralisation. Une partie de l'ammonium (NH₄⁺) se transforme en ammoniac (NH₃). Aussi, l'ammoniac est plus volatil 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.

- meilleur utilisation de l'azote la première année mais moins d'effet résiduel par la suite.
- meilleur 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.

2.2.4. 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)

DEUXIEME PARTIE :

PARTIE EXPERIMENTALE

3. Origine et caractérisation des substrats

3.1. Echantillonnage des déchets

3.1.1. Choix et collecte d'échantillons de déjections animales

Les substrats utilisés dans cette étude proviennent d'une exploitation d'élevage située dans la wilaya de Blida située, à 50 km, au sud d'Alger. Cette exploitation dispose de vaches laitières, chevaux, moutons et volailles, élevées séparément dans des espaces aménagés. Les vaches sont élevées dans des étables, les brebis dans la bergerie, les chevaux dans des box séparés. Quant aux volailles, elles sont élevées au sol, sur une litière paillée.

Les substrats du fumier de vaches, chevaux, moutons et volailles ont été prélevés sur des déchets frais 24h avant leur transfert vers le laboratoire de la ferme expérimentale La Bouzule, Nancy, en France. Le transfert a été effectué par voie aérienne, où ils ont été stockés à 0°C dans des réservoirs de 10 L. Une fois en France, nous les avons déplacés dans le congélateur du laboratoire pour éviter la décomposition biologique.

3.1.2. Choix et collecte d'inoculum

L'inoculum, 60% lisier et 40% fumier a été prélevé dans le digesteur de la ferme expérimentale La Bouzule (France) où nous avons réalisés nos tests de bio-méthanisation (Voir Annexe 02, figure 17)

Avec une structure en béton armé, semi enterrée, équipée d'un agitateur et couverte par une bâche, le digesteur de la Bouzule a une capacité de 450 m³ (Voir Annexe 02, figure 18).

3.2. Caractérisation des substrats

3.2.1. Analyses de matière sèche

La détermination du taux de matière sèche (MS) est effectuée, selon la norme NF ISO 11465 (1994). (NF-ISO-11465, 1994) Entre 45 et 55 g de masse brute (MB) de chacun des échantillons ont été prélevés et mis à l'étuve à 105 °C pendant 24 h. Les taux de matières sèches (MS) respectifs sont obtenus par pesées successives des échantillons, avant et après séchage à l'étuve (Tableau 01).

Tableau 01 : Taux de matières sèches des substrats étudiés

Echantillons de fumier	m ₁ (g)	m ₂ (g)	Matière sèche (%)
Bovins	53,68	9,89	18
Chevaux	52,62	17,93	34
Moutons	45,47	18,19	40
Volailles	47,63	10,69	22

m₁ : masse initiale avant séchage ; m₂ : masse de l'échantillon après séchage

Le pourcentage de MS varie remarquablement d'un fumier à l'autre (tableau 1). Le fumier provenant de l'élevage de vaches est le plus humide (18% MS), ceci est lié à la fois à la physiologie de la régulation hydrique de cette espèce, au régime alimentaire distribué - fourrage vert et d'aliment concentré- très digeste et au paillage très réduit de leur aire de couchage. Le pourcentage enregistré chez les volailles est proche de celui des vaches (22% MS) ; les raisons sont semblables à celles avancées pour les vaches. Les taux nettement plus élevés enregistrés chez les chevaux et les moutons, respectivement 34% MS et 40%MS sont dus également à la physiologie de ces deux espèces (crottin et fèces plus secs), au paillage plus important chez les chevaux et à l'affouragement des moutons à l'intérieur de l'aire d'élevage.

3.2.2. Analyses de matière organique

Les taux de matière volatile (MV) ou matière organique des échantillons sont mesurés en se référant à la procédure NF U 44 160 (1985). (NF-U-44-160, 1985) Les échantillons préalablement séchés sont calcinés dans un four à moufle à 550 °C, pendant 4 h. La perte de masse, rapportée à la quantité de matière sèche, correspond au taux de matière volatile (Tableau 02).

Tableau 02 : Taux de matières organiques des substrats étudiés

Echantillons de fumier	m ₁ (g)	m ₂ (g)	Matière organique (g)	Matière organique (%)
Bovins	9,19	1,31	7,88	85
Chevaux	10,60	2,49	8,11	76
Moutons	10,68	1,45	9,23	86
Volailles	10,27	2,32	7,95	77

m₁ : masse préalablement séché ; m₂ : masse de l'échantillon après 4h dans le four

Une nette différence apparaît entre le pourcentage de MO du fumier des monogastriques (cheval : 76% MO ; volaille : 77% MO) et celui des ruminants (vache : 85% MO ; mouton : 86% MO). Le taux relativement bas enregistré chez le cheval et la volaille est probablement lié à leur physiologie. En effet, la digestibilité de la MO est nettement meilleure chez les monogastriques par rapport aux ruminants.

4. Etude du potentiel biométhanogène

4.1. Généralités

La méthanisation est un procédé en plein essor, en particulier dans le monde agricole. Ce processus permet de valoriser les effluents d'élevage et de réduire les volumes de déchets organiques tout en produisant une énergie renouvelable.

Le choix des matières organiques et donc la détermination du potentiel méthanogène des substrats sont des éléments centraux et incontournables pour toute réflexion autour des procédés de méthanisation. En effet, la qualité et de l'accessibilité de la matière organique détermine le rendement en méthane ce qui permet un meilleur dimensionnement de l'unité de méthanisation et d'assurer un bon fonctionnement du méthaniseur. Une alimentation non équilibrée et mal gérée du méthaniseur peut avoir pour conséquence un dysfonctionnement des bactéries voire la mort de celle-ci par acidose. Une fois un digesteur en acidose, il ne peut pas être relancé sans une vidange complète et un redémarrage progressif. De plus, le développement de la co-digestion entraîne l'utilisation de substrats organiques de plus en plus variés. La détermination du pouvoir méthanogène des substrats est donc un point clé qu'il est nécessaire de maîtriser.

4.2. Objectif et mode opératoire

Les tests BMP (*Biochemical Methane Potential*) sont destinés à mesurer le potentiel méthanogène des effluents d'élevage. Le potentiel méthanogène est le volume de méthane produit lors de la dégradation anaérobie en présence de bactéries d'un échantillon initialement introduit, exprimé dans les Conditions Normales de Température et de Pression (CNTP).

Quatre types de fumier sont considérés : vaches, chevaux, moutons et volailles. Pour chaque type de substrat, 6 répétitions de brut ont été testées. De plus, 2 témoins négatifs (inoculum seulement) et 2 contrôles positifs (inoculum + cellulose) ont été également testés, soit un total de 28 échantillons qui ont été mis dans des bouteilles (Voir Annexe 02, figure 19)

L'inoculum, utilisé pour les besoins de cette étude, a été tamisé avec un tamis à mailles carrées de 5 mm d'ouverture afin de le rendre plus homogène et pauvre en matière organique. 215 g de cet inoculum ont été introduits dans chaque bouteille. Avant chaque utilisation, il a été épuisé et dégazé à 37,5 ° C pendant 1 semaine pour minimiser la dégradation de la matière organique par les bactéries du digesteur. (Verein, 2006 ; Detec, 2011) Après 7 jours, 500 mL d'eau distillée et les quantités adéquates de substrats correspondant à 3 g de matière organique sont ajoutés dans chaque bouteille (Tableau 03).

Tableau 03 : Masses sèches et brutes des substrats étudiés correspondant à 3 g de MO

Echantillons de fumier	% MO (/MS)	MS à insérer (g)	% MS (/MB)	MB à insérer (g)
Bovins	85	3,53	18	19,61
Chevaux	76	3,95	34	11,61
Moutons	86	3,49	40	8,73
Volailles	77	3,90	22	17,73

Avant de placer les bouteilles dans l'étuve (Mettmert UFE 700) à 37,5°C, le pH a été mesuré (Mettler Toledo fe20/el20 five easy). (Voir Annexe 02, figure 20)

Les gaz produits ont été mesurés quotidiennement (figure 09) à l'aide d'un compteur de gaz à tambour (Ritter type TG05 modèle 5-8) et leur teneur en méthane a été déterminée en utilisant un analyseur CH4. (Voir Annexe 02, figure 21)

Lorsque les volumes de gaz commencent à diminuer, les mesures sont effectuées tous les deux ou trois jours. Les mesures prennent fin lorsque les substrats produisent approximativement le même volume de gaz que le témoin négatif. En général, les substrats de fumier cessent de produire du biogaz entre 3 et 5 semaines. Dans notre cas, les mesures ont été arrêtées après 29 jours (4 semaines). A la fin de l'expérience, le pH doit être de nouveau mesuré afin de vérifier l'absence d'acidogénèse durant la manipulation. Les valeurs du pH doivent être comprises entre 6,5 et 7,5.



Figure 09: Dispositif expérimental des tests BMP au laboratoire de la ferme

4.3. Mesures de pH

Le pH a été mesuré au début et à la fin de l'expérience (Tableau 04). Nous remarquons que les valeurs sont bien comprises entre 6,5 et 7,5 et donc l'absence d'acidogénèse a bien été vérifiée durant toute la durée de la manipulation.

Tableau 04 : Valeurs du pH avant et après manipulation

Echantillons de fumier	pH avant manipulation	pH après manipulation
Bovins	7,75 ± 0,03	7,02 ± 0,02
Chevaux	7,83 ± 0,04	7,01 ± 0,02
Moutons	7,78 ± 0,04	7,03 ± 0,01
Volailles	7,77 ± 0,04	7,03 ± 0,01

4.4. Evaluation du biogaz produit

4.4.1. Evaluation du volume cumulé de biogaz produit

La figure 10 illustre les résultats des essais BMP relatifs à la production de biogaz pour 3g de MO durant les 29 jours d'expériences incluant la production du témoin négatif. Nous remarquons que le volume de biogaz cumulé augmente avec le temps jusqu'à atteindre un palier de production assez stable vers le 21ème jour (504 h). Nous remarquons, aussi, que le témoin négatif à lui seul atteint les 810 ml au bout du 29ème jour (697h). Le témoin positif (la cellulose) quant à lui atteint les 2550 ml le même jour. Les productions obtenues pour le fumier de vache, volaille, mouton et cheval sont respectivement 2093, 2030, 1811 et 1772 ml.

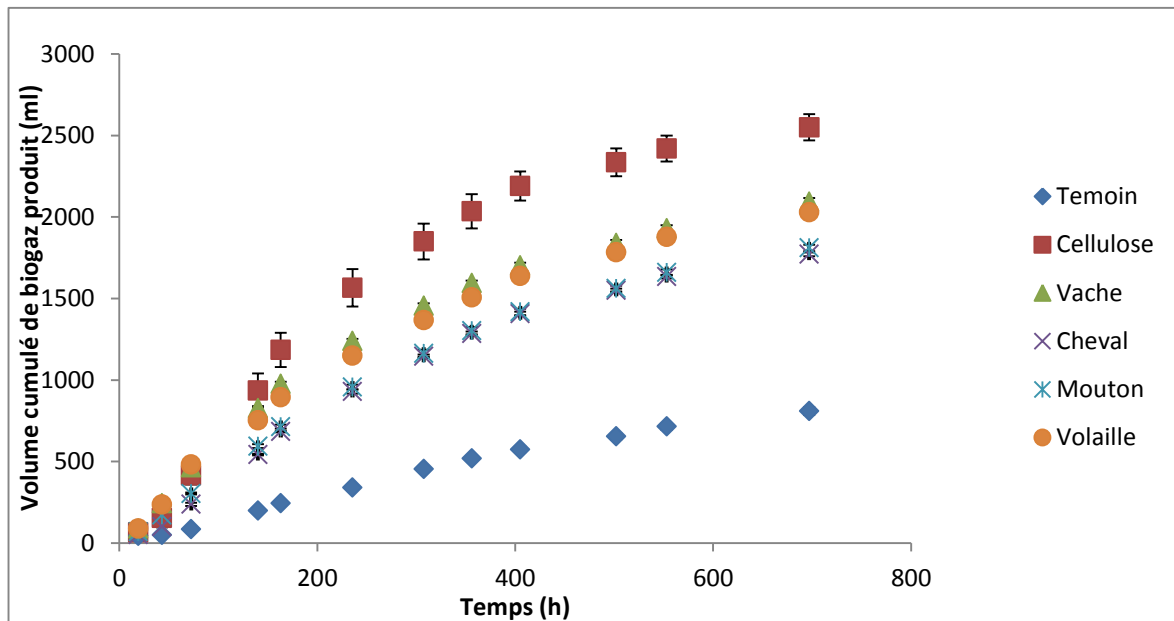


Figure 10 : Production de biogaz pour 3g de MO à partir des substrats étudiés

4.4.2. Evaluation du biogaz produit/ kg MO

La figure 11 représente l'évolution de la production de biogaz par Kg MO en fonction du temps. Les résultats de cette production sont obtenus à partir des valeurs de la figure 2 en tranchant le volume cumulé du témoin négatif et en divisant par 3. Nous remarquons qu'à la fin des expériences (697h), le témoin positif (la cellulose) atteint une production de biogaz de 580 L/kg MO. Les concentrations les plus élevées de biogaz/kg MO sont obtenues dans le cas du fumier de vaches et de volailles avec 428 L et 407 L respectivement au 29e jour. Dans le cas du fumier de moutons et de chevaux, les moyennes des productions cumulées atteignent 334 et 321 L/kg MO respectivement. Nous remarquons qu'elles ne sont pas proportionnelles au taux de matière organique dans les substrats (85 et 77% chez les vaches et volailles) et (86 et 76% chez les moutons et chevaux).

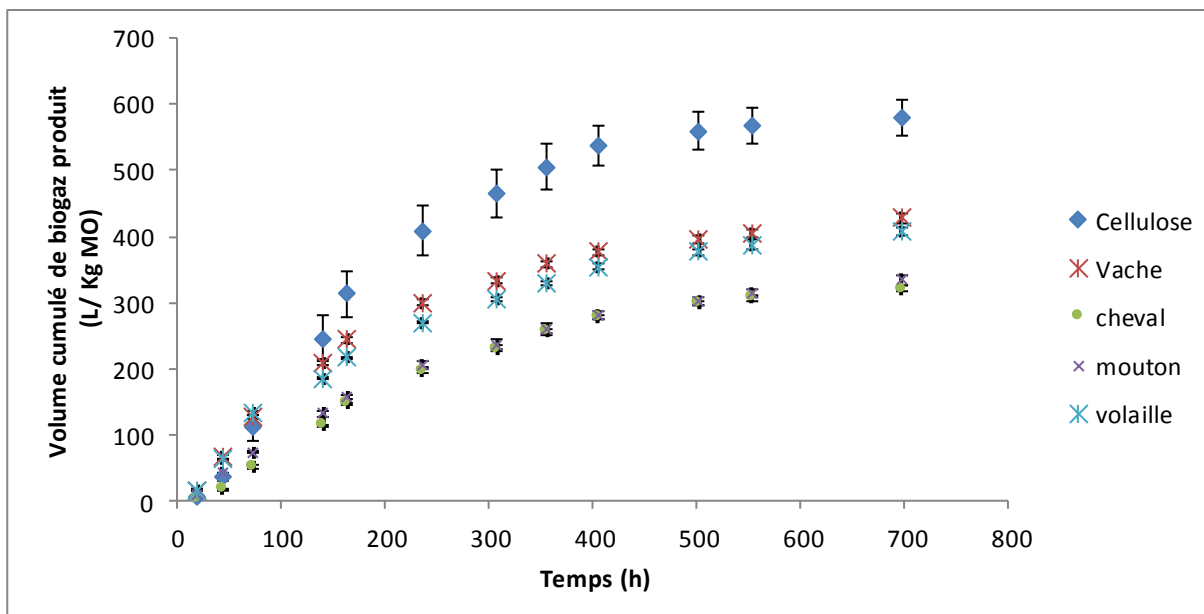


Figure 11 : Evolution de la production de biogaz/ kg MO à partir des substrats étudiés

4.4.3. Evaluation du biogaz produit/ kg MB

La figure 12 illustre l'évolution de production de biogaz par kg MB en fonction du temps. Les concentrations de biogaz /kg MB obtenues pour le fumier de vaches, volailles, chevaux et moutons sont respectivement 67, 69, 83 et 115 L. Elles sont proportionnelles au taux de matière sèche dans le substrat (18, 22, 34 et 40% respectivement).

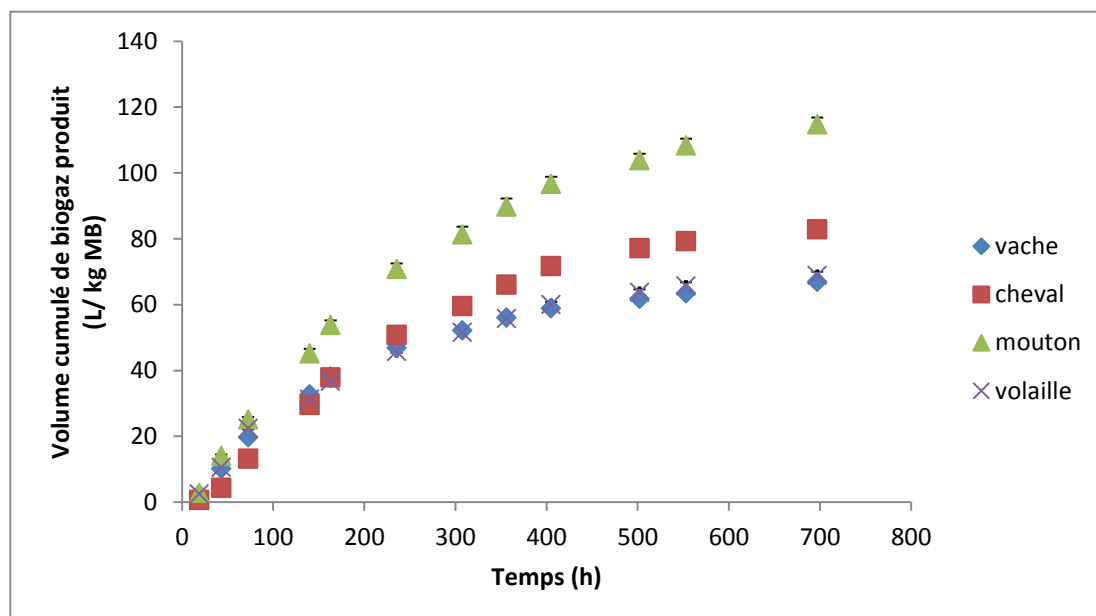


Figure 12 : Evolution de la production de biogaz/ kg MB à partir des substrats étudiés

4.5. Evaluation du volume cumulé de CH₄ produit

4.5.1. Pourcentages en méthane des différents substrats

La figure 13 représente les pourcentages en méthane des différents substrats étudiés déterminés lors des expériences en utilisant l'analyseur CH₄. Ces derniers varient entre 60 et 65%. En effet, celui du fumier de vaches et de volailles est de 65%, suivi par celui des moutons 63%, chevaux 62% et la cellulose 61%.

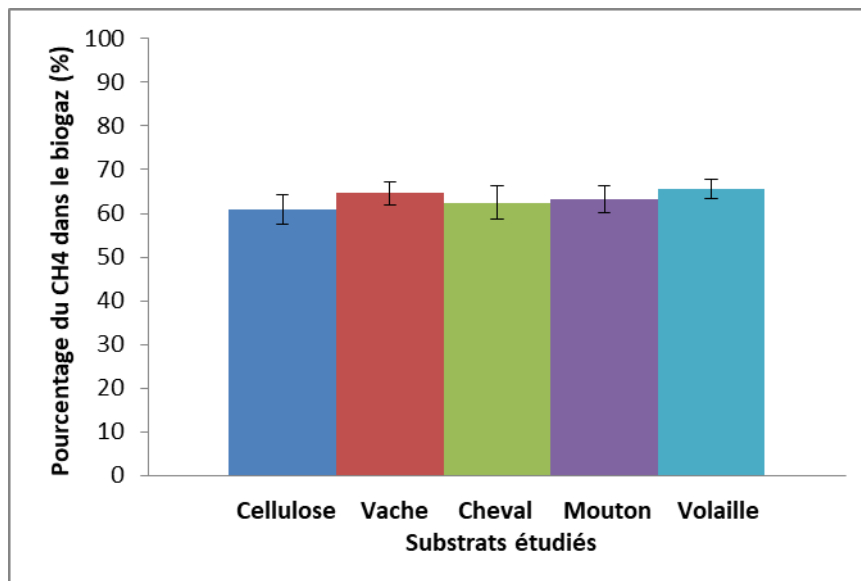


Figure 13 : Pourcentages en méthane des différents substrats étudiés

4.5.2. Evaluation du CH₄ produit/ kg MO

La figure 14 représente l'évolution de la production de CH₄ par Kg MO en fonction du temps. Tout comme le biogaz, le volume de CH₄ cumulé augmente avec le temps jusqu'à atteindre un palier de production assez stable vers le 21^{ème} jour (504 h). Nous remarquons qu'à la fin des expériences (697h), la cellulose atteint une production de CH₄ de 349 L/kg MO. Les concentrations les plus élevées de CH₄/kg MO sont obtenues dans le cas du fumier de vaches et de volailles avec 281 L et 276 L respectivement au 29^e jour. Dans le cas du fumier de moutons et de chevaux, les moyennes des productions cumulées de CH₄ atteignent 218 et 211 L/kg MO respectivement.

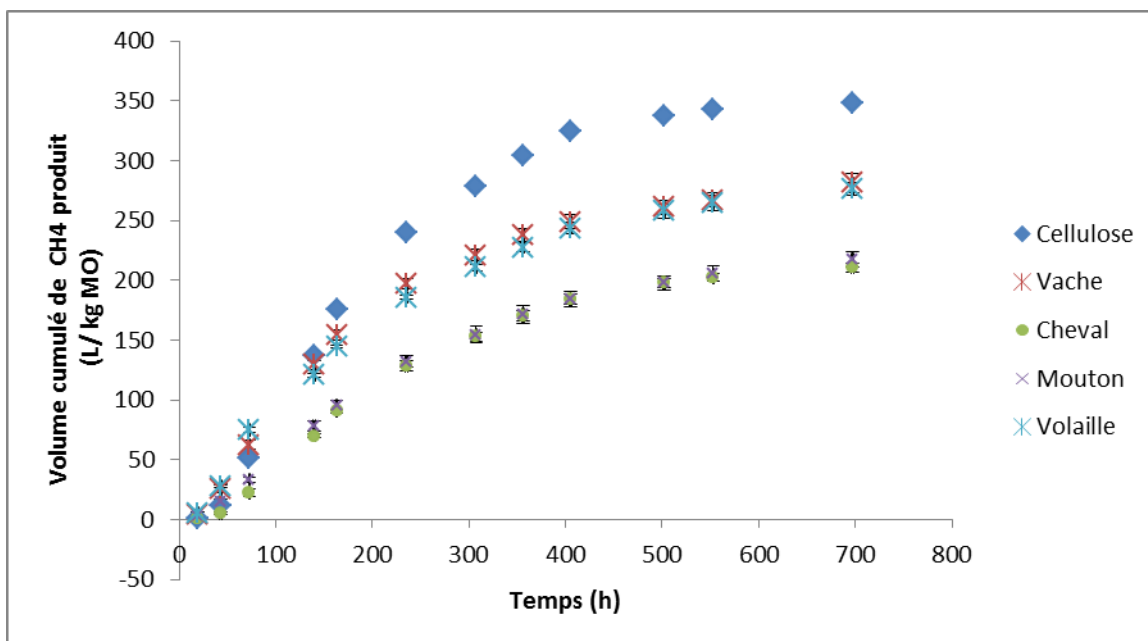


Figure 14 : Evolution de la production de CH₄/ kg MO à partir des substrats étudiés

4.5.3. Evaluation du CH₄ produit/ kg MB

La figure 15 illustre l'évolution de la production de CH₄ par Kg MB en fonction du temps. Les concentrations de CH₄ /kg MB obtenues pour le fumier de vaches, volailles, chevaux et moutons sont respectivement 44, 47, 54 et 75 L. Elles sont proportionnelles au taux de matière sèche dans le substrat (18, 22, 34 et 40% respectivement).

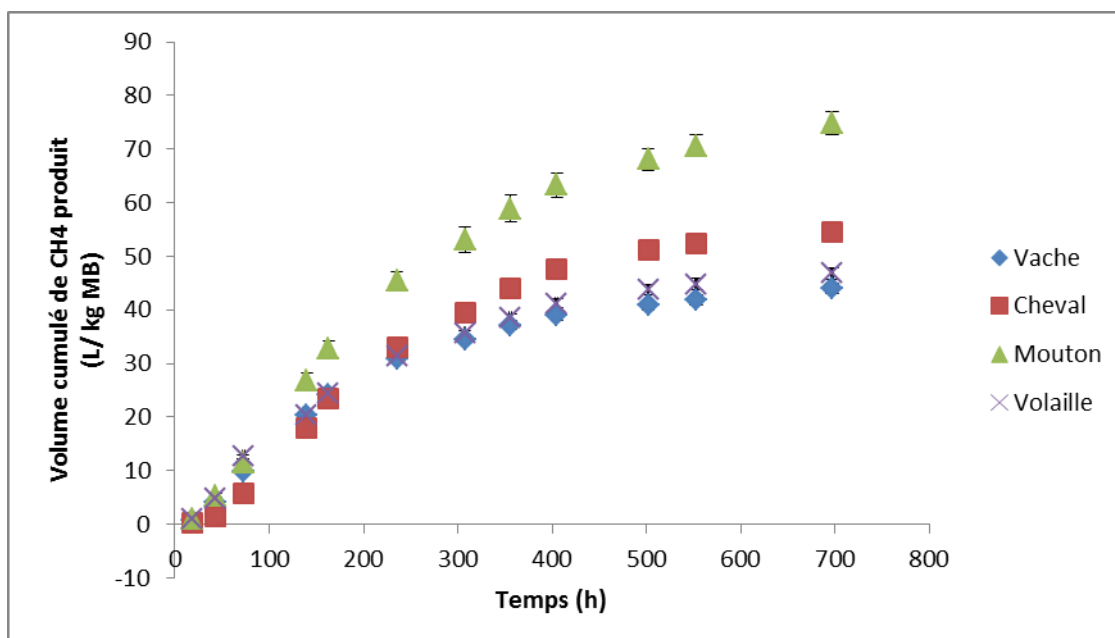


Figure 15 : Evolution de la production de CH₄/ kg MB à partir des substrats étudiés

4.6. Comparaison des potentiels méthanogènes des différents substrats

4.6.1. Synthèse des résultats

Le tableau 05 représente une synthèse des résultats trouvés lors des essais *BMP* au laboratoire. Nous constatons clairement que les fumiers de vaches et de volailles sont plus productifs en termes de matière organique. Par contre, en termes de matière brute (matière fraîche), les concentrations en biogaz et CH₄ les plus élevées sont obtenues par les fumiers de chevaux et de moutons, en raison de leur taux élevé de matière sèche (34 et 40% respectivement).

Tableau 05 : Volumes de biogaz et de CH₄ produits en L/kg MO et /kg MB

Type de fumier	MS (%)	MO (%)	Biogaz/kgMO	Biogaz/kgMB	CH ₄ (%)	CH ₄ /kgMO	CH ₄ /kgMB
Vaches	18	85	428 ±8	67 ±1	65 ±3	281 ±5	44 ±2
Volailles	22	77	407 ±6	69 ±1	65 ±2	276 ±6	47 ±2
Chevaux	34	76	321 ±4	83 ±1	62 ±4	211 ±4	54 ±2
Moutons	40	86	334 ±6	115 ±2	63 ±3	218 ±4	75 ±3

4.6.2. Discussion des résultats

Dans la littérature, les résultats peuvent varier d'une source à une autre et d'une espèce à une autre. Ainsi, selon Lacour (2012), la fiente de poulet produit 360 L de CH₄/kg MO ; quant à Babae et al. (2013), il rapporte une production de 270 L de CH₄/kg MO par le fumier de volaille. Jain et al. (1981), enregistrent une production de 140 L de CH₄/kg MO par le fumier de vaches et de 100 L de CH₄/kg MO par celui du mouton.

Pour faire une analyse complète d'une ration issue d'élevage, il faut tenir compte de la production en matière brute car c'est l'usage qui va en être fait par l'exploitant agricole. Par conséquent, en termes de matière brute, les productions en biogaz et CH₄ les plus élevées sont obtenues par les fumiers de moutons et de chevaux en raison de leur taux élevé de matière sèche (40 et 34% respectivement). En effet, ces productions sont proportionnelles aux taux de matière sèche (Tableau 05).

Par contre, nous remarquons qu'en termes de matière organique, les productions en biogaz et CH₄ ne sont pas proportionnelles au taux de matière organique. En effet, il y'a plus de MO chez la vache et le mouton alors qu'en production de CH₄/kg MO, la vache produit beaucoup plus que le mouton. Cela veut dire, que même si le taux de MO est le même, la qualité de

cette MO (sa capacité à se dégrader) semble avoir un impact sur les valeurs de CH₄ où elle est manifestement différente. Elle est meilleure chez la vache et la volaille que chez le mouton. Ceci est dû à différents facteurs : particularités anatomiques et digestives de l'animal, influence de la nature du régime alimentaire, influence des quantités ingérées, variation entre animaux qui est liée à des différences de profil microbien portant à la fois sur la composition de la biocénose et son activité métabolique.

TROISIEME PARTIE :

ETUDE PROSPECTIVE : VALORISATION DES
EFLUENTS D'ELEVAGE EN ALGERIE

5. Données du cheptel et répartition des élevages

5.1. Caractéristiques des élevages en Algérie

L'Algérie connaît une croissance démographique élevée ce qui entraîne une augmentation importante de la demande en produits alimentaires, mais la production agricole n'a pas suivi le même rythme (Madani et Mouffok, 2008).

Des contraintes géographiques et climatiques qui pèsent sur le pays constituent un obstacle pour le secteur des productions animales, qui n'arrive pas encore à subvenir à la croissance des besoins nationaux en produits d'origine animale. Les principales contraintes qui constituent un frein au développement du secteur agricole en général et de l'élevage en particulier sont les conditions climatiques défavorables, les ressources en eau peu mobilisables et l'existence de zones agro-écologiques très contrastées. (Bekhouche, 2011)

Pour pallier ces déficits, le secteur agricole a été l'objet de nombreuses initiatives visant à développer, moderniser et relancer l'agriculture. Les pouvoirs publics ont initié en Septembre 2000 un programme d'appui pour la relance du secteur agricole, un programme nommé le Plan National de Développement Agricole (PNDA) qui a été élargi à une dimension rurale en 2002 pour devenir le Plan National du Développement Agricole et Rural (PNDAR). L'objectif visé à travers ce programme est de dynamiser l'économie et de mettre en place un processus de développement nécessaire pour adapter l'agriculture à un environnement national en évolution constante. (Bekhouche, 2011)

5.2. Données du cheptel

En 2014, le MADR (Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural), a estimé les effectifs du gros bétail à 2 millions têtes de bovin, 27 millions d'ovins et 30 000 chevaux ; ceux de l'espèce avicole sont estimés à 239 millions. (Voir Annexe 01 ; tableaux 12,13 et 14)

En raison du très faible effectif de chevaux, cette espèce ne sera pas incluse dans notre étude prospective.

5.3. Répartition des élevages en Algérie

5.3.1. L'élevage bovin

Avec un effectif bovin total d'environ 2 049 652 têtes (MADR, 2014), cet élevage joue un rôle important dans l'économie agricole algérienne. Il contribue à 30% à la couverture des besoins nationaux en protéines animales mais aussi à la création d'emplois en milieu rural.

L'élevage bovin est concentré dans les zones les plus favorables à cet élevage, à savoir le nord du pays et particulièrement le nord-est comme le montre la figure 16. Le cheptel est constitué de vaches de race locale, de races laitières importées (Prim Holstein, Brune des Alpes, Normande, Montbéliarde...) et de croisées (Locale X importées). (MATE-GEF/PNUD, 1997)

Les races locales et les races croisées qui constituent la majorité du cheptel national sont élevées en effectif réduit et leur alimentation est basée sur les parcours. L'élevage du bovin local est noté « Bovin laitier local : BLL en abrégé » et celui des races croisées « Bovin laitier amélioré : BLA ».

Les races importées sont conduites intensivement ; les animaux sont casés en étables et nourris à l'auge. Ce type d'élevage est défini sous le vocable « Bovin laitier moderne : BLM ».

Le bovin laitier local « BLL »

Le bovin laitier local appartiendrait à un seul groupe dénommé la Brune de l'Atlas, dont l'ancêtre serait le *Bos mauritanicus* ; cette race a subi des modifications suivant le milieu dans lequel elle vit et a donné naissance à des rameaux tels que la Guelmoise, la Cheurfa, la Sétifiene et la Chélifiene (Yakhlef et al., 2002).

Le bovin local est connu pour sa rusticité, en résistant à des conditions climatiques difficiles, en s'alimentant avec des aliments médiocres, ce qui fait qu'il est peu productif : 3 à 4 litres par jour pendant 6 mois (Yakhlef et al., 2002). Sa faible production de lait fait que cette dernière est surtout destinée à l'alimentation des jeunes animaux.

De ce fait, c'est une population qui est beaucoup plus orientée vers la production de viande.

Le Bovin importé dit bovin laitier moderne « BLM »

Hautement productif, il est conduit en intensif, dans les zones à fort potentiel de production fourragère, au niveau des plaines et des périmètres irrigués autour des villes, avec 328 901 vaches laitières (MADR, 2014). Il est introduit principalement à partir d'Europe et comprend essentiellement les races Holstein, Frisonne Pie Noire, Montbéliarde, Pie Rouge de l'Est, et Tarentaise.

Ce cheptel représente 10 % de l'effectif bovin national et assure près de 40% de la production totale de lait de vache ; il est détenu pour sa majorité par le secteur public et spécialisé principalement dans la production laitière (Bencharif, 2001).

Le Bovin laitier amélioré « BLA »

C'est un ensemble constitué de croisements (non contrôlés) entre la race locale « Brune de l'Atlas » et des races introduites ; localisé dans les collines et les zones de montagne, il est pratiqué par le secteur privé assurant 40% de la production nationale (Bencharif, 2001).

Son alimentation est constituée par le pâturage d'herbe de prairies avec un complément de paille.

Selon les disponibilités en facteurs de production, la conduite des animaux, les niveaux d'utilisation des intrants, la localisation géographique et les objectifs de production, plusieurs modes ou systèmes d'élevage bovins existent.

L'intensification est généralement liée à la disponibilité en facteurs de production et au type de matériel animal exploité, mais reste largement indépendante des niveaux de production. On distingue :

Système dit "extensif ":

Le bovin conduit en extensif, est localisé dans les régions montagneuses et son alimentation est basée sur le pâturage. Ce système de production bovine en extensif occupe une place importante dans l'économie familiale et nationale.

Cet élevage est basé sur un système traditionnel de transhumance entre les parcours d'altitude et les zones de plaines. Il concerne les races locales et les races croisées et correspond à la majorité du cheptel national. Le système extensif est orienté vers la production de viande. Il concerne les races locales et les races améliorées.

Dans la zone littorale et la zone tellienne du nord, on distingue :

Système dit "semi intensif" :

Ce système est localisé dans l'Est et le Centre du pays, dans les régions de piémonts. Il concerne le bovin croisé (local avec importé). Ces élevages sont familiaux, avec des troupeaux de petite taille. La majeure partie de leur alimentation est issue des pâturages sur jachère, des parcours et des résidus de récoltes et comme compléments, du foin, de la paille et du concentré. Le recours aux soins et aux produits vétérinaires est assez rare.

Système dit "intensif" :

Le système intensif, dont l'ancien système public est aujourd'hui représenté par les EAI et EAC et par les fermes pilotes. Ce système détient les meilleures terres des zones littorales et telliennes nord, qui jouissent d'une pluviosité importante, avec une taille moyenne qui peut aller jusqu'à 50 têtes. L'intensif privé s'est « développé dans les zones irrigables autour des agglomérations de moyenne et de grande importance », avec une taille moyenne de 5 à 6 têtes. Ce système, constitué principalement de races modernes et améliorées.

A partir de là, on peut constater que le fumier qu'on peut éventuellement récupérer est celui du bovin moderne car son système d'élevage est intensif (étables) contrairement à celui du local et croisé qui est extensif (un système traditionnel de transhumance entre les parcours d'altitude et les zones de plaines ou les vaches sont en déplacement en permanence).

La spécialisation en élevage bovin dans le contexte algérien est peu pratiquée et la production mixte (lait – viande) domine les systèmes de production. Cette diversité des produits bovins

favorise la diversité des revenus et par conséquent la durabilité des systèmes de production. A l'exception des ateliers engraisseurs pratiquant uniquement la finition des taurillons, la majorité des systèmes est mixte.

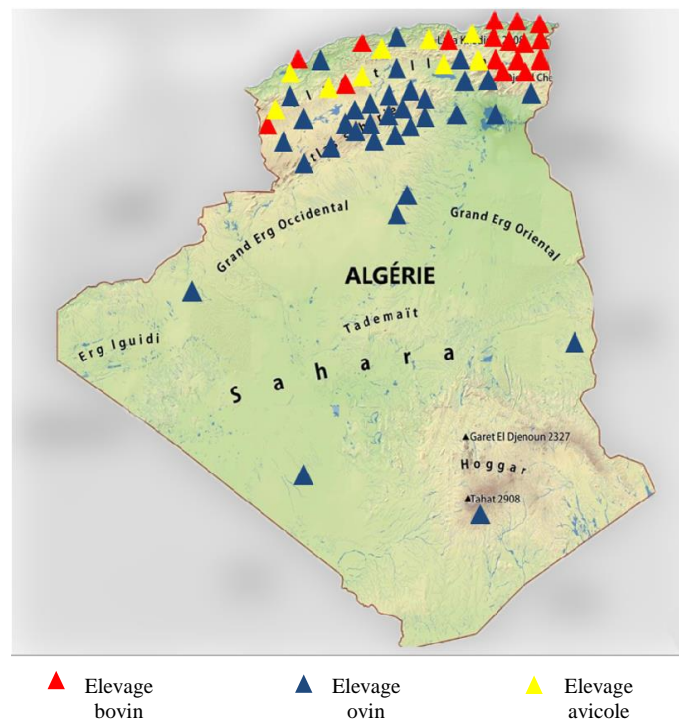


Figure 16 : Répartition des élevages bovin, ovin et avicole en Algérie (MADR, 2016)

En Algérie, la composition du cheptel a fortement évolué avec l'introduction des races Pie-Noire, Pie Rouge et Tarentaise. Les croisements souvent anarchiques et l'insémination artificielle à base de semences importées ont fortement réduit la sauvegarde de la race locale. A côté d'un élevage relativement intensif limité à certaines zones du littoral, l'élevage bovin laitier reste en grande partie conduit en extensif et demeure peu productif, ce qui explique sa faible contribution au fonctionnement économique (il n'arrive à couvrir qu'environ 40% des besoins en lait et dérivés d'où une industrie qui fonctionne essentiellement sur la base de matières premières importées) et environnementale (difficulté de récupération du fumier pour sa valorisation en produisant du biogaz et du digestat).

Pour cela, l'intensification des systèmes d'élevages apparaît comme un objectif incontournable.

5.3.2. L'élevage ovin

Avec un effectif estimé à 27 807 734 de têtes, le cheptel ovin occupe une place importante dans l'économie nationale (Statistiques agricoles, MADR, 2014).

Les ovins constituent une activité à travers des systèmes de production souvent basés sur l'association polyculture- élevage (Yakhlef et al., 2002).

La race Ouled Djellal représente 50% de l'effectif national ; elle est suivie par la race Hamra (30%) et la race Rembi (20%).

Les ovins sont répartis sur toute la partie nord du pays avec une forte concentration dans la steppe (entre les isohyètes de 400 et 100 mm de pluie) et les hautes plaines semi-arides céréalières (80% de l'effectif total). Il existe tout de même des populations dans les régions telliennes et au Sahara qui exploitent les ressources des oasis et des parcours sahariens mais la taille des troupeaux est très réduite (Yakhlef et al., 2002).

La population steppique, composée essentiellement de pasteurs pratique le nomadisme (déplacements perpétuels de l'ensemble de la famille) et la transhumance (déplacements du berger et de son troupeau à des périodes précises de l'année). Ce sont des formes sociales d'adaptation à ces milieux arides qui permettent de maintenir l'équilibre de l'écosystème et de survivre aux crises écologiques dues à des sécheresses cycliques (Nedjraoui, 2001).

Sur les hautes plaines, l'alimentation est basée sur les jachères et les sous-produits de la céréaliculture (chaumes et paille) et sur les parcours en zone steppique. Le système alimentaire adopté étant des déplacements presque permanents, la récupération des déjections ne peut être envisagée. Par contre, dans les centres d'engraissements, une bonne partie des déjections peut être récupérée.

5.3.3. L'élevage avicole

Au début des années 80 l'état a mis en œuvre un important programme de développement du secteur avicole, basé sur l'élevage intensif de souches exotiques. Ces dernières (ISA, Tetra...) sont régulièrement importées puisqu'il n'y a pas de production de matériel génétique de base localement. La conduite de ces souches se fait en intensif avec une taille moyenne de 3000 à 5000 sujets par atelier respectivement pour le poulet de chair et les poules pondeuses. (Bekhouche, 2011)

Quant aux races locales, exclusivement exploitées dans les élevages traditionnels extensifs, elles sont très mal connues et sont regroupées sous l'appellation générique de populations.

L'élevage avicole est concentré dans le Nord du pays (figure 16), là où il y a une forte concentration humaine et là où le coût de production est moindre. Les animaux sont élevés en bâtiment : soit en batterie soit au sol. La poule pondeuse est généralement élevée en batterie, la dinde et le poulet de chair au sol. Leur alimentation est basée sur le maïs, soja et les compléments minéraux vitaminés.

A partir de là, la récupération des fientes est facile et pourrait être totale.

5.4. Utilisation des effluents d'élevage en Algérie

La valorisation des effluents d'élevage en Algérie se résume à l'utilisation en tant qu'amendements organiques (engrais de fond) qui visent à améliorer la structure physique du sol et ses propriétés chimiques de base alors qu'ailleurs dans le monde, ces derniers sont parfois utilisés dans des digesteurs de méthanisation afin de produire du biogaz. Les installations de biogaz représentent une solution intelligente et écologique à travers la valorisation des déchets d'élevage. Le gaz produit spontanément par la fermentation des rebuts agricoles et des déjections animales, au lieu d'être laissé s'échapper dans l'atmosphère, est capté à l'intérieur des cuves, dépuré, refroidi et utilisé pour la production d'énergie électrique. De plus, l'énergie thermique produite est utilisée pour le chauffage du digesteur et le digestat fournit un excellent fertilisant naturel. Ainsi, ce processus permet une réduction de la pollution de l'air et aussi des nappes aquifères. Le méthane, libéré dans l'atmosphère est un gaz à effet de serre 21 fois plus nocif que l'anhydride carbonique indispensable à la vie des plantes. Sans les installations de biogaz, les déchets organiques resteraient tels quels et leur potentiel serait dispersé dans la nature. Dans le but d'élargir la valorisation de nos effluents animaliers, une étude prospective sommaire a été menée afin d'évaluer le potentiel du biogaz et du CH₄, les puissances électriques et thermiques annuels qui pourraient être produits dans le but d'améliorer nos bilans énergétique et environnemental.

6. Scenarios pour la valorisation des effluents d'élevage

6.1. Construction des scénarios

Pour mener l'étude prospective de la valorisation du fumier des divers effluents d'élevage étudiés, différents scénarios ont été considérés en tenant compte des résultats trouvés lors des essais de méthanisation afin d'évaluer le potentiel du biogaz, du CH₄ et les puissances électriques et thermiques annuels qui pourraient être produits dans le but d'améliorer nos bilans énergétique et environnemental.

Pour établir le premier scénario, une extrapolation a été faite au niveau national concernant les espèces étudiées à partir des résultats trouvés expérimentalement pour un animal. L'hypothèse admise est que les animaux reçoivent la même alimentation quelle que soit leur localisation. Les vaches sont nourries à base de fourrage vert et d'aliment concentré. Les moutons reçoivent une ration composée de foin et d'aliment concentré. Les chevaux consomment de la paille et de l'orge. Quant aux volailles, elles sont nourries à base d'aliment concentré commercial (mélange de maïs, de soja, de son, d'orge, complément vitaminique et minéral). Ce scénario reste théorique car en pratique on ne peut atteindre la valorisation des 100 % des effluents d'élevage.

Pour évaluer les taux de récupération accessibles pour chaque fumier, plusieurs entretiens ont été menés avec des agronomes spécialistes dans l'élevage bovin, ovin et avicole afin d'établir un second scénario qui peut être mis en pratique en prenant en compte tous les paramètres nécessaires (modes d'élevage en Algérie, localisation des différentes espèces...etc).

Les informations relatives aux effectifs et à la composition des espèces étudiées (bovine, ovine, chevaline et avicole) proviennent des statistiques agricoles du *Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural* pour l'année 2014.

L'estimation des déjections du cheptel est établie sur la base des estimations faites au niveau d'une ferme pilote située dans la wilaya de Blida.

6.2. Evaluation des scénarios

A partir des entretiens réalisés avec des agronomes experts dans l'élevage bovin, ovin et avicole, deux scénarios ont été élaborés sur la base des possibilités de récupération du fumier,

- i) scénario 1 : théorique, relatif à la récupération totale du fumier des espèces étudiées,
- ii) scénario 2 : pratique, peut être mis en œuvre, avec 100% de fumier de volailles valorisables (ces dernières sont élevées en bâtiment), 90% de fumier de vaches laitières modernes (étant généralement sorties pendant une à deux heures par jour sur des aires d'exercice, les excréments et les urines produits pendant ce laps de temps ne sont pas récupérables (10%)) et 5 % des déjections de moutons (les seules déjections de moutons qui peuvent être récupérés sont ceux des centres d'engraissements. La majeure partie de cette espèce (95%) sont élevés sur des parcours).

6.2.1. Evaluation du potentiel de biogaz et de CH₄ selon les deux scénarios

6.2.1.1. Scénario 1 : (100% théorique)

Ce scénario reste théorique. Son intérêt est de connaître les potentiels du biogaz et du CH₄ maximaux pouvant être produits à partir des différents effluents d'élevage étudiés. Ce dernier ne peut pas être envisageable en pratique, car la récupération de la totalité des déjections est impossible en réalité à cause des systèmes d'élevage algériens. Le tableau 06 ci-dessous illustre les volumes de biogaz et de méthane pouvant être produits à partir du fumier des espèces ovine, bovine et avicole. Un volume total de 3077 et 2030 millions m³ de biogaz et de CH₄ respectivement peuvent être produits à partir des effluents d'élevage étudiés annuellement. Ces chiffres sont loin d'être réalisables sur le terrain. D'où l'élaboration d'un deuxième scénario envisageable avec des chiffres plus vraisemblables.

6.2.1.2. Scénario 2 : (5% ovin, 90% bovin, 100% avicole)

Les volumes de biogaz et de méthane pouvant être produits à partir du fumier des espèces ovine, bovine et avicole valorisables avec des pourcentages de récupération déduits des

systèmes d'élevage algériens sont représentés dans le tableau 06. Un volume total de 1120 et 754 millions m³ de biogaz et de CH₄ respectivement pourraient être produits annuellement à l'échelle nationale si les effluents d'élevage de diverses espèces sont valorisés.

Tableau 06 : Potentiel du biogaz et du CH₄ issu du fumier des substrats étudiés selon les deux scénarios

	Espèce ovine	Espèce bovine	Espèce	Avicole		Total
	Moutons	BLM	Poulets de chair	Poules pondeuses	Dinde	
Nombre (×10³)	17 155	328	211 618	27 472	5 336	
Déjections (kg/jour/tête)*	2,8	52	0,10	0,11	0,27	
Volume Biogaz (m³/tonne/tête)**	115	67	69	69	69	
Volume CH₄ (m³/tonne/tête)**	75	44	47	47	47	
		Scénario 1	(100%	théorique)		
Volume Biogaz total(×10⁶m³/an)	2 016	417	532	76	36	3 077
Volume CH₄ total(×10⁶m³/an)	1 315	275	363	52	25	2 030
		Scénario 2	(5% ovin	90% bovin	100% avicole)	
Volume Biogaz total(×10⁶m³/an)	101	375	532	76	36	1 120
Volume CH₄ total(×10⁶m³/an)	66	248	363	52	25	754

* Evalués au niveau de la ferme pilote de Blida

** Résultats expérimentaux obtenus à l'échelle laboratoire

6.2.2. Evaluation des puissances électriques et thermiques selon les deux scénarios

6.2.2.1. Bases de Calcul pour l'Evaluation de l'Energie Fournie par le Biogaz

L'énergie primaire produite annuellement par le biogaz se calcule à partir du PCI (Pouvoir Calorifique Inférieur) du méthane. (Couturier et al., 2001)

$$E_{tot} = PCI_{CH_4} \times V_{CH_4} \quad (1)$$

On admet 5% de pertes d'énergie afin d'être sûr que le moteur soit plutôt suralimenté que sous-alimenté. (Couturier et al., 2001) L'énergie valorisable par le moteur est donc la suivante :

$$E_{valo} = 0,95 \times E_{tot} \quad (2)$$

La puissance fournie par le biogaz se calcule à partir de l'énergie valorisable annuelle et les heures de fonctionnement d'un moteur de cogénération pendant l'année (8000 heures). (Haushalter, 2007)

$$Puissance = E_{t=1h} = E_{valo} / 8000 \quad (3)$$

La cogénération permet de valoriser 35 % de l'énergie primaire du biogaz sous forme d'électricité et environ 45% sous forme de chaleur (selon les caractéristiques du moteur).

$$E_{elect} = E_{valo} \times 0,35 \quad (4)$$

$$E_{therm} = E_{valo} \times 0,45 \quad (5)$$

6.2.2.2. Scénario 1 : (100% théorique)

Le tableau 07 ci-dessous illustre les puissances électriques et thermiques produites à partir du méthane issu du fumier des espèces ovine, bovine et avicole. Une puissance totale de 2397 MW peut être produite annuellement selon ce scénario avec 839 MW électriques et 1078 thermiques.

Ces chiffres sont loin d'être réalisables sur le terrain. D'où l'élaboration d'un deuxième scénario envisageable avec des chiffres plus ou moins possible à mettre en pratique.

6.2.2.3. Scénario 2 : (5% ovin, 90% bovin, 100% avicole)

Les puissances électriques et thermiques pouvant être produites à partir du fumier des espèces ovine, bovine et avicole valorisables avec des pourcentages de récupération déduits des systèmes d'élevage algériens sont représentés dans le tableau 07. Une puissance totale de 890 MW peut être produite annuellement selon ce scénario avec 312 MW électriques et 401 thermiques à l'échelle nationale si les effluents d'élevage de diverses espèces sont valorisés.

Tableau 07: Puissances électriques et thermiques produites à partir du méthane issu du fumier des substrats étudiés selon les deux scénarios

		Espèce ovine	Espèce bovine	Espèce	avicole	Total
		Moutons	BLM	Poulets de chair	Poules pondeuses	Dinde
			Scénario 1	(100%	théorique)	
Volume CH₄		1 315	275	363	52	25
total(×10⁶m³/an)						2 030
E_{tot} (GWh/an)		13 071	2 734	3 608	517	249
E_{valo} (GWh/an)		12 417	2 597	3 428	491	237
P_{tot} (MW)		1 552	325	429	61	30
P_{élect} (MW)		543	114	150	21	11
P_{therm} (MW)		698	146	193	27	14
			Scénario 2	(5% ovin	90% bovin	100% avicole)
Volume CH₄		66	248	363	52	25
total(10⁶m³/an)						754
E_{tot} (GWh/an)		654	2 460	3 608	517	249
E_{valo} (GWh/an)		621	2 337	3 428	491	237
P_{tot} (MW)		78	293	429	61	30
P_{élect} (MW)		27	103	150	21	11
P_{therm} (MW)		35	132	193	27	14

6.3. Discussion des résultats

Plus de 1 milliard de m³ de biogaz pourrait être produit annuellement à l'échelle nationale si les effluents d'élevage de diverses espèces sont valorisés. Ce potentiel représente près de 300 MW_{élect} qui pourront être installés à l'échelle nationale. Cette puissance pourrait couvrir le tiers des 1000 MW_{élect} de biomasse prévus à l'horizon 2030 dans le programme national des énergies renouvelables. L'état pourrait encourager davantage les projets de méthanisation en modernisant la ferme algérienne progressivement. Concernant les petites exploitations, des projets de micro cogénération peuvent être mis en place afin de rendre à terme ces exploitations autonomes sur le plan énergétique, améliorer la gestion des amendements sur l'exploitation et réduire les gaz à effet de serre émis par l'élevage, notamment via les effluents.

Au-delà de la réduction directe des émissions à la source, la méthanisation intervient aussi par la substitution d'une énergie fossile pour la production d'électricité et/ou chaleur. La

réduction des odeurs et l'amélioration des caractéristiques agronomiques sont également des avantages majeurs de la méthanisation. (Chynoweth et al., 1999 ; Hansen et al., 2006) La codigestion est également une solution intéressante pour augmenter la capacité à grande échelle des unités de biogaz. En effet, le substrat dispersé peut être mélangé dans différents rapports pour augmenter la quantité de matière première. En outre, en choisissant les co-substrats les plus appropriés, la codigestion peut également résoudre le problème du faible potentiel méthanogène ou des comportements acides de certains substrats et améliorer la qualité du bio-engrais pour les applications agricoles. (Akbi et al., 2017)

7. Cas d'étude : ferme expérimentale-LA BOUZULE-

7.1. Description de la ferme

Propriété de l'Ensaia depuis le milieu des années 60, la Bouzule est une exploitation laitière bovine et caprine s'étendant sur un domaine de 155 hectares de cultures et de prairies. L'Ensaia, est actuellement l'une des deux seules écoles d'ingénieurs en Agronomie de France à être dotée d'une ferme. Le domaine de la Bouzule est ainsi placé au cœur de son projet de développement, à l'interface de ses missions de formation et de recherche. Exploitation de type polyculture-élevage, la Bouzule est une vraie ferme qui vit de ses productions. Elle est aussi un outil pédagogique utilisé en soutien pour la formation des élèves-ingénieurs et un laboratoire de recherche appliquée pour les unités de l'école. Elle dessine les contours de la ferme de demain par l'expérimentation et la mise en œuvre de nouvelles techniques et pratiques de culture et d'élevage. Elle est une ferme durable ouvrant la voie à un modèle agronomique nouveau, fondé sur le renouvelable, l'autonomie et le respect de la biodiversité.

7.1.1. Elevage bovin

Aux côtés d'une trentaine de vaches allaitantes charolaises, la Bouzule regroupe 80 vaches laitières, de race Prim'Holstein. Une trentaine de bœufs complète également le cheptel. En stabulation libre, les vaches sont maintenues saisonnièrement en étable mais ont un libre accès à leur logette, peuvent s'y lever, s'y coucher et s'y déplacer. Le sol des logettes est constitué d'un matelas composé de paille et d'un tapis en caoutchouc afin de procurer confort mécanique et thermique. Les effluents tombent dans un couloir et sont ramassés par un racleur automatique, puis stockés dans des cuves. Cette réserve de lisier sera par la suite épandue dans les champs du domaine constituant un engrais organique naturel assimilable par les plantes.

Les vaches disposent d'une table d'alimentation où elles se nourrissent à volonté. Elles bénéficient également lors de la traite d'un concentré de production comprenant un mélange de céréales, tourteaux et minéraux. Tous les ans, les vaches de la Bouzule donnent naissance à

des veaux après une gestation de 9 mois. Les veaux femelles deviennent des génisses qui feront leur premier veau à 2 ou 3 ans.

La production laitière de la Bouzule est particulièrement importante. Alors que la moyenne nationale est de 6 000 litres lait pour une vache et par an, celle de la Bouzule en produit 10 000. (ENSAIA, 2019)

7.1.2. Chèvrerie

Environ 100 chèvres de race Alpine chamoisée côtoient les bovins. Elles produisent près de 100 000 litres de lait par an, soit 3 ou 4 litres de lait par jour et donnent naissance après une gestation de 5 mois à deux chevreaux en moyenne.

7.1.3. Cultures

Le domaine de la Bouzule comprend 300 hectares de terres cultivées et de prairies, dont 160 hectares localisés sur le site propre de la ferme. Les sites de Xiraucourt et de Celles-sur-Plaine s'étendent respectivement sur 93 et 49 hectares. Colza, blé, orge, chanvre et tournesol, maïs, pois fourrager et luzerne sont cultivés à la Bouzule pour la vente et l'alimentation des animaux. Les prairies permettent le pâturage des vaches et des chèvres aux beaux jours. Herbe et maïs sont ensilés, une méthode de conservation en anaérobie et humide. Les étendues cultivées sont également utilisées par les laboratoires de l'école pour des recherches liées à la biodiversité et à la rotation des cultures, aux indicateurs environnementaux, à la valorisation des prairies...

Laboratoire à ciel ouvert, l'exploitation a pour ambition de maintenir voire de développer son niveau de production mais aussi de produire mieux en respectant les équilibres écologiques. Elle mène ainsi plusieurs projets pour proposer un modèle de ferme productive alliant le développement agricole à la protection de l'environnement.

7.2. Projet Bouzule 2010

Ferme productive, la Bouzule est un domaine expérimental pour imaginer et concevoir la Ferme Durable de Demain. 3 axes de prospective, d'expérimentation et de test y sont particulièrement développés avec un objectif partagé : l'autonomie et l'indépendance dans le respect de l'environnement.

7.2.1. L'autonomie énergétique

Il s'agit de s'intéresser à toutes les énergies renouvelables avec comme socle le milieu agricole.

Le méthaniseur de la Bouzule permet actuellement de produire 300 000 kWh électrique.

Un pilote de 2 m³ a également été installé pour des essais sur le process et les intrants afin d'optimiser les rendements.

Aujourd'hui, la Bouzule produit 2 à 3 fois plus d'énergie qu'elle n'en consomme. La création d'un laboratoire dédié a pour vocation de faire du site un centre technique de méthanisation dans le Grand Est.

7.2.2. L'autonomie alimentaire

L'alimentation du bétail exige une forte importation de produits extérieurs. Le défi serait de produire la totalité de la consommation animale directement sur site.

Une culture expérimentale de luzerne est actuellement mise en œuvre. Cette légumineuse est particulièrement riche en vitamines et en sels minéraux. Elle a également la propriété de fixer naturellement l'azote de l'air apportant ainsi des protéines végétales aux animaux ; Sa richesse en protéines allant jusqu'à 55%. Piège à nitrate grâce à de profondes racines, la luzerne contribue également à améliorer la structure et la qualité du sol en l'enrichissant de cet engrais naturel qu'est l'azote.

7.2.3. L'autonomie en azote

Le maintien des rendements des cultures nécessite l'apport d'engrais générant coûts d'importation et impacts polluants. Certes, l'épandage des effluents d'élevage, contenant de l'azote organique transformée en azote minérale sous l'action des microorganismes, fertilise naturellement le sol mais son processus n'est pas entièrement maîtrisable.

Le trio luzerne/méthanisation/rotation des cultures est une piste pour s'assurer d'une indépendance en apport d'azote. Il s'agit de combiner l'azote naturellement générée par la luzerne, celle contenue dans le résidu issu du processus de méthanisation appelé digestat et l'effet positif de la rotation culturale sur l'activité biologique du sol et la nutrition des plantes.

Luzerne/Méthanisation/Rotation des cultures : une association gagnante qui permet aujourd'hui d'assurer une autonomie en azote évaluée à 80%. Les recherches sont à poursuivre pour atteindre les 100%.

7.3. Processus de méthanisation au sein de la Bouzule

7.3.1. Alimentation du digesteur

Trois tonnes de fumier de vaches laitières sont incorporés chaque jour dans le digesteur de la Bouzule de 450 m³ de volume (Voir Annexe 02, figure 18) soit l'équivalent de 170 kg/h approximativement. Le digesteur est alimenté aussi de 4 à 5 m³ de lisier qui sont pompés à partir de la préfosse quotidiennement.

7.3.2. A l'intérieur du digesteur

Le fumier et lisier sont mélangés à l'aide d'un agitateur (Voir Annexe 02, figure 22). A l'intérieur du digesteur, trois paramètres doivent être contrôlés :

- **Le pH**

Le pH doit être compris entre 7 et 7,5. Si le $\text{pH} < 7$, il faut arrêter d'alimenter le digesteur. Si le $\text{pH} > 7,5$; il faut incorporer un substrat un peu acide par exemple : le maïs.

- **La température**

La température doit être maintenue à 39 °C. De l'eau chaude est envoyée dans les serpentins à l'intérieur du digesteur. Cette eau est chauffée à partir de la chaleur générée par le cogénérateur de la ferme (10 % de la chaleur totale). Elle peut arriver jusqu'à 80 °C. Afin de la faire circuler à l'intérieur du digesteur, il ne faut pas que sa température dépasse 60 °C. Pour cela, une table de refroidissement est placée entre la chambre de cogénération et le digesteur afin de faire baisser sa température si elle excède les 60 °C.

- **La teneur en soufre**

La teneur du soufre ne doit pas dépasser les 50 ppm à l'intérieur du digesteur. Si elle est supérieure à 50 ppm, pour faire diminuer cette teneur, de l'air est envoyé à l'intérieur du digesteur. Du soufre minéral sera produit suite à cela. Une poudre beige qu'on retrouve à la surface du digesteur.

7.3.3. Biogaz récupéré

95% du biogaz produit provient du digesteur. Les 5 % restant proviennent du post digesteur. Le biogaz envoyé vers la chambre de cogénération est le mélange des deux que nous pouvons récupérer en ouvrant la vanne d'arrivée de biogaz au niveau de la chambre de cogénération

7.3.4. Digestat

De 1400 m³ de volume, le post digesteur subit une vidange de 1200 m³ tous les six (06) mois soit l'équivalent de 200 m³ par mois. (Voir Annexe 02, figure 23)

7.3.5. Cogénérateur

Dans la chambre de cogénération (Voir Annexe 02, figure 24), la turbine du cogénérateur de la Bouzule est alimentée par le biogaz produit par le digesteur (95 %) et le post digesteur (5 %). Sa puissance est de 36 kW.

Il produit de l'électricité et de la chaleur simultanément. Sa production en électricité peut atteindre les 300 000 kWh /an qui seront vendus à EDF par la suite. Néanmoins, et pour des raisons quantitatives et qualitatives du fumier et lisier incorporés dans le digesteur, en 2015 cette production variait entre 6 000 et 20 000 kWh /mois pour un total de 161 722 kWh annuels (tableau 08).

Quant à la chaleur, 10 % est utilisée pour chauffer l'eau envoyée au digesteur pour maintenir la température à 39 °C. Le reste est utilisé pour chauffer les bâtiments de la ferme.

Tableau 08 : Production d'électricité dans la ferme de la Bouzule (Année 2015)

Mois	Production d'électricité en kWh
Janvier	13 469
Février	16 407
Mars	15 779
Avril	20 098
Mai	19 088
Juin	18 897
Juillet	15 394
Août	8 899
Septembre	7 107
Octobre	5 800
Novembre	6 000
Décembre	14 784

7.4. Bilan énergétique de la ferme

7.4.1. Tests BMP sur l'inoculum de la ferme

Nous avons réalisé des essais *BMP* du fumier/lisier de la ferme -la Bouzule- au laboratoire. Le tableau 09 représente les volumes de biogaz et de CH₄ produits en utilisant ce substrat. Les matières sèches du fumier et du lisier sont de 25 et 09 % respectivement. Leurs matières organiques sont de 74 et de 76 % respectivement. Quant à l'inoculum, 40 % fumier et 60% lisier, sa matière sèche est de 15 % et sa matière organique est de 75 %.

Les volumes de biogaz /kg MO et /kg MB produits par le mélange fumier/lisier de la Bouzule sont de 377 et 42 L respectivement. Avec une composition de 65% en CH₄, les volumes du méthane /kg MO et /kg MB sont de 245 et 27 L respectivement.

Tableau 09 : Volumes de biogaz et de CH₄ produits en L/kg MO et /kg MB du mélange fumier/lisier de la Bouzule

Substrat	MS (%)	MO (%)	Biogaz/kgMO	Biogaz/kgMB	CH ₄ (%)	CH ₄ /kgMO	CH ₄ /kgMB
Fumier	25	74					
Lisier	09	76					
Inoculum	15	75	377 ±6	42 ±1	65 ±3	245 ±3	27 ±2

7.4.2. Production énergétique de la ferme

La production totale de la ferme en biogaz s'élève à 134 400 m³/an. Avec une composition de 65 % en CH₄, la production en méthane s'élève à 87 360 m³/an.

Par conséquent, la production totale de la ferme en énergie primaire est de 873 MWh. Avec des puissances électrique et thermique de 36 et 49 KW, les rendements électrique et thermique du cogénérateur sont de 33 et 45 % respectivement.

La production totale de la ferme en électricité est de 288 MWh et 393 MWh en chaleur. Grâce à la cogénération, nous constatons que l'efficacité du cogénérateur passe de 34 % (chaleur non valorisable) à 80 % (chaleur valorisable).

7.4.3. Discussion des résultats

A travers le cas d'étude de la ferme expérimentale de la Bouzule, nous concluons que la méthanisation reste une grande opportunité pour revisiter ses pratiques d'élevage. Grâce à ses divers produits, elle offre des autonomies alimentaire, énergétique et en azote à la ferme et ses alentours.

Avec une production électrique annuelle qui avoisine les 300 MWh, sa consommation en électricité est de 100 MWh/an. Par conséquent, la ferme de la Bouzule est autosuffisante avec un excédent énergétique.

Sur le plan environnemental, le bilan de gaz à effet de serre du fumier/lisier de la ferme est de 423 TeqCO₂. Grâce à la méthanisation et la valorisation du biogaz en électricité et en chaleur, 341 TeqCO₂ sont évités.

CONCLUSION GENERALE

Les essais de méthanisation menés à la ferme de la Bouzule, nous ont permis d'évaluer le potentiel de biogaz et de CH₄ des différents effluents d'élevage algériens à savoir : le fumier de vaches, de volailles, de chevaux et de moutons.

Lors de la production du biogaz, la maîtrise de la température (37,5 °C durant nos expériences), du pH (aux alentours de 6,5 - 7,5) ainsi que la connaissance de la biomasse microbienne (les micro-organismes très dépendants les uns des autres qui assurent des activités complémentaires lors de la transformation de la matière organique en composés gazeux) sont des paramètres majeurs à cerner.

Notre étude montre que la valorisation des effluents d'élevage pourrait couvrir une partie de nos besoins énergétiques dans les prochaines décennies. Nous avons pu évaluer que plus d'un milliard de m³ de biogaz peuvent être produits annuellement avec les conditions des systèmes d'élevage actuels. Si une amélioration et une modernisation de ces systèmes d'élevage sont réalisées sur le terrain, on pourrait doubler voire tripler ce potentiel dans les prochaines décennies.

La méthanisation apparaît comme une des technologies clés de l'économie circulaire et de la croissance verte. Elle se décline aujourd'hui sous de multiples solutions environnementales : le traitement des déchets, la valorisation de sites pollués, la réduction des émissions de gaz à effet de serre (CH₄, CO₂) et surtout la production de fertilisant naturel peu énergivore et plus rapidement assimilables par les plantes. L'enjeu pour l'agriculture algérienne se situe précisément dans l'utilisation de cette matière fertilisante à base de déchets dont le coût d'élimination est conséquent pour les municipalités qui peut être valorisée en amendements organiques. Cet humus, cette masse fertilisante aura des effets bénéfiques sur les rendements agricoles en croissance et sur les revenus des agriculteurs.

En définitive, la méthanisation des déchets agricoles et d'élevage, en raison de ses nombreux avantages, mérite d'être développée en Algérie.

Actuellement, il est très difficile de mettre en œuvre un projet de méthanisation pour un exploitant en Algérie. Outre les aspects de la formation et de la recherche, le développement de la filière a surtout besoin de mécanismes de soutien par les pouvoirs publics. Pour ce faire, un gros effort doit être fait sur le plan réglementaire comme des mesures incitatives telles que des garanties d'investissement à long terme (sur 20 ans) à travers la mise en place d'un système des tarifs d'achat garantis pour l'électricité produite à partir du biogaz, à l'instar de ce qui a été prévu pour les filières d'énergie solaire et de l'éolien.

En d'autres termes, la portée de cette étude vise à assoir ces filières de bioénergie. Il va sans dire que ce sont ces sources d'énergie renouvelables qui assureront la transition énergétique. Le concept de ferme durable basé sur l'autonomie énergétique à même d'assurer la sécurité alimentaire est très en vogue actuellement. Le cas d'étude de la ferme expérimentale -La Bouzule- en est un parfait exemple.

REFERENCES

- ADEME, Le biogaz et sa valorisation. Guide méthodologique, ADEME-GDF, Paris, 1999, p 63.
- ADEME, Base de données SINOE, consulté en Juin 2019, accessible sur <http://www.sinoe.org>
- Adney, W.S., Rivard, C.J., Shiang, M., Himmel, M.E. Anaerobic digestion of lignocellulosic biomass and wastes - cellulases and related enzymes. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 1991, vol. 30, n° 2, 165-183.
- AIE, Agence Internationale de l'Énergie, World Energy Outlook 2009, OECD/IEA, Paris, consulté en juin 2017, accessible sur <http://www.worldenergyoutlook.org/media/weowebiste/2009/WEO2009.pdf>
- Akbi, A., Saber, M., Aziza, M., Yassaa, N. An overview of sustainable bioenergy potential in Algeria. *Renew Sust Energ Rev*. 2017, vol. 72, 240-245.
- Amon, B., Kryvoruchko, V., Amon, T., Zechmeister-Boltenstern, S. Methane, nitrous oxide and ammonia emissions during storage and after application of dairy cattle slurry and influence of slurry treatment. *Agric. Ecosyst. Environ*. 2006, vol. 112, 153-162.
- Agence Nationale des Déchets. Caractérisation des déchets ménagers et assimilés dans les zones nord, semi-aride et aride d'Algérie 2014, consulté en Juin 2017, 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.
- Babae, A., Shayegan, J., Roshani, A. Anaerobic slurry co-digestion of poultry manure and straw: effect of organic loading and temperature. *J. Environ. Health. Sci. Eng*. 2013, vol. 11, P. 5
- 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
- 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

- Becker, P., Markl, H. Modeling of olive oil degradation and oleic acid inhibition during chemostat and batch cultivation of *Bacillus thermoleovorans* IHI-91. *Biotechnol Bioeng*, 2000, vol. 70, 630–637.
- Bekhouche, N. Evaluation de la Durabilité des Exploitations Bovines Laitières des Bassins de la Mitidja et d'Annaba. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure Agronomique d'Alger, 2011, p. 61.
- 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.
- Béline, F., Dabert, P., Peu, P., Girault, R. La méthanisation des effluents d'élevage en France et en Europe : principe, état des lieux et perspectives. *Fourrage*. 2010, vol 203, 155-161.
- Bencharif, A. Stratégies des acteurs de la filière lait en Algérie: état des lieux et problématiques. *Options Méditerranéennes, Sér. B/ 32*, 2001, 25-45.
- 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.
- BP, Statistical Review of World Energy, juin 2015, p 8, p 22, consulté en Juin 2017, accessible sur <https://biomasspower.gov.in/document/Reports/BP%20statistical%20review-2015.pdf>
- BP, Statistical Review of World Energy, juin 2015, pp6-7, pp20-21, consulté en Juin 2017, accessible sur <https://biomasspower.gov.in/document/Reports/BP%20statistical%20review-2015.pdf>
- Brakel, J. V. Biogas before 1970: a review. *Tropical Science*, 1980, vol. 22, n° 2, 105-148.
- Broughton, M.J., Thiele, J.H., Birch, E.J., Cohen, A. Anaerobic batch digestion of sheep tallow. *Water Res*, 1998, vol. 32, 1423–1428.
- 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.
- Chanakya, H.N., Reddy, B.V.V., Modak, J. Biomethanation of herbaceous biomass residues using 3-zone plug flow like digesters - A case study from India. *Renewable Energy*, 2009, vol. 34, 416-420.
- Chynoweth, D. P., Wilkie, A. C., Owens, J. M. Anaerobic Treatment of Piggery Slurry. *J. Anim. Sci*, 1999, vol. 12, 607-628.
- Chynoweth, D.P., Wilkie, A.C., Owens, J.M. Anaerobic processing of piggery wastes: a review. ASAE Annual International meeting, Orlando, Florida 1998.

Clemens, J., Trimborn, M., Weiland, P., Amon, B. Mitigation of greenhouse gas emissions by anaerobic digestion of cattle slurry. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 2006, vol. 112, 171-177.

Couturier, C., Berger, S., Héraul, I. *La digestion anaérobie des boues urbaines*, Solagro, Toulouse, 2001.

Degoulet, J. *Le procédé discontinu CIEH: Fiche technique*.

Desai, C. K. Use of solar pond for thermal control of biogas plant. *National Seminar on Solar Energy and Rural Development*, Kolhapur, Shivaji University, 1988, 83-88.

DETEC, OFEN, *Optimisation des tests standardisés de digestibilité dans des réacteurs batch : Rapport final*, Berne, Suisse 2011.

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.

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.

ENSAIA, *Domaine de la Bouzule : Un domaine expérimental pour imaginer et concevoir la ferme du futur*, consulté en Juin 2019, accessible sur :
https://ensaia.univ-lorraine.fr/sites/ensaia.univ-lorraine.fr/files/users/documents/ensaia_ferme_bouzule.pdf

EurObserv'ER, "Baromètre biogaz 2017", consulté le 12 Juin 2019, accessible sur <https://www.eurobserv-er.org/barometre-biogaz-2017>

FAO. *Biogas processes for sustainable development*. MARCHAIM U, 1992.

Ferry, J. *Methanogenesis* Chapman & Hall, New York, 1993.

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.

Garba, B. Effect of temperature and retention period on biogas production from lignocellulosic material. *Renewable Energy*, 1996, vol. 9, n° 1-4, 934-641.

Gardner, R. M., Doerner, K. C., White, B. A. Purification and characterization of an exo-beta-1,4-glucanase from *ruminococcus flavefaciens* FD-1. *Journal of Bacteriology*, 1987, vol. 169, n° 10, 4581-4588.

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.

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

Hansen, M. N., Kai, P., Moller, H. B.: effects of anaerobic digestion and separation of pig slurry on odor emission. *Appl. Eng. Agric.* 2006, vol. 22, 135- 139.

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

Haushalter, J. Dimensionnement d'une cogénération biomasse, France 2007, disponible sur : http://www.cibe.fr/IMG/pdf/4_-_Dimensionnement_d'une_cogeneration_biomasse.pdf

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.

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

International Renewable Energy Agency IRENA. Renewable power generation costs in 2014; 2015.

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

ISAT-GTZ. Biogas Digest _ Volume II _ Biogas - Application and Product Development. Information and Advisory Service on Appropriate Technology (ISAT) & Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), 1999, 81 p.

Jain, M.K., Singh, R., Tauro, P. Anaerobic digestion of cattle and sheep wastes. *Agric Wastes*. 1981, vol. 3, 65-73.

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.

Lacour, J. Valorisation de résidus agricoles et autres déchets organiques par digestion anaérobie en Haïti, thèse de doctorat. Institut National des Sciences appliqués, Lyon, France, 2012, p. 151.

Langsford, M.L., Gilkes, N.R., Wakarchuk, W.W. The cellulase system of *Cellulomonas fimi*. *Journal of General Microbiology*, 1984, vol. 130, n°6, 1367-1376.

Lee, Y.H., Fan, L. T. Kinetics studies of enzymatic hydrolysis of insoluble cellulose: analysis of the initial rates, *Biotechnol. Bioeng.*, 1982, vol. 24, 2383-406.

Madani, T., Mouffok, C. Production laitière et performance de reproduction des vaches Montbéliardes en région semi-aride algérienne. *Revue Elev. Vét. Pays Trop.*, 2008, vol 61, 97-107.

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.

Maramba, F.D. Maya Farms Division. Metro Manila: Liberty Flour Mills, Inc, 1978.

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.

Masse, L., Masse, D.I., Kennedy, K.J. Effect of hydrolysis pretreatment on fat degradation during anaerobic digestion of slaughterhouse wastewater. *Process Biochem*, 2003, vol. 38, 1365–1372.

Mata-Alvarez, J. Fundamentals of the anaerobic digestion process. **In:** Mata-Alvarez J. Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes. Padstow, Cornwall, UK, 2002, pp. 1-20.

MATE-GEF/PNUD, Bilans des Expertises sur La Biodiversité Importante pour l’Agriculture en Algérie, Projet ALG/97/G31, Algiers, 1997.

Mignon, C. Utilisation du digestat comme fertilisant en agriculture. Valbiom, Valorisation de la biomasse asbl, Gembloux, Belgique, Août 2009.

Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural, Direction des Statistiques Agricoles et des Systèmes d'Information, Statistique agricole superficies et productions, SERIE « B », Algérie, Décembre 2014.

Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural, Direction des services vétérinaires, Appui technique à l'étude de faisabilité d'un laboratoire de confinement de type 3. INMV 04-06, Algiers, 2016.

Moletta R. 2008. La méthanisation, Tec & Doc, Lavoisier, 532p.

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

Nedjraoui. Profil fourrager. Algérie. FAO, 2001, 14p.
www.fao.org/AG/AGP/agpc/doc/coumprof/Algeria.htm.

NF-ISO-11465, Détermination de la teneur pondérale en matière sèche et en eau_ Méthode gravimétrique, Août 1994.

NF-U-44-160, Amendements organiques et supports de culture : détermination de la matière organique totale _ Méthode par calcination, Novembre 1985.

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.

Office National des Statistiques, Algérie, consulté en Décembre 2019, accessible sur <http://www.ons.dz/-Demographie-.html>

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.

Portail du Centre du Développement des Energies Renouvelables, Rapport sur le programme algérien de développement des énergies renouvelables, Alger, 2015, consulté en Juin 2017, accessible sur <https://www.energy.gov.dz/>

Puxin, L. Construction manual of 10 m³ family size Puxin biogas plant. SHENZHEN PUXIN SCIENCE TECHNOLOGY CO. L, 2009.

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.

RETScreen International. Logiciel de gestion d'énergies propres, manuel d'ingénierie et d'études, production combinée d'électricité et de chaleur par cogénération, consulté le 24 février 2015.

Ryckebosch, E., Drouillon, M. Vervaeren, H. Techniques for transformation of biogas to biomethane, *Biomass and Bioenergy*, 2011, vol. 35, n° 5, 1633-1645.

Saidi-Boulahia, A., Abada, S., Saber, M. Valorisation des déchets organiques ménagers et les déjections bovines par la méthanisation. *Revue des Energies Renouvelables*, 2018, vol.21, n° 4, 537-543.

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 Technology Exchange (GATE) & Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), 1988, P. 66

Schwarz, W.H. The cellulosome and cellulose degradation by anaerobic bacteria. *Applied Microbiology Biotechnology*, 2001, vol. 56, 634-649.

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.

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.

Site de statistiques mondiales /<https://fr.statista.com/statistiques/828994/capacite-production-biogaz-mondiale/> consulté en Juin 2019.

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.

Tahri, A.; Djaafri, M.; Khelafi, M.; Kalloum, S.; Salem, F. Amélioration du rendement de la production de biogaz par codigestion des déchets organiques (déchets d'abattoir et de volaille). Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien, URERMS Centre de développement des Energies Renouvelables, Adrar, Algérie. *Revue des Energies Renouvelables SIENR'12 Ghardaïa*, 2012, 375 – 380.

Tarantili, P. A., Koullas, D. P., Christakopoulos, P., Kekos, D., Koukios, E. G., & Macris, B. J. Cross-synergism in enzymatic hydrolysis of lignocellulosics: Mathematical correlations according to a hyperbolic model. *Biomass and Bioenergy*, 1996, vol. 10, n° 4.

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.

Tou, I.; Igoud, S.; Touzi, A. Production de Biométhane à Partir des Déjections Animales. (Laboratoire de Biomasse, Centre de Développement des Energies Renouvelables, Bouzaréah, Alger). *Revue des Energies Renouvelables-Production et Valorisation-Biomasse*, 2001, 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.

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE, Fermentation of organic materials characterization of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests, vdi 4630, April 2006.

Walker, L.P., Wilson, D.B. Enzymatic hydrolysis of cellulose: An overview. *Bioresource Technology*, 1991, vol. 36, n° 1, 3-14.

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, vol. 95, pp. 1-10.

Yakhlef, H., Madani, T., Abbache, N. Biodiversité importante pour l'agriculture: cas des races bovines, ovines, caprines et camelines. MATE-GEF/PNUD : projet ALG/G13, Décembre 2002. 43p.

Annexe 01

Tableau 10 : Production primaire de biogaz de l'Union européenne en 2015 et en 2016 (en ktep)
(*EurObserv'ER*, 2017)

Pays	2015				2016*			
	Biogaz de décharge	Biogaz de digestion des boues ^(a)	"Autres biogaz" provenant de la fermentation anaérobie ^(b)	Total	Biogaz de décharge	Biogaz de digestion des boues ^(a)	"Autres biogaz" provenant de la fermentation anaérobie ^(b)	Total
Allemagne	94,0	451,7	7 306,6	7 852,4	84,6	461,5	7 410,2	7 956,3
Royaume-Uni	1 450,8	327,8	473,8	2 252,4	1 400,4	345,6	660,9	2 406,9
Italie ^(c)	369,0	53,5	1 448,9	1 871,5	400,1	58,0	1 570,8	2 028,9
Rép. Tchèque	27,1	40,0	546,2	613,4	25,4	41,5	534,0	601,0
France	355,0	31,7	152,3	539,0	350,0	35,0	194,6	579,6
Pays-Bas	19,5	55,3	252,2	327,0	16,4	57,5	250,5	324,4
Autriche	4,4	11,3	284,3	300,1	3,1	11,7	294,0	308,9
Pologne	50,8	96,6	81,5	228,8	51,0	100,0	121,8	272,8
Belgique	25,7	24,1	176,9	226,7	26,8	25,2	184,6	236,6
Espagne	140,6	70,4	50,6	261,6	124,1	62,1	44,6	230,8
Suede ^(d)	16,1	59,9	90,7	166,7	15,0	61,0	97,6	173,5
Slovaquie	3,4	14,8	130,5	148,6	3,4	14,7	130,0	148,1
Danemark	4,2	21,8	125,6	151,6	3,4	17,7	101,8	122,9
Finlande ^(e)	27,9	15,5	59,9	103,2	28,0	15,0	64,5	107,5
Grèce	69,9	15,9	5,6	91,4	72,5	16,6	12,6	101,7
Lettonie	8,4	2,0	77,4	87,8	7,8	2,6	79,5	89,9
Hongrie	13,9	20,3	45,5	79,7	13,9	20,4	46,2	80,5
Portugal	71,2	2,6	8,8	82,6	68,2	3,0	9,2	80,3
Irlande	41,0	8,0	5,6	54,6	40,3	8,5	7,5	56,3
Croatie	5,1	3,4	27,5	36,0	6,0	4,1	32,8	43,0
Slovénie	5,0	2,4	22,2	29,7	3,7	2,2	24,3	30,2
Bulgarie	5,0	14,0	0,0	19,0	9,0	19,0	0,0	28,0
Lituanie	8,5	7,5	16,0	32,0	8,2	7,0	8,2	23,4
Luxembourg	0,0	1,6	16,1	17,7	0,0	2,3	17,6	19,9
Roumanie	1,0	0,1	17,0	18,1	1,0	0,1	17,0	18,1
Chypre	0,0	0,0	11,5	11,5	0,0	0,0	11,7	11,7
Estonie	11,6	1,5	0,0	13,1	10,7	0,0	0,0	10,7
Malte	0,1	1,0	0,5	1,6	0,0	1,2	0,5	1,8
UE 28	2 829,1	1 354,8	11 433,8	15 617,8	2 773,0	1 393,5	11 927,1	16 093,6

Tableau 11 : Production brute d'électricité à partir de biogaz de l'Union européenne en 2015 et en 2016 (en GWh) (*EurObserv'ER*, 2017)

Pays	2015			2016*		
	Centrales électriques seules	Centrales fonctionnant en cogénération	Electricité totale	Centrales électriques seules	Centrales fonctionnant en cogénération	Electricité totale
Allemagne	8 844,0	24 220,0	33 064,0	9 088,0	24 625,0	33 713,0
Italie	3 139,0	5 072,9	8 211,9	3 073,2	5 185,5	8 258,7
Royaume-Uni	6 513,3	723,7	7 237,0	6 934,5	770,5	7 705,0
Rép. tchèque	51,0	2 560,0	2 611,0	49,0	2 540,0	2 589,0
France	713,0	1 070,0	1 783,0	786,0	1 179,5	1 965,5
Pologne	0,0	906,0	906,0	0,0	1 049,0	1 049,0
Pays-Bas	42,9	993,0	1 035,9	36,0	970,0	1 006,0
Belgique	87,5	867,0	954,5	85,5	847,5	933,0
Espagne	743,0	239,0	982,0	893,0	0,0	893,0
Autriche	579,0	44,0	623,0	584,0	55,0	639,0
Slovaquie	117,0	424,0	541,0	107,7	390,3	498,0
Danemark	1,0	472,0	473,0	1,0	475,0	476,0
Lettonie	0,0	392,0	392,0	0,0	397,0	397,0
Hongrie	222,0	94,0	316,0	258,0	117,0	375,0
Finlande	203,3	153,8	357,1	204,9	155,1	360,0
Portugal	278,9	16,0	294,9	267,7	17,8	285,5
Grèce	33,6	196,7	230,3	32,8	216,7	249,5
Irlande	171,9	29,6	201,5	168,0	44,0	212,0
Croatie	24,7	151,4	176,1	28,0	172,0	200,0
Bulgarie	34,0	86,0	120,0	42,5	107,5	150,0
Slovénie	4,0	128,0	132,0	4,3	137,7	142,0
Lituanie	0,0	78,0	78,0	0,0	123,0	123,0
Luxembourg	0,0	61,6	61,6	0,0	72,6	72,6
Roumanie	29,0	32,0	61,0	29,0	32,0	61,0
Chypre	0,0	51,0	51,0	0,0	52,0	52,0
Estonie	0,0	50,0	50,0	0,0	45,0	45,0
Suède	0,0	11,0	11,0	0,0	9,0	9,0
Malte	0,0	2,6	2,6	0,0	2,9	2,9
UE 28	21 832,0	39 125,4	60 957,4	22 673,1	39 788,6	62 461,7

Tableau 12 : ANIMAUX D'ELEVAGE (Espèces bovines) (Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural 2014)

WILAYA	ESPECES BOVINES								Unité : tête
	Vaches laitières			Génisses + 12 mois	Taureaux	Taurillons 12 à 18 mois	Veaux - 12 mois	Velles - 12 mois	TOTAL
	B.L.M	BLA+BLL	TOTAL						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9 = 3 à 8
1 ADRAR	197	176	373	178	150	179	153	153	1 186
2 CHLEF	7 000	19 300	26 300	7 170	1 750	3 462	6 791	6 027	51 500
3 LAGHOUAT	3 886	8 537	12 423	2 634	1 533	1 317	2 607	1 106	21 620
4 O.E.BOUAGHI	7 060	18 825	25 885	5 755	3 184	6 433	7 848	9 534	58 639
5 BATNA	24 840	18 073	42 913	9 515	2 105	4 232	9 452	10 075	78 292
6 BEJAIA	5 343	11 954	17 297	8 399	1 327	5 924	5 265	4 831	43 043
7 BISKRA	1 010	1 312	2 322	416	196	262	880	774	4 850
8 BECHAR	251	1 003	1 254	315	55	291	108	152	2 175
9 BLIDA	3 310	8 656	11 966	2 323	1 001	1 445	1 886	1 892	20 513
10 BOUIRA	13 000	31 000	44 000	8 000	2 900	5 500	6 400	6 200	73 000
11 TAMANRASSET	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12 TEBESSA	1 602	5 398	7 000	1 310	422	350	1 728	2 190	13 000
13 TLEMCEN	8 550	17 130	25 680	4 520	1 980	2 940	4 400	3 500	43 020
14 TIARET	7 940	23 757	31 697	7 855	2 700	4 032	7 197	8 895	62 376
15 TIZI-OUZOU	24 025	30 078	54 103	18 253	6 912	13 297	16 796	17 863	127 224
16 ALGER	6 751	908	7 659	1 814	331	1 523	1 432	1 436	14 195
17 DJELFA	2 405	11 915	14 320	5 800	690	1 970	4 500	4 800	32 080
18 JIJEL	3 903	42 954	46 857	10 865	2 340	7 874	10 566	9 440	87 942
19 SETIF	25 226	52 891	78 117	15 467	2 735	10 635	12 893	14 333	134 180
20 SAIDA	4 727	7 503	12 230	1 655	1 022	1 260	2 373	1 940	20 480
21 SHIKDA	14 684	65 916	80 600	15 975	5 400	10 800	8 236	11 968	132 979
22 S.B.ABBES	13 000	13 000	26 000	5 974	1 105	3 450	3 963	4 008	44 500
23 ANNABA	3 200	18 920	22 120	8 631	1 356	8 177	7 614	7 402	55 300
24 GUELMA	3 645	51 545	55 190	11 836	3 736	8 536	7 546	6 156	93 000
25 CONSTANTINE	14 423	17 522	31 945	6 057	1 448	4 151	4 642	4 977	53 220
26 MEDEA	9 691	15 189	24 880	8 329	3 061	5 506	5 566	5 736	53 078
27 MOSTAGANEM	10 340	7 250	17 590	2 450	1 570	1 130	1 950	2 350	27 040
28 M'SILA	11 500	10 200	21 700	4 100	520	700	1 930	3 750	32 700
29 MASCARA	5 500	12 100	17 600	4 220	1 860	3 520	5 220	5 580	38 000
30 OUARGLA	199	74	273	75	49	14	147	67	625
31 ORAN	5 230	6 333	11 563	2 925	902	2 123	2 605	2 972	23 090
32 EL-BAYADH	1 593	13 424	15 017	2 172	1 169	2 004	4 467	4 011	28 840
33 ILLIZI	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34 B.B.ARRERIDJ	9 748	10 022	19 770	5 566	1 706	2 235	5 907	6 429	41 613
35 BOUMERDES	12 916	5 244	18 160	4 006	1 546	1 910	3 463	5 252	34 337
36 EL-TARF	2 340	45 660	48 000	10 940	3 420	11 200	12 100	12 140	97 800
37 TINDOUF	58	0	58	7	2	0	3	0	70
38 TISSEMSILT	992	5 358	6 350	1 565	739	807	1 033	1 606	12 100
39 EL-OUED	368	452	820	2 274	40	9 083	2 726	1 057	16 000
40 KHENCHELA	5 553	8 603	14 156	2 149	859	1 421	1 441	1 818	21 844
41 SOUK-AHRAS	10 250	41 371	51 621	9 066	2 172	4 800	16 244	17 847	101 750
42 TIPAZA	1 706	3 844	5 550	1 873	1 238	870	1 549	1 552	12 632
43 MILA	17 410	27 351	44 761	12 557	5 443	9 820	14 204	15 009	101 794
44 AIN-DEFLA	7 950	15 021	22 971	3 462	865	2 388	8 842	7 649	46 177
45 NAAMA	2 730	16 361	19 091	3 021	1 123	1 965	6 000	6 360	37 560
46 A.TEMOUCHENT	3 127	8 181	11 308	2 199	1 316	1 235	1 508	1 346	18 912
47 GHARDAIA	2 322	0	2 322	300	80	190	350	414	3 656
48 RELIZANE	7 400	13 300	20 700	2 785	1 395	1 900	2 420	2 520	31 720
TOTAL ALGERIE	328 901	743 611	1 072 512	246 758	77 453	172 861	234 951	245 117	2 049 652

Tableau 13 : ANIMAUX D'ELEVAGE (Espèces ovines) (Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural 2014)

WILAYA	ESPECES OVINES						Unité : tête
	Brebis	Béliers	Antenaises (10 à 18 mois)	Antenais (10 à 18 mois)	Agneaux -10 mois	Agnelles -10 mois	TOTAL
	1	2	3	4	5	6	7 = 1 à 6
1 ADRAR	169 059	58 883	51 605	58 638	68 671	55 609	462 465
2 CHLEF	130 000	10 920	30 480	29 040	31 400	33 160	265 000
3 LAGHOUAT	1 590 705	50 619	67 484	25 429	101 310	188 173	2 023 720
4 O.E.BOUAGHI	352 176	21 286	71 626	46 820	78 890	96 193	666 991
5 BATNA	924 505	36 980	165 725	80 777	165 596	202 261	1 575 844
6 BEJAIA	40 850	5 201	13 023	15 594	24 548	15 824	115 040
7 BISKRA	489 264	23 484	133 022	76 728	120 723	161 779	1 005 000
8 BECHAR	154 722	5 606	17 267	12 333	16 383	17 940	224 251
9 BLIDA	16 664	2 751	4 087	3 637	3 945	3 733	34 817
10 BOUIRA	118 000	11 300	31 500	31 000	29 100	32 100	253 000
11 TAMANRASSET	30 938	21 485	13 750	8 595	4 297	6 875	85 940
12 TEBESSA	520 000	23 000	60 100	26 500	121 680	148 720	900 000
13 TLEMCCEN	317 800	28 500	53 400	45 800	44 500	42 300	532 300
14 TIARET	1 387 827	67 632	223 005	136 495	184 889	274 182	2 274 030
15 TIZI-OUZOU	72 469	10 278	27 171	29 978	38 360	36 694	214 950
16 ALGER	8 563	2 002	2 471	1 964	2 663	3 028	20 691
17 DJELFA	2 187 900	98 500	260 740	181 180	253 300	261 140	3 242 760
18 JIJEL	55 550	5 163	11 358	10 752	14 488	12 025	109 336
19 SETIF	278 351	14 320	65 514	54 470	51 688	59 197	523 540
20 SAIDA	545 182	30 905	40 757	43 396	71 500	73 845	805 585
21 SKIKDA	100 546	15 458	44 459	30 640	22 799	22 957	236 859
22 S.B.ABBES	483 000	28 476	81 575	65 266	57 641	53 042	769 000
23 ANNABA	29 572	3 799	4 409	3 747	8 093	7 470	57 090
24 GUELMA	268 000	14 100	50 000	27 430	50 800	89 670	500 000
25 CONSTANTINE	112 115	3 926	16 938	18 047	15 496	14 263	180 785
26 MEDEA	370 424	35 764	117 752	114 961	104 852	116 689	860 442
27 MOSTAGANEM	100 600	9 020	21 900	22 380	26 000	27 100	207 000
28 M'SILA	1 020 000	24 000	142 000	125 000	146 000	173 000	1 630 000
29 MASCARA	274 600	16 400	80 600	64 200	91 950	102 250	630 000
30 OUARGLA	58 528	8 238	10 420	7 134	17 489	23 290	125 099
31 ORAN	99 167	4 844	13 798	15 812	17 921	16 144	167 686
32 EL-BAYADH	1 008 000	55 000	224 760	115 220	172 040	224 980	1 800 000
33 ILLIZI	9 331	7 920	0	0	2 200	2 582	22 033
34 B.B.ARRERIDJ	214 387	13 603	27 501	49 140	64 457	57 823	426 911
35 BOUMERDES	22 092	4 820	6 566	5 626	6 125	6 942	52 171
36 EL-TARF	102 630	11 490	15 500	16 410	18 000	18 330	182 360
37 TINDOUF	18 838	982	2 062	2 356	2 258	2 160	28 656
38 TISSEMSILT	128 000	9 880	19 960	36 000	19 900	26 260	240 000
39 EL-OUED	310 000	15 500	67 355	78 577	44 898	33 670	550 000
40 KHENCHELA	247 597	13 175	29 991	29 748	28 011	36 699	385 221
41 SOUK-AHRAS	175 000	9 734	40 717	23 240	66 770	74 539	390 000
42 TIPAZA	37 064	9 067	7 192	7 015	10 351	11 315	82 004
43 MILA	194 907	13 854	47 570	50 015	30 813	33 175	370 334
44 AIN-DEFLA	190 826	20 321	32 407	33 048	86 683	83 479	446 764
45 NAAMA	756 002	34 549	81 974	71 162	121 562	134 751	1 200 000
46 A.TEMOUCHENT	80 900	6 700	24 810	17 200	16 899	18 550	165 059
47 GHARDAJA	164 000	25 000	52 000	47 000	41 000	48 000	377 000
48 RELIZANE	224 370	20 280	39 000	30 200	45 300	30 850	390 000
TOTAL ALGERIE	16 191 021	964 715	2 647 301	2 025 700	2 764 239	3 214 758	27 807 734

Tableau 14 : ANIMAUX D'ELEVAGE (Espèce chevaline) (Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural 2014)

WILAYA	ESPECE CHEVALINE			ESPECE MULASSIERE	ESPECE ASINE
	Adultes	Jeunes -2ans	TOTAL		
	1	2	3 = 1+2		
1 ADRAR	0	0	0	0	13 405
2 CHLEF	589	104	693	4 061	4 237
3 LAGHOUAT	2 990	1 495	4 485	360	3 518
4 O.E.BOUAGHI	603	86	689	80	2 296
5 BATNA	540	281	821	407	2 688
6 BEJAIA	84	6	90	350	1 834
7 BISKRA	172	38	210	76	608
8 BECHAR	29	6	35	9	180
9 BLIDA	293	102	395	0	80
10 BOUIRA	160	40	200	650	2 930
11 TAMANRASSET	0	0	0	0	0
12 TEBESSA	258	76	334	20	1 900
13 TLEMCEM	900	260	1 160	740	7 420
14 TIARET	3 621	1 881	5 502	244	1 595
15 TIZI-OUZOU	103	7	110	114	4 227
16 ALGER	696	111	807	5	31
17 DJELFA	850	200	1 050	190	780
18 JIJEL	79	5	84	81	1 273
19 SETIF	871	224	1 095	966	6 870
20 SAIDA	960	630	1 590	275	1 144
21 SKIKDA	517	190	707	1 454	8 162
22 S.B.ABBES	1 957	1 323	3 280	576	2 483
23 ANNABA	50	29	79	340	1 760
24 GUELMA	676	222	898	856	1 996
25 CONSTANTINE	144	26	170	28	270
26 MEDEA	262	67	329	656	5 160
27 MOSTAGANEM	1 700	750	2 450	6 350	3 200
28 M'SILA	540	280	820	470	3 750
29 MASCARA	2 500	980	3 480	1 900	4 740
30 OUARGLA	310	35	345	590	6 300
31 ORAN	373	10	383	66	160
32 EL-BAYADH	902	348	1 250	255	1 897
33 ILLIZI	0	0	0	0	0
34 B.B.ARRERIDJ	545	150	695	350	3 586
35 BOUMERDES	140	34	174	100	692
36 EL-TARF	120	80	200	350	1 840
37 TINDOUF	0	0	0	50	1 700
38 TISSEMSILT	320	60	380	79	1 015
39 EL-OUED	688	92	780	885	3 285
40 KHENCHELA	378	122	500	172	915
41 SOUK-AHRAS	356	160	516	2 753	8 376
42 TIPAZA	44	4	48	0	70
43 MILA	275	30	305	116	1 023
44 AIN-DEFLA	325	140	465	1 755	6 165
45 NAAMA	1 002	209	1 211	628	2 240
46 A.TEMOUCHENT	970	260	1 230	168	599
47 GHARDAIA	270	120	390	165	380
48 RELIZANE	1 280	295	1 575	450	6 140
TOTAL ALGERIE	30 442	11 568	42 010	30 190	134 920

Annexe 02



Figure 17: Prélèvement de l'inoculum dans la ferme expérimentale de l'ENSAIA

-La Bouzule-



Figure 18: Digesteur de la ferme expérimentale de l'ENSAIA -La Bouzule-



Figure 19: Bouteilles utilisées durant la période des manipulations



Figure 20: pH mètre utilisé au laboratoire



Figure 21: Compteur de gaz à tambour et l'analyseur CH₄ utilisés au laboratoire



Figure 22: Agitateur du digesteur de la ferme expérimentale –La Bouzule–



Figure 23: Post digesteur de la ferme expérimentale –La Bouzule-



Figure 24 : Chambre de cogénération de la ferme expérimentale –La Bouzule-