République Algérienne Démocratique Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Mémoire

Pour l'obtention du diplôme de Master « MCIL » En Sécurité Industrielle et Environnement

Filière : Hygiène et Sécurité Industrielle

Spécialité : Sécurité Industrielle et Environnement

Production de biogaz à partir de déchets agro-alimentaires

Présentée et soutenue publiquement par :

REGAYAG MAHDJOUB

MEDJADI MOHAMED ELAMINE

Le :

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Benomar Fatima	MCB	Univ Oran 2 MBA Mohammed Ben Ahmed	**Président**
Dr . MIMOUNI CHAHINEZ	MCA	Univ Djillali Liabes _SBA	**Encadreur**
Nehal N	MCB	Univ Oran 2 MBA Mohammed Ben Ahmed	**Examinateur**

Année 2025/2026

Remerciements

Avant tout, nous remercions Allah le Tout-Puissant de nous avoir accordé la santé, la patience, la volonté et la force nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre encadreuse, Dr MIMOUNI Chahinez, pour son accompagnement, sa disponibilité, ses précieux conseils, son soutien constant et la confiance qu'elle nous a accordée tout au long de la réalisation de ce mémoire. Ses orientations et ses remarques constructives ont grandement contribué à l'aboutissement de ce travail.

Nous adressons également nos sincères remerciements à l'ensemble des enseignants qui ont assuré notre formation durant notre parcours universitaire, ainsi qu'aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail et de l'enrichirpar leurs observations et leurs recommandations.

Nous exprimons enfin notre profonde reconnaissance à nos familles pour leur soutien moral, leurs encouragements et leurs sacrifices tout au long de nos études.

À toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire, nous adressons nos plus sincères remerciements.

Merci à tous.

Dédicace

Nous dédions ce modeste travail à nos très chers parents,
Aucun mot ne saurait exprimer pleinement notre profonde gratitude pour tous les sacrifices consentis afin de nous offrir les meilleures conditions de réussite. Merci pour votre amour, votre soutien indéfectible, vos encouragements permanents etvos prières qui nous ont accompagnés tout au long de notre parcours universitaire.
À nos frères et sœurs, pour leursoutien moral, leur présence et leur confiance qui nous ont toujours motivés à poursuivre nos objectifs.
À nos camarades d'études, avec qui nous avonspartagé de nombreuses années d'apprentissage, d'efforts, de travail et de réussite.
À nos collègues de la résidence universitaire, pour les moments de solidarité, d'entraide, de fraternité et de convivialité.
À tous nos amis, qui nous ont soutenus, encouragés et accompagnés durant cette expérience universitaire.
Enfin, à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire. Nous dédions ce travail avec sincérité, respect et profonde reconnaissance.

Résumé

Ce mémoire porte sur l'étude de la production du biogaz par méthanisation des déchets agro-alimentaires, avec une application expérimentale basée sur la valorisation des déjections bovines. L'objectif principal est d'évaluer le potentiel de cette technologie comme solution durable pour la gestion des déchets agro-alimentaires et la production d'une énergie renouvelable.

L'étude présente les principes fondamentaux de la méthanisation, les différentes étapes de la di-gestion anaérobie ainsi que les paramètres influençant la production du biogaz. Les technologies de digesteurs et les possibilités de valorisation énergétique du biogaz ont également été abordées.

Une application expérimentale a été réalisée à travers la conception et la fabrication d'un digesteur artisanal alimenté par des déjections bovines. Les observations obtenues ont confirmé la production effective de biogaz, mise en évidence par sa combustion. Cette expérimentation a permis de démon-trer la faisabilité technique de la valorisation énergétique des déchets agro-alimentaires à l'aide d'un système simple, économique et adapté aux conditions locales.

Les résultats obtenus montrent que la méthanisation constitue une solution prometteuse pour la valorisation des déchets agro-alimentaires, la réduction des impacts environnementaux et le dé-veloppement des énergies renouvelables en milieu rural. Cette approche contribue également à la production d'un fertilisant organique valorisable en agriculture et au renforcement de l'autonomie énergétique des exploitations agricoles.

Mots-clés : Biogaz, Méthanisation, Déchets agro-alimentaires, Digesteur, Énergie renouvelable, HSE.

Abstract

This thesis focuses on the study of biogas production through the anaerobic digestion of agri-food waste, with an experimental application based on the recovery of cattle manure. The main objective is to evaluate the potential of this technology as a sustainable solution for agri-food waste management and renewable energy production.

The study presents the fundamental principles of anaerobic digestion, its different stages, and the parameters influencing biogas production. Digester technologies and the possibilities for biogas energy recovery are also addressed.

An experimental application was carried out through the design and manufacture of a small-scale, artisanal digester fed with cattle manure. The observations obtained confirmed the effective produc-tion of biogas, demonstrated by its combustion. This experiment proved the technical feasibility of energy recovery from agri-food waste using a simple, economical system adapted to local conditions.

The results obtained show that anaerobic digestion is a promising solution for the recovery of agri-food waste, the reduction of environmental impacts, and the development of renewable energy in rural areas. This approach also contributes to the production of an organic fertilizer that can be used in agriculture, while strengthening the energy autonomy of farms.

Keywords: Biogas, Anaerobic digestion, Agri-food waste, Digester, Renewable energy, HSE.

ملخص

تركز هذه المذكرة على دراسة إنتاج الغاز الحيوي من خلال الهضم اللاهوائي للنفايات الزراعية-الغذائية، مع تطبيق تجريبي يعتمد على تثمين روث الأبقار. ويتمثل الهدف الرئيسي في تقييم إمكانات هذه التكنولوجيا كحل مستدام لتسيير النفايات الزراعية-الغذائية وإنتاج الطاقة المتجددة.

تعرض الدراسة المبادئ الأساسية للهضم اللاهوائي، ومراحله المختلفة، والعوامل المؤثرة في إنتاج الغاز الحيوي. كما يتم التطرق إلى تقنيات الهاضمات وإمكانيات استرجاع الطاقة من الغاز الحيوي.

تم إنجاز تطبيق تجريبي من خلال تصميم وصناعة هاضم صغير الحجم ويدوي الصنع، تم تزويده بروث الأبقار. وقد أكدت الملاحظات المحصل عليها الإنتاج الفعلي للغاز الحيوي، وتم إثبات ذلك من خلال احتراقه. وقد أثبتت هذه التجربة الجدوى التقنية لاسترجاع الطاقة من النفايات الزراعية-الغذائية باستعمال نظام بسيط واقتصادي ومتكيف مع الظروف المحلية.

تُظهر النتائج المتحصل عليها أن الهضم اللاهوائي يُعد حلاً واعداً لتثمين النفايات الزراعية-الغذائية، والحد من الآثار البيئية، وتطوير الطاقة المتجددة في المناطق الريفية. كما تساهم هذه المقاربة في إنتاج سماد عضوي يمكن استعماله في الزراعة، مع تعزيز الاستقلالية الطاقوية للمزارع.

الكلمات المفتاحية: الغاز الحيوي، الهضم اللاهوائي، النفايات الزراعية الغذائية، الهاضم الحيوي، الطاقة المتجددة، الصحة والسلامة والبيئة

Table des matières

Remerciement....i
Dédicace.... ii
Résumé.... iii
Abstract.... iv
Liste des figures.... v
Liste des tableaux.... vi
Liste des abréviations.... vii
Introduction générale.... 1
CHAPITRE 1 : GÉNÉRALITÉS SUR LE BIOGAZ.... 5
Introduction.... 5
1. Définition et composition du biogaz.... 6
2. Principe de la méthanisation.... 6
2.1 Les types de méthanisation.... 7
2.2 Les principaux objectifs de la méthanisation.... 7
2.3 Les intrants utilisables dans la méthanisation.... 7
2.4 Les inconvénients de la méthanisation.... 8
3. Types de déchets agro-alimentaires valorisables.... 8
3.1 Effluents d'élevage.... 10
3.2 Déchets de l'industrie agro-alimentaire.... 11
3.3 Biodéchets de restauration et ménagers.... 11
3.4 Résidus de cultures et coproduits végétaux.... 11
4. Produits issus de la méthanisation.... 11
5. Avantages de la production de biogaz.... 13
6. Les limites de la production de biogaz.... 14
6.1 Limites techniques.... 15
6.2 Limites économiques.... 15
6.3 Limites environnementales.... 15
6.4 Limites réglementaires et institutionnelles.... 16
6.5 Limites spécifiques à l'Algérie.... 16
Conclusion.... 17
CHAPITRE 2 : PROCESSUS DE PRODUCTION DU BIOGAZ.... 19
Introduction.... 19
1. Collecte et préparation des déchets.... 19
1.1 Collecte des déchets.... 19
1.2 Tri des déchets.... 19
1.3 Valorisation des déchets.... 20
1.4 Élimination des déchets.... 20
2. Étapes de la digestion anaérobie.... 21
2.1 Hydrolyse.... 21
2.2 Acidogénèse.... 21
2.3 Acétogénèse.... 22
2.4 Méthanogénèse.... 22
3. Technologies de digesteurs.... 23
3.1 La classification des biodigesteurs.... 23
4. Les conditions opératoires influençant la méthanisation.... 25
4.1 Le pH.... 25
4.2 La température.... 26
4.3 Temps de séjour.... 26
5. Valorisation du biogaz.... 27
5.1 Processus de valorisation du biogaz.... 27

Conclusion 30
CHAPITRE 3 : ANALYSE DES RISQUES HSE 31
Introduction 32
1. Identification des dangers 32
1.1 Risques chimiques 32
1.2 Risques biologiques 34
1.3 Risques physiques 35
2. Évaluation des risques : méthodes d'analyse 36
2.1 Méthode APR 36
2.2 Méthode HAZOP 37
2.3 Comparaison entre les méthodes 38
3. Impacts environnementaux potentiels 39
3.1 Impact sur la qualité de l'air 39
3.2 Impact sur les ressources en eau 41
3.3 Impact sur les sols 44
3.4 Impacts sur la santé et la sécurité des travailleurs 47
Conclusion 49
CHAPITRE 4 : FABRICATION D'UN DIGESTEUR DE MÉTHANISATION 50
Introduction 51
4. 1 Généralités sur la méthanisation 51
4.2 Présentation du digesteur réalisé 51
4.3 Matière première 52
4.4 Fermentation en cours 53
4.5 Matériel nécessaire 54
4.6 Conception du digesteur 54
4.7 Étapes de fabrication 55
4.8 Fonctionnement biologique 55
4.9 Production et utilisation du biogaz 56
4.10 Avantages du système 57
4.11 Limites et recommandations 58
Conclusion 58
Conclusion générale 59
Références bibliographiques 62

Liste des figures

Numéro	Titre de la figure	Page
Figure 1	Production de déchets	9
Figure 2	Classification des déchets	10
Figure 3	Produits issus de la méthanisation	13
Figure 4	Étapes de la digestion anaérobie	22
Figure 5	Digesteur humide et continu	24
Figure 6	Digesteur en mode discontinu	25
Figure 7	Valorisation du biogaz	30
Figure 8	Émanations gazeuses liées au lisier	34
Figure 9	Digesteur assemblé	52
Figure 10	Décréments de vaches	53
Figure 11	Matières organiques en décomposition	53
Figure 12	Production du biogaz	56

Liste des tableaux

Numéro	Titre du tableau	Page
Tableau 1	Teneurs des principaux composants du biogaz agricole	6
Tableau 2	Tableau récapitulatif des avantages du biogaz	14
Tableau 3	Analyse Préliminaire des Risques (APR)	37
Tableau 4	Analyse HAZOP	38
Tableau 5	Risques liés à la sécurité des travailleurs	49

Liste des abréviations

Abréviation	Signification
ADEME	Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
AGV	Acides Gras Volatils
APR	Analyse Préliminaire des Risques
ATEX	Atmosphère Explosive
bioGNL	Biométhane Naturel Liquéfié
bioGNV	Biogaz / Gaz Naturel pour Véhicules
BLEVE	Explosion de vapeur en expansion de liquide en ébullition
C/N	Rapport Carbone/Azote
CH4	Méthane
CO	Monoxyde de carbone
CO2	Dioxyde de carbone
COV	Composés Organiques Volatils
dB(A)	Décibel pondéré A
H2	Dihydrogène
H2O	Eau
H2S	Sulfure d'hydrogène
HAZOP	Hazard and Operability Study / Étude de Dangers et d'Opérabilité
HSE	Hygiène, Sécurité et Environnement
ICPE	Installations Classées pour la Protection de l'Environnement
LIE	Limite Inférieure d'Explosivité
N2	Diazote
N2O	Protoxyde d'azote
NH3	Ammoniac
Nm3	Normo-mètre cube
NOx	Oxydes d'azote
NF	Norme Française
O2	Dioxygène
pH	Potentiel Hydrogène
PM2,5	Particules fines de diamètre aérodynamique inférieur à 2,5 micromètres
PVC	Polychlorure de vinyle
SOx	Oxydes de soufre

Introduction générale

Introduction générale

La question énergétique et la question environnementale, longtemps traitées séparément dans les politiques publiques et les travaux académiques, se sont progressivement imposées comme les deux faces d'un même défi civilisationnel. La dépendance mondiale aux combustibles fossiles engendre des émissions de gaz à effet de serre dont les effets sur le système climatique terrestre sont désormais documentés avec une précision scientifique irréfutable. Face à cette réalité, la communauté scientifique s'accorde sur la nécessité de développer des sources d'énergie alternatives et durables, parmi lesquelles le biogaz occupe une place croissante en raison de sa double capacité à valoriser les déchets organiques tout en produisant une énergie renouvelable. L'essor de cette filière s'inscrit dans un contexte mondial de prise de conscience progressive des limites des modèles énergétiques fondés sur les hydrocarbures. [1]

La production croissante de déchets organiques issus des activités humaines agricoles, industrielles, alimentaires constitue l'autre versant de ce défi. Lorsqu'ils ne sont pas gérés de manière rationnelle, ces déchets génèrent des externalités environnementales considérables : pollution des sols, contamination des ressources en eau, émissions diffuses de méthane et dégradation de la qualité de l'air. La digestion anaérobie des déchets organiques agro-alimentaires constitue une réponse cohérente à ces deux problématiques simultanément, en transformant une charge environnementale en ressource énergétique valorisable. Cette convergence entre gestion des déchets et production d'énergie renouvelable est précisément ce qui confère à la filière biogaz sa pertinence stratégique dans le contexte du développement durable.[2]

L'Algérie occupe à cet égard une position particulièrement significative. Pays producteur et exportateur d'hydrocarbures, elle tire historiquement l'essentiel de ses recettes extérieures et de sa production d'électricité du gaz naturel, lequel représente 65 % de son mix énergétique national et 99 % de sa production d'électricité. [3] Mais cette dépendance est aujourd'hui devenue une vulnérabilité structurelle, à mesure que la consommation intérieure croît sous l'effet de la pression démographique tandis que les capacités de production stagnent. En réponse, l'État algérien a engagé une stratégie de transition énergétique visant à porter la capacité installée en énergies renouvelables à 15 gigawatts d'ici 2035.[4]

Dans ce cadre, la valorisation des déchets organiques pour produire du biogaz représente un gisement encore largement inexploité : l'Algérie dispose de 197 centres d'enfouissement techniques pouvant être exploités pour la production de biogaz, auxquels s'ajoutent les déchets d'un secteur agro-alimentaire qui compte près de 23 000 entreprises et représente 45 % de la production industrielle nationale. Les déjections bovines issues de l'élevage représentent dans ce contexte un substrat de premier choix, car elles contiennent une microflore anaérobie naturellement adaptée au démarrage rapide de la fermentation, avec un potentiel méthanogène spécifique compris entre 150 et 300 Nm^3 de CH_4 par tonne de matière organique volatile.[5]

Le biogaz, produit de la digestion anaérobie de ces substrats, est un mélange gazeux composé principalement de méthane et de dioxyde de carbone dont les propriétés énergétiques et environnementales ont été largement caractérisées dans la littérature. Il représente l'une des rares sources d'énergie renouvelable capable de produire de l'énergie de manière continue et indépendante des conditions météorologiques, ce qui lui confère un avantage comparatif décisif par rapport au solaire et à l'éolien pour les applications rurales et agricoles. [6]

Cependant, la production de biogaz n'est pas une activité sans risques. Une analyse portant sur 75 accidents survenus dans des unités de biogaz entre 1990 et 2023 a montré que les explosions de méthane représentent près de 70 % des accidents recensés, avec 51 victimes fatales sur la période étudiée.[7]

Cette réalité accidentelle impose, au-delà de la seule optimisation du rendement énergétique, une analyse rigoureuse des risques en matière d'Hygiène, de Sécurité et d'Environnement la démarche HSE qui conditionne la viabilité et la légitimité sociale de toute installation de ce type.

C'est dans ce contexte que s'inscrit le présent mémoire, dont l'objectif est double : analyser de manière systématique la production de biogaz à partir de déchets agro-alimentaires sous le prisme de la sécurité industrielle et de la protection de l'environnement, et valider expérimentalement la faisabilité du procédé à travers la conception et la réalisation concrète d'un prototype de digesteur artisanal alimenté par des déjections bovines. Les digesteurs à petite échelle construits à partir de matériaux accessibles constituent une voie d'accès réaliste à la technologie biogaz pour les exploitations agricoles des pays en développement, à condition que leur conception respecte les principes fondamentaux de l'étanchéité, de la régulation de pression et du contrôle des conditions biologiques de la fermentation — principes qui guident précisément la démarche expérimentale de ce travail.

Ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres complémentaires. Le premier chapitre pose les bases conceptuelles de la filière biogaz : définition et composition du gaz produit, mécanismes biologiques de la méthanisation, catégories de déchets agro-alimentaires valorisables, nature des produits issus du procédé biogaz et digestat et bilan objectif des avantages et des limites de cette filière. Le deuxième chapitre examine en détail le processus de production, depuis la collecte et la préparation des substrats jusqu'à la valorisation énergétique du biogaz, en passant par les quatre phases biochimiques de la digestion anaérobie, les technologies de digesteurs disponibles et les paramètres opératoires déterminants température, pH et temps de séjour. Le troisième chapitre constitue le cœur analytique de ce travail : il développe une analyse HSE complète de l'installation, en identifiant les dangers chimiques, biologiques et physiques, en les évaluant à l'aide des méthodes reconnues APR et HAZOP, et en examinant les impacts potentiels sur la qualité de l'air, les ressources en eau, les sols et la santé des travailleurs. Enfin, le quatrième et dernier chapitre présente la fabrication d'un digesteur artisanal de méthanisation des déjections de vache, depuis le matériel nécessaire et la conception du dispositif jusqu'aux étapes de fabrication, au fonctionnement biologique, à la production du biogaz, aux avantages, aux limites et aux recommandations pratiques.

CHAPITRE 1

GÉNÉRALITÉS SUR LE BIOGAZ

Introduction

Le biogaz occupe aujourd'hui une place croissante dans les stratégies de transition ènergétique, non seulement parce qu'il constitue une source d'énergie renouvelable et locale, mais aussi parce qu'il offre une réponse concrète au problème de la gestion des déchets organiques. Avant d'aborder les aspects techniques et sécuritaires de sa production, il est indispensable de poser les bases conceptuelles qui structurent l'ensemble de ce travail. Ce chapitre présente donc les fondements du biogaz : sa nature, sa composition, le mécanisme biologique qui le génère, les matières premières qui l'alimentent, ainsi que les produits qui en sont issus. Il se termine par un bilan objectif des avantages et des limites de cette filière, afin de situer honnêtement son potentiel dans un contexte industriel et environnemental réel.

1. Définition et composition du biogaz

Le biogaz est le produit de la dégradation de la matière organique, d'origine animale ou végétale, par des microorganismes dans des conditions dites « anaérobies », c'est-à-dire en l'absence d'oxygène.

Le phénomène est très largement observable dans la nature. Le savant italien Alessandro Volta (1745–1823) a ètè le premier à décrire et à analyser la composition du « gaz des marais ». En 1776, il en isole le composant majeur : le méthane. Les archaebactéries méthanogènes, qui sont présentes dans la nature, sont les organismes vivants producteurs du méthane. Ces mêmes bactéries ont produit le méthane conservé dans les terrains sédimentaires, qui est extrait sous forme de « gaz naturel ». Ce procédé de production fermentaire est appelé méthanisation.

La composition du biogaz varie de façon importante selon les types de matières organiques digérées et les conditions de leur dégradation.

Typiquement, le biogaz extrait des décharges d'ordures, où il est naturellement produit, est composé de 35 à 65 % de méthane (CH_4), 15 à 50 % de gaz carbonique (CO_2), 4 à 40 % d'azote et 0 à 5 % d'oxygène. Le gaz carbonique est un coproduit normal des réactions qui conduisent à la formation du méthane.

Dans certaines conditions, les réactions peuvent aussi accumuler de l'hydrogène et certains gaz mineurs comme le sulfure d'hydrogène, produit de dégradation des protéines. La composition du biogaz produit dans les conditions maîtrisées et contrôlées des digesteurs anaérobies industriels peut atteindre 45 à 75 % de méthane, 30 à 40 % de gaz carbonique et quelques traces d'azote (< 0.2 %). [8]

Le méthane (CH_4) est le composant majoritaire du biogaz. Il possède une forte valeur ènergétique (802 kJ/mol) ainsi qu'un pouvoir de réchauffement global très èlevé, environ 25 fois supérieur à celui du CO_2.

Le dioxyde de carbone (CO_2) est un gaz non corrosif n'ayant pas de valeur ènergétique. Pour une valorisation sur chaudière ou sur moteur de cogénération, il est conservé. En revanche, pour une

valorisation en biogaz carburant ou pour l'injection sur le réseau de gaz, il doit être retiré par des systèmes d'épuration.

L'hydrogène sulfuré (H_2S) est un gaz issu du catabolisme des acides aminés soufrés. C'est un gaz dangereux, car son inhalation peut être mortelle. Lors de sa combustion, il engendre des composés acides qui endommagent les èléments de valorisation, notamment les chaudières et les moteurs.

La vapeur d'eau (H_2O) est ègalement présente dans le biogaz. Généralement à saturation dans le biogaz brut, elle peut, lorsqu'elle passe à l'état liquide, endommager les èléments de valorisation du biogaz, tels que les èlectrovannes, les détendeurs et les brûleurs.

Des siloxanes peuvent aussi être trouvés dans le biogaz. Il s'agit de dérivés du silicium issus, le plus souvent, de la dégradation de produits cosmétiques. Les biogaz de décharges sont souvent riches en siloxanes, tandis que les biogaz agricoles en sont généralement exempts. Ces composés peuvent être très nuisibles aux èquipements de valorisation, car ils se vitrifient à haute température dans les corps de chauffe des chaudières biogaz ou dans les cylindres des moteurs de cogénération. [9]

Le tableau ci-dessous représente les variations de composition d'un biogaz.

Produits	**Formules chimiques**	**Teneurs moyennes dans un biogaz**
Méthane	CH_4	50 à 75 %
Dioxyde de carbone	CO_2	25 à 45 %
Sulfure d'hydrogène	H_2S	0 à 2 %
Ammoniac	NH_3	< 0,1%
Azote	N_2	0 à 2 %
Hydrogène	H_2	0,1 à 1 %
Monoxyde de carbone	CO	< 0,1%
Oxygène	O_2	0 à 2 %
Composés organiques volatils	COV	< 1 %
Eau	H_2O	2 à 7%

TABLEAU 1 – Teneurs des principaux composants du biogaz agricole (ministère de l'agriculture)

2. Principe de la méthanisation

La méthanisation est le processus naturel biologique par lequel la matière organique est dégradée en absence d'oxygène (anaérobie). Le traitement se fait à différentes températures, selon la composition physico-chimique des biodéchets :

— le traitement mésophile;
— le traitement thermophile.

La méthanisation permet une double valorisation des biodéchets : une valorisation matière et une valorisation ènergétique.

Une partie de la matière organique est transformée en un produit humide, riche en matière organique, appelé digestat. Il est généralement déshydraté et mis en tunnels de maturation pour achever la réaction anaérobie et commencer la phase de compostage. Le digestat devient alors un sous-produit traité et stabilisé. Sa richesse en azote lui confère une valeur intéressante pour l'amendement. Le digestat peut être utilisé pour des cultures alimentaires ou non alimentaires (espaces verts), selon la réglementation et la nature des produits entrants dans le processus de méthanisation. Les normes NF U 44-051 et NF U 44-095 encadrent la valorisation agronomique des digestats issus des déchets verts, des autres biodéchets alimentaires issus des ordures ménagères et des digestats de boues d'épuration.

Une autre partie est transformée en biogaz, mélange gazeux saturé en eau à la sortie du digesteur et composé essentiellement de méthane (CH_4). Cette source d'énergie renouvelable est stockable et peut être valorisée de multiples façons. [11]

2.1 Les types de méthanisation

- **Méthanisation agricole :** à la ferme, pour valoriser les déchets agricoles et produire de l'énergie.
- **Méthanisation industrielle :** utilisée par les grandes entreprises pour traiter les déchets agroalimentaires ou industriels.
- **Méthanisation territoriale :** à l'échelle locale, regroupant plusieurs acteurs (collectivités, agriculteurs, industries).
- **Méthanisation urbaine :** pour les déchets ménagers et les boues d'épuration. [12]

2.2 Les principaux objectifs de la méthanisation

- produire de l'énergie renouvelable (électricité, chaleur ou biométhane injecté dans le réseau de gaz) ;
- valoriser les déchets organiques en èvitant leur mise en décharge ;
- réduire les èmissions de gaz à effet de serre, notamment le méthane issu des déjections agricoles ;
- créer un fertilisant naturel à partir du digestat pour les cultures agricoles. [12]

2.3 Les intrants utilisables dans la méthanisation

- **Déchets agricoles :** lisiers, fumiers, résidus de cultures ;
- **Déchets alimentaires :** invendus, restes de production agroalimentaire ;
- **Déchets ménagers :** biodéchets issus des collectes sélectives;
- **Boues d'épuration :** provenant des stations d'épuration ;
- **Cultures ènergétiques :** maïs, herbe, etc. (utilisées en complément).[12]

2.4 Les inconvénients de la méthanisation

- **Coût èlevé des installations.**
  - investissement initial important (plusieurs centaines de milliers à millions d'euros) ;
  - nécessite des aides financières pour être rentable.
- **Gestion complexe des intrants et du digestat.**
  - nécessité d'un èquilibre précis des matières pour garantir un bon rendement, en èvitant les excès d'intrants riches en azote ou en graisse ;
  - stockage et valorisation du digestat pouvant être contraignants.
- **Nuisances potentielles.**
  - odeurs, parfois sources de conflits avec les riverains ;
  - transport des déchets, avec une augmentation possible du trafic routier autour des unités.
- **Problèmes d'acceptabilité locale.**
  - certains projets sont mal accueillis par les habitants, en raison des craintes liées aux nuisances et aux impacts paysagers ;
  - nécessité d'une concertation locale et d'une communication claire sur les avantages.
- **Rendement variable.**
  - dépend des intrants utilisés : les déchets agricoles offrent généralement un meilleur rendement que les boues d'épuration ;
  - les pannes ou dysfonctionnements peuvent impacter la production ènergétique.[12]

3. Types de déchets agro-alimentaires valorisables

Définition de déchets

Le terme déchet peut avoir plusieurs définitions selon le contexte et aussi le niveau législatif. Il varie d'un auteur à un autre et d'un pays à un autre. D'après le Programme des Nations unies pour le développement et l'article 3 du Journal officiel de la République algérienne de la loi n° 01-19 du 19 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets, un déchet est défini comme : « tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation et plus généralement toute substance ou produit et tout bien meuble dont le propriétaire ou le détenteur se défait, projette de se défaire, ou dont il a obligation de se défaire ou de l'éliminer ».

Notamment, ce terme prend différentes significations du point de vue èconomique, juridique, sociologique, politique, environnemental et systémique. Parmi celles-ci, on retient surtout les définitions qui mettent en exergue la valeur èconomique du déchet et l'enjeu juridique qui entoure sa gestion future.[13]

Définition èconomique

Un déchet est défini sur le plan èconomique comme une matière ou un objet dont la valeur èconomique est nulle ou négative pour son détenteur, à un moment et dans un lieu donnés. Pour s'en débarrasser, ce dernier doit soit le faire lui-même, soit payer quelqu'un pour effectuer cette

opération. Bien que cette définition ne soit pas exhaustive, elle exclut une bonne part des déchets recyclables, qui possèdent une valeur èconomique et peuvent servir de matières premières secondaires pour la production d'autres produits, voire de biens utiles à la communauté, aussi bien dans les pays développés ou industrialisés que dans ceux en développement.[13]

Production de déchets

La production des déchets peut être d'origine biologique, chimique, technologique (lacunes dans le processus qui génèrent le déchet), ou encore écologique, lorsque les traitements de pollution et de réduction entraînent eux-mêmes des déchets. Les économistes ont établi une corrélation entre le volume et le contenu des déchets et le dégrée de d'développement d'une nation ou d'une « civilisation ». Plus un pays produit de déchets, plus son potentiel socio-économique est généralement élève. Il en résulte une société de consommation et, par conséquent, un gaspillage non contrôle. Cette ronde infernale, qui consiste en une production et une destruction accélérées des objets fabriques, doit s'arrêter.[14]

R'eduction du CO_2 : $CO_2 + 4\ H_2 \rightarrow CH_4 + 2\ H_2O$.

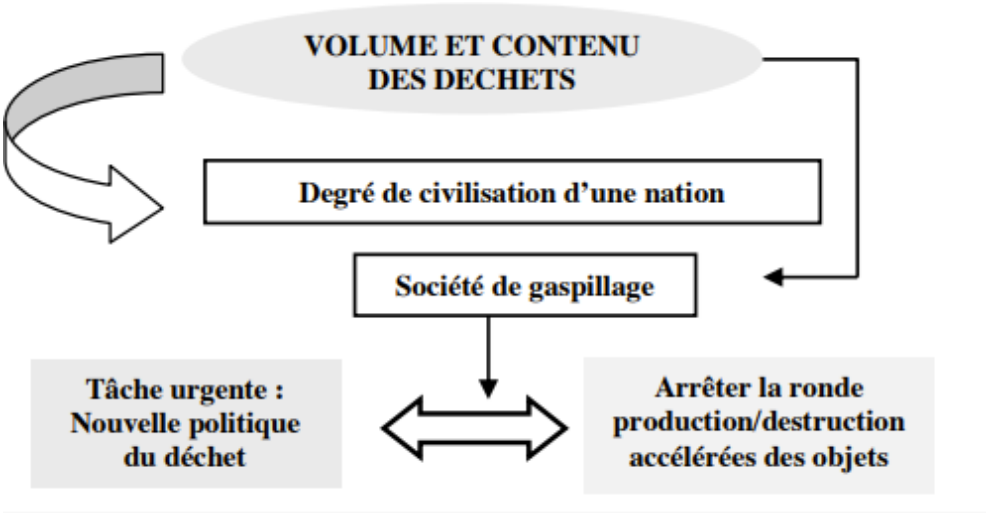

FIGURE 1 – Production de déchets

Classification des déchets

Les différentes catégories de déchets sont répertoriées dans une « nomenclature » relevant d'un d'ecret relatif à la classification des déchets. Cette classification permet d'identifier chaque d'echet. Composée de six chiffres, elle est fonction de l'origine et de la nature du d'echet. Les déchets peuvent être classes en deux grandes catégories : [14]

a) D'après leur origine :
- — déchets ménagers et assimil'es ;
- — déchets industriels (banals ou dangereux).

b) D'après leur nature :
- — dangereux ;
- — toxiques ;
- — ultimes ;
- — inertes.

FIGURE 2 – Classification des déchets inertes

Les déchets alimentaires issus de la restauration ou de l'industrie agroalimentaire sont des biodéchets valorisables en gaz vert. Selon l'ADEME, les biodéchets représentent 80 % des déchets de l'industrie agroalimentaire, 60 % des déchets de la grande distribution alimentaire et 55 % des déchets de la restauration collective. On distingue plusieurs grandes catégories de déchets agro-alimentaires valorisables par méthanisation :

3.1 Effluents d'élevage

Les lisiers, fumiers et fientes de volaille sont riches en matière organique et en azote. Ces résidus, souvent difficiles à gérer, trouvent une valorisation efficace dans les digesteurs. Ils constituent la principale matière entrante des unités de méthanisation agricoles.[16]

3.2 Déchets de l'industrie agro-alimentaire

Ce sont les sous-produits générés lors de la transformation des aliments :

— eaux usées de laiteries (petit-lait, lactosérum) ;
— graisses et huiles alimentaires usagées;
— résidus de fruits et légumes (pelures, marcs de raisin, pulpes de betterave) ;
— déchets de brasseries (drêches, levures usées) ;
— déchets de boucheries et abattoirs (sang, graisses, contenus stomacaux) ;
— produits alimentaires périmés ou déclassés.

Les sous-produits de l'industrie agro-alimentaire — pelures, marcs, graisses alimentaires et produits périmés — constituent des intrants importants pour les unités de méthanisation.[16]

3.3 Biodéchets de restauration et ménagers

La méthanisation est particulièrement adaptée aux déchets gras, sucrés ou humides, difficilement compostables en l'état. Une tonne de biodéchets permet de produire en moyenne 100 m^3 de biométhane, soit l'équivalent énergétique de 1 MWh.[17]

3.4 Résidus de cultures et coproduits végétaux

Pailles céréalières, fanes de légumes, résidus d'ensilage, tiges de maïs. . . Ces substrats sont facilement biodégradables et améliorent la production de biogaz en co-digestion.[17]

4. Produits issus de la méthanisation

La méthanisation est un processus biologique naturel qui transforme la matière organique en biogaz et en digestat, grâce à l'action de micro-organismes en l'absence d'oxygène (processus anaérobie). Elle est utilisée pour valoriser les déchets organiques (déchets agricoles, industriels ou ménagers) et produire une énergie renouvelable, le biogaz, ainsi qu'un fertilisant naturel, le digestat.

Le biogaz

Le biogaz est une source d'énergie renouvelable. Ce mélange gazeux, principalement composé de méthane (CH_4) et de dioxyde de carbone (CO_2), peut :

— être utilisé comme combustible dans une chaudière pour produire de la chaleur ;
— alimenter un moteur afin de produire à la fois de l'électricité et de la chaleur : on parle alors de cogénération ;

— servir de carburant pour les véhicules : on parle de bioGNV (Gaz Naturel pour Véhicules) ;
— être épuré et injecté dans le réseau de gaz naturel : on parle alors de biométhane.

Le biogaz est parfois utilisé directement par les agriculteurs pour sécher le foin ou chauffer une serre, et par les collectivités pour chauffer des bâtiments publics et faire fonctionner des flottes de bus roulant au bioGNV. Moins bruyants, ces bus sont aussi nettement moins polluants : ils émettent presque aucune particule fine et génèrent 80 % de CO_2 en moins.[18]

Le digestat

À la fin du processus de méthanisation, une partie de la matière organique résiduelle a été transformée en biogaz et le reste en matières minérales et organiques, représentant environ 90 % du volume entrant : c'est le digestat.

Le digestat est un fertilisant organique présentant de nombreuses qualités :

— il conserve les éléments minéraux (azote, phosphore, potassium) des matières entrantes ;
— il est plus facilement assimilable par les cultures que les matières non digérées;
— il est hygiénisé : la méthanisation se déroulant généralement pendant environ 40 jours à 38 °C, plus de 90 % des virus et bactéries sont éliminés ;
— il est débarrassé des graines d'adventices et partiellement désodorisé.[19]

Les digestats sont riches en azote, de 2 à 7 kg d'azote total par tonne de produit brut, dont environ la moitié est sous forme ammoniacale (NH_4^+), rapidement assimilable par les plantes, ce qui assure au digestat un effet fertilisant sur le court terme.[20]

Le digestat peut être séparé en deux fractions :

— **Phase solide :** riche en matière organique et en phosphore — rôle d'amendement ;
— **Phase liquide :** riche en azote ammoniacal — rôle de fertilisant minéral.

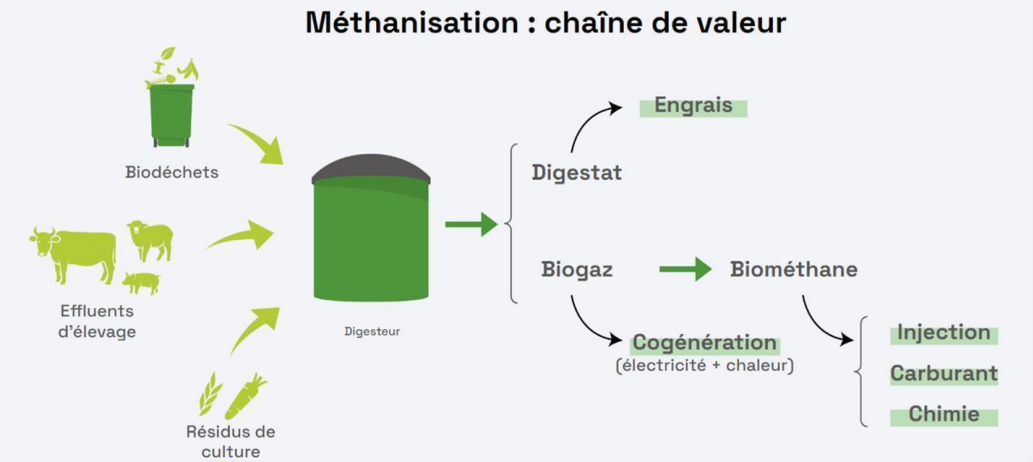

FIGURE 3 – Produits issus de la méthanisation
[21]

5. Avantages de la production de biogaz

Entre 1965 et 2000, la consommation mondiale de biogaz, principalement sous forme de biométhane, a augmenté de 3,5 % par an. Cette croissance dépasse celle de la demande globale en énergie primaire.

Voilà le tableau récapitulatif des avantages du biogaz, organisé en six catégories : climat, valorisation des déchets, environnement, emploi, diversité d'usage et rôle dans la transition énergétique.[22]

Catégorie	Avantage	Détails
Climat Faibleempreinte carbone	Jusqu'à 10× moins de CO_2 que le gaz fossile	Utilisable de manière similaire pour le chauffage ou la cuisson ; transformé en biométhane, il enrichit les réseaux de distribution de gaz existants.
Déchets Valorisation des déchets	Traitement de multiples types de déchets	Détritus domestiques, résidus agricoles, boues d'épuration — tous transformés en source d'énergie renouvelable, réduisant significativement les émissions de gaz à effet de serre.
Environnement Double bénéfice	Captage du méthane + production de compost	Le processus empêche le méthane, puissant gaz à effet de serre, de se libérer dans l'atmosphère et génère un compost, alternative écologique aux engrais chimiques.
Économie Emploi local	Création d'emplois non délocalisables	L'installation des digesteurs et la maintenance des systèmes de méthanisation stimulent l'emploi local sur le territoire.
Énergie Usages diversifiés	Flexibilité d'application remarquable	Production d'électricité et de chaleur via la cogénération, ou raffinage en biométhane injecté dans le réseau de gaz naturel — augmentant la part des énergies vertes consommées.
Transition Pilier énergétique	Complémentarité avec le réseau national	Le biométhane vient compléter l'offre énergétique nationale, offrant plus de choix aux consommateurs et renforçant la souveraineté énergétique dans le cadre du développement durable.

TABLEAU 2 – Tableau récapitulatif des avantages du biogaz

6. Les limites de la production de biogaz

La production de biogaz présente de nombreux atouts, mais elle comporte aussi des limites qu'il convient de considérer pour en apprécier objectivement la portée. Ces limites sont d'ordre technique, èconomique, environnemental, réglementaire et institutionnel. Dans le contexte algérien, elles prennent une importance particulière en raison des contraintes structurelles qui freinent encore le développement de la filière.

6.1 Limites techniques

Qualité et disponibilité des substrats. Le type et la composition du substrat déterminent directement le rendement en biogaz. Le rapport carbone/azote (C/N) constitue un facteur clé : un déséquilibre peut provoquer une accumulation d'ammoniac nuisible aux micro-organismes et perturber, voire bloquer, la méthanisation. Le rapport optimal se situe généralement entre 20 et 30.[23]

Impuretés du biogaz brut. Le biogaz brut contient, en plus du méthane, du CO_2, du sulfure d'hydrogène (H_2S), de la vapeur d'eau, des siloxanes, de l'ammoniac et des composés organiques volatils. Ces impuretés diminuent la valeur calorifique du gaz, favorisent la corrosion ou l'usure des èquipements et peuvent entraîner des effets environnementaux et sanitaires si le biogaz n'est pas èpuré avant son utilisation.[24]

Fuites de méthane. Les fuites de méthane constituent une limite importante, car elles peuvent réduire fortement l'intérêt climatique de la filière. Une mauvaise ètanchéité des digesteurs, des stockages ou des réseaux internes compromet le bilan environnemental global du biogaz.[25]

Lenteur de l'étape d'hydrolyse. La digestion anaérobie ralentit souvent en fin de processus, notamment sous l'effet de l'augmentation du pH liée à l'accumulation d'ammoniac, de la présence de matières difficilement biodégradables et d'une forte teneur en solides fixes. L'hydrolyse est ainsi considérée comme l'étape limitante du processus.[26]

6.2 Limites èconomiques

Coût de production èlevé. L'une des principales limites du biogaz demeure son coût de production, souvent supérieur à celui des ènergies conventionnelles. Ce coût s'explique par les charges liées à la collecte des intrants, à l'exploitation des unités et à l'èpuration du biogaz lorsque celui-ci doit être valorisé sous forme de biométhane.[26]

Investissements lourds en infrastructure. La construction et la maintenance des installations de méthanisation, ainsi que des systèmes de purification et de stockage du biogaz, exigent des investissements importants. Les déchets doivent en outre être collectés, triés et traités dans des conditions adaptées afin d'assurer un fonctionnement efficace de l'installation.[27]

Rentabilité encore modeste. Dans de nombreux cas, la rentabilité des installations reste insuffisante sans soutien extérieur. Le développement de la filière dépend donc souvent d'aides publiques, de tarifs d'achat incitatifs ou de mécanismes de soutien permettant de sécuriser les projets sur le long terme.[28]

6.3 Limites environnementales

Compétition avec les terres agricoles. L'utilisation de cultures ènergétiques dédiées peut entraîner une concurrence avec les productions alimentaires et accentuer la pression sur les terres

agricoles. Dans certains cas, la conversion de terres naturelles ou forestières en terres cultivées peut aussi libérer du carbone stocké et réduire, voire annuler, le bénéfice climatique attendu.[29]

Limites sur l'usage des cultures dédiées. Pour èviter ces dérives, certains pays encadrent strictement la part des cultures principales dans l'alimentation des méthaniseurs. Cette limite vise à préserver la vocation alimentaire des terres et à privilégier l'emploi de déchets, de résidus ou de coproduits organiques.

Impact climatique net parfois incertain. ², son avantage environnemental peut diminuer en cas de fuites de méthane, de transport excessif des intrants ou de mauvaise gestion du digestat. La durabilité de la filière dépend donc fortement des conditions réelles d'exploitation.

6.4 Limites réglementaires et institutionnelles

Procédures d'autorisation longues. Les projets de biogaz sont souvent soumis à plusieurs cadres réglementaires à la fois, notamment en matière d'environnement, d'agriculture, d'urbanisme et de gestion des déchets. Cette superposition peut rallonger les délais d'autorisation et ralentir la concrétisation des projets.[30]

Acceptabilité sociale. L'acceptabilité locale constitue un autre frein important. Les riverains redoutent parfois les nuisances potentielles, notamment les odeurs, l'augmentation du trafic routier ou les impacts paysagers. Une concertation en amont et une communication claire sont donc indispensables pour favoriser l'adhésion aux projets.[30]

6.5 Limites spécifiques à l'Algérie

En Algérie, malgré un potentiel important en matière de valorisation des déchets organiques et de production de biogaz, la filière reste encore faiblement développée. Cette situation s'explique par plusieurs contraintes structurelles et institutionnelles qui limitent son essor.

Les principaux freins identifiés sont les suivants :

- absence de cadre réglementaire spécifique au biogaz ;
- manque de financement et de mécanismes d'incitation, tels que les tarifs de rachat ou les subventions ;
- faiblesse de la filière industrielle locale en matière d'équipements et d'expertise technique;
- priorité accordée au gaz naturel fossile, ressource abondante et stratégique dans l'économie nationale ;
- faible sensibilisation des collectivités locales et des agriculteurs au potentiel de la méthanisation.[31]

Le développement du biogaz en Algérie nécessite ainsi la mise en place d'un cadre réglementaire adapté, de mécanismes de soutien èconomique, d'actions de formation et de sensibilisation, ainsi

qu'une meilleure intégration de cette filière dans la stratégie nationale de transition ènergétique.

Conclusion

Au terme de ce premier chapitre, plusieurs enseignements se dégagent clairement. La production de biogaz à partir de déchets agro-alimentaires repose sur un èquilibre biologique fragile, où chaque perturbation qu'il s'agisse d'une surcharge organique, d'une variation de température ou de la présence d'un substrat inhibiteur peut compromettre l'ensemble du procédé. Cet èquilibre n'est pas théorique : il se traduit quotidiennement par des décisions opérationnelles concrètes, des ajustements de charge, des corrections de pH et des choix judicieux de co-substrats.

CHAPITRE 2

PROCESSUS DE PRODUCTION DU BIOGAZ

Introduction

Le processus de production du biogaz repose sur la transformation des matières organiques en ènergie renouvelable grâce à la digestion anaérobie. Ce chapitre présente les différentes ètapes nécessaires à cette production, en commençant par la collecte et la préparation des déchets organiques. Ensuite, les phases de la digestion anaérobie ainsi que les principales technologies de digesteurs, qu'elles soient continues, discontinues, sèches ou humides, seront ètudiées. Les conditions opératoires influençant le rendement du procédé, telles que la température, le pH et le temps de séjour, seront ègalement abordées. Enfin, les différentes méthodes de valorisation du biogaz produit seront présentées.

1. Collecte et préparation des déchets

Selon l'article 03 de la loi 01-19, la gestion des déchets consiste en toute opération relative à la collecte, au tri, au transport, au stockage, à la valorisation et à l'élimination des déchets, y compris le contrôle de ces opérations. À partir de cette définition, plusieurs opérations se distinguent dans le mode de gestion des déchets existant en Algérie.[32]

1.1 Collecte des déchets

La collecte des déchets est l'opération de ramassage et/ou de regroupement des déchets en vue de les transférer vers un lieu de traitement.[32]

Elle consiste à enlever les déchets présentés dans les bacs ou sur les points de regroupement (conteneurs) prévus à cet effet. Ils sont ensuite acheminés vers les différentes filières de traitement. La collecte est très dépendante de la précollecte et, notamment, du matériel utilisé. Le coût d'acquisition de ce matériel est assez èlevé, voire dissuasif dans les pays en développement. Il est donc important qu'il soit adapté aux conditions locales.[33]

Les grands principes de la collecte des déchets urbains sont indissociables des filières de traitement, et notamment de la qualité des produits valorisés, comme dans la filière du compostage. La col-lecte traditionnelle des déchets urbains est le système de gestion le plus fréquent dans les pays en développement. Dans certains quartiers, elle fluctue en fonction des dispositions mises en place. Actuellement, il existe différents modes de collecte.[33]

— la collecte en apport volontaire
— la collecte en porte-à-porte

1.2 Tri des déchets

Le tri des déchets consiste en la séparation des déchets selon leur nature afin de faciliter leur traitement. Il peut concerner, par exemple, le papier, le plastique, le verre ou encore les matières

organiques.[32]

1.3 Valorisation des déchets

La valorisation des déchets correspond à leur réutilisation, à leur recyclage ou à leur compostage, dans le but de réduire les quantités de déchets à èliminer et de tirer profit de leur potentiel matière ou ènergétique.

1.3.1 Recyclage

La valorisation matière, appelée communément recyclage ou recyclage matière, est une opération visant à introduire, aux fins de leurs fonctions initiales ou à d'autres fins, les matériaux provenant de déchets dans un cycle de production, en remplacement total ou partiel d'une matière première vierge.

Ce mode de traitement concerne surtout le verre, le papier-carton, les emballages et les métaux. Ces déchets font l'objet d'une collecte séparative déjà bien ètablie depuis longtemps, suivie d'un traitement spécifique de valorisation sous forme de recyclage. Il s'agit d'une récupération de matière, sans véritable transformation.[32]

1.3.2 Compostage

Le compost provient de la transformation aérobie des déchets organiques par le biais de micro-organismes. Le produit obtenu se transformera ensuite dans le sol en humus, très utile en agriculture.[32]

1.3.3 La méthanisation

Elle constitue une forme de valorisation ènergétique par la biodégradation de la matière organique des déchets, conduisant à la libération d'un biogaz.

1.4 Elimination des déchets

Selon l'article 03 de la loi 01-19, l'élimination des déchets comprend toutes les opérations de traitement thermique, physico-chimique et biologique, de mise en décharge, d'enfouissement, d'immersion et de stockage des déchets, ainsi que toutes les autres opérations ne débouchant pas sur une possibilité de valorisation ou sur une autre utilisation du déchet.[32]

2. Etapes de la digestion anaérobie

Ce processus métabolique est l'un des plus anciens à avoir été développés par les organismes vivants. Il aurait existé il y a très longtemps, à une période où l'oxygène n'était pas encore massivement présent dans l'atmosphère et où la Terre constituait essentiellement un milieu réducteur. Certaines études estiment l'apparition des organismes méthanogènes entre 4,11 et 3,78 milliards d'années avant notre ère.[34]

La méthanisation, encore appelée digestion anaérobie, est une technologie fondée sur la dégradation de la matière organique par des micro-organismes, dans des conditions contrôlées et en l'absence d'oxygène. Il s'agit donc d'une réaction se déroulant en milieu anaérobie, contrairement au compostage qui repose sur une réaction aérobie.

Cette dégradation aboutit à la production :

— d'un produit humide, riche en matière organique partiellement stabilisée, appelé digestat.
— et de biogaz.

La digestion anaérobie se déroule selon une succession de quatre ètapes distinctes, chacune possédant sa population microbienne caractéristique. Les extrants produits par chaque population deviennent les intrants de la population suivante. De cette façon, les molécules complexes sont métabolisées jusqu'à leur minéralisation, c'est-à-dire leur transformation en méthane et en CO_2. Ces ètapes sont : l'hydrolyse, l'acidogénèse, l'acétogénèse et la méthanogénèse.[35]

2.1 Hydrolyse

Lors de l'hydrolyse, les macromolécules organiques sont transformées en produits plus petits. Les composés de haut poids moléculaire, comme les polysaccharides, les lipides, les protéines et les acides nucléiques, sont ainsi convertis en substances plus simples. Cette ètape conduit notamment à la formation de monosaccharides, comme le glucose, d'acides gras, d'acides aminés et de bases azotées.[35]

2.2 Acidogénèse

Au cours de l'acidogénèse, les monomères issus de l'ètape précédente sont convertis en acides gras volatils, en alcools, en acides organiques, en hydrogène et en CO_2. Cette phase se déroule généralement de 30 à 40 fois plus rapidement que l'hydrolyse. À son terme, on retrouve notamment de l'éthanol ainsi que les acides acétique, propionique, butyrique, valérique et lactique.[35]

2.3 Acétogénèse

L'acétogénèse unifie et simplifie la filière chimique, car les substances issues des processus antérieurs y sont transformées en acétate, en H_2 et en CO_2. Cette ètape précède directement la méthanogénèse et prépare les substrats nécessaires à la production de méthane.[35]

2.4 Méthanogénèse

La méthanogénèse constitue la dernière ètape de la minéralisation des substances organiques. Les acétates, les formates, le H_2 et le CO_2 y sont transformés en méthane. Cette phase est habituellement la plus délicate de la digestion anaérobie, car les organismes méthanogènes sont plus sensibles aux variations de pH et présentent un taux de croissance plus lent que celui des micro-organismes intervenant dans les autres ètapes.[35]

Les principales réactions de la méthanogénèse peuvent être présentées comme suit :

— **Réduction du CO_2 :** $CO_2 + 4\ H_2 \rightarrow CH_4 + 2\ H_2O$ (env. 30 % du méthane produit).
— **Décarboxylation de l'acide acétique :** $CH_3COOH + H_2O \rightarrow CH_4 + H_2CO_3$ (70 % du méthane produit).

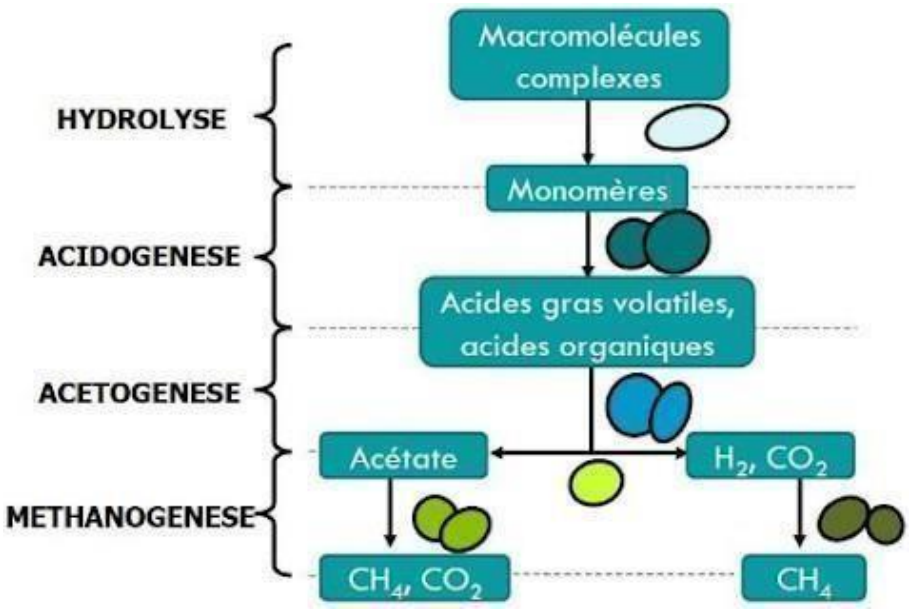

FIGURE 4 – Etapes de la digestion anaérobie

3. Technologies de digesteurs

Les digesteurs, également connus sous le nom de réacteurs de méthanisation ou de biodigesteurs, sont des installations conçues pour la dégradation biologique de la matière organique en l'absence d'oxygène (anaérobie), processus au cours duquel le biogaz est produit.[37]

Ce réacteur est composé d'une cuve fermée cylindrique ètanche à l'air et de préférence isolée thermiquement de l'extérieur, dans laquelle les micro-organismes se côtoient pour dégrader chimiquement et biologiquement les effluents organiques. Il peut être équipé d'un système de chauffage, d'un système d'agitation, d'un système de prélèvement et d'un système de mesure de teneur en gaz, ainsi que de dispositifs permettant le contrôle de différents paramètres tels que le pH, la température et la pression.

3.1 La classification des biodigesteurs

3.1.1 Le type de charges

La teneur en eau est un aspect capital pour la digestion anaérobie. La littérature indique que les procédés de biométhanisation peuvent être classés selon la siccité de la charge à l'intérieur du biodigesteur. On ètablit deux grandes approches pour la digestion anaérobie.

— Les procédés de fermentation « humide » : ici, la teneur en matière sèche organique est comprise entre 5 et 20 % [38]. Ce type de fermentation est largement utilisé dans les cas où le mélange solide-liquide de l'effluent est plus homogène (lisier, eaux usées. . .). Il est habituellement recommandé d'être dans les conditions où le substrat est formé de 10 % de matière sèche et 90 % d'eau.[39]
— Les procédés de fermentation « sèche » : ici, la teneur en matière sèche organique est généralement de 20 à 50 %. La matière se présente sous forme pâteuse ou semi-solide. Au-dessus de 55 %, on se retrouve en milieu difficilement traitable par voie microbienne, car la surface de contact des microorganismes avec la matière est réduite comparativement au procédé humide.[40]

3.1.2 Le mode de fonctionnement

Le mode continu

Ce type de mode est le plus fréquemment rencontré à l'échelle industrielle. Les réacteurs continus sont alimentés en permanence à un régime dit « nominal », qui correspond en général à un débit (ou flux de matière) constant. Le système continu fonctionne donc en permanence à volume constant d'effluent et en parallèle. Il génère et èvacue une quantité ègale de résidus digérés et de biométhane.[41]

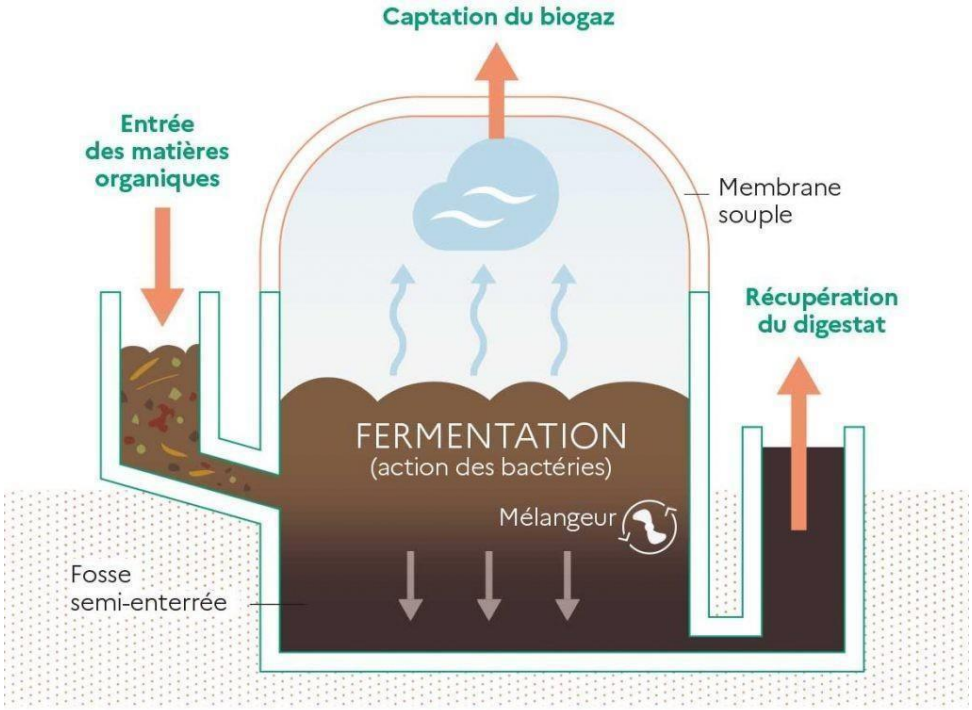

FIGURE 5 – Digesteur humide et continu

Le mode discontinu (batch)

Le fonctionnement en mode discontinu s'effectue par bâchées successives. Le digesteur est initialement rempli et ensemencé, puis la réaction se déroule sans èchange ou approvisionnement de matières avec l'extérieur. Les réactions de méthanisation sont continues durant le temps de séjour du substrat. La production de biogaz se produit ainsi en suivant une forme de cloche. Une fois la matière complètement digérée et le gaz libéré, le réacteur est vidangé et un nouveau lot est introduit pour démarrer une nouvelle fermentation[41]

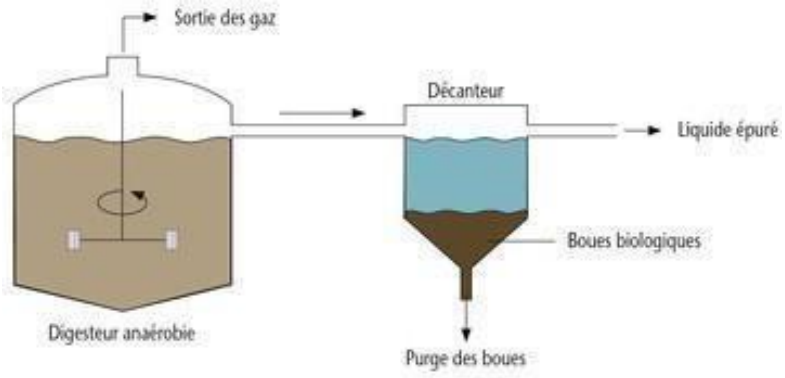

FIGURE 6 – Digesteur en mode discontinu

4. Les conditions opératoires influençant la méthanisation

Le processus de digestion anaérobie fait intervenir différents facteurs physico-chimiques qui influencent les réactions biologiques. Comme tout procédé biologique, la communauté bactérienne qui constitue le consortium méthanogène requiert des conditions particulières pour assurer une bonne activité. L'étude des procédés biologiques de méthanisation permet de différencier un certain nombre de paramètres majeurs de la digestion anaérobie à respecter.

Ces paramètres sont, entre autres, le pH, la température, la concentration en èléments nutritifs et en inhibiteurs, ainsi que le temps de séjour du digestat. Pour garantir une bonne méthanisation durant la fermentation anaérobie, il est donc important de contrôler les différents facteurs mentionnés.

4.1 Le pH

Le pH est l'un des paramètres les plus importants dans le processus de méthanisation. En effet, la survie de la population microbienne impliquée, de l'hydrolyse jusqu'à la méthanisation, dépend du pH du milieu.

Les bactéries méthanogènes responsables de la production du méthane sont très sensibles aux variations du pH. Contrôler sa stabilité durant la fermentation est donc fondamental. Un changement important de pH peut causer l'arrêt de la chaîne des réactions au cours de la digestion.

La littérature situe généralement le pH optimal de la méthanisation dans une plage proche de la neutralité, le plus souvent entre 6,7 et 8,5 selon les conditions opératoires. Ces différences de valeurs peuvent s'expliquer par plusieurs raisons.

D'abord, toutes les bactéries présentes dans le processus de méthanisation n'ont pas la même tolérance au pH. Par exemple, les bactéries du genre Methanosarcina peuvent survivre à un pH = 6,5, alors que d'autres bactéries méthanogènes voient leur activité s'interrompre à pH < 6,7. Il faut aussi ajouter que les bactéries de l'acidogénèse peuvent tolérer des pH assez bas comparativement aux bactéries méthanogènes.

Les divergences concernant le pH optimal s'expliquent aussi par la nature du substrat et la technique de digestion utilisée. En effet, le pH peut changer ou varier en raison de nombreux paramètres tels que le niveau de concentration du milieu en AGV, en bicarbonate et l'alcalinité du système. C'est pourquoi il est essentiel de contrôler et d'ajuster la valeur du pH en fonction du système choisi. Généralement, il est recommandé d'ajuster le pH de l'effluent à traiter dans la plage optimale neutre, c'est-à-dire un pH de 7,0 à 7,2, afin d'assurer un milieu tampon efficace et une bonne croissance de la communauté bactérienne présente. [44]

4.2 La température

La température est un critère important dans le processus de la méthanisation. En effet, elle affecte la cinétique de réaction et la vitesse de transformation de la matière organique. La stabilité de la température constitue donc un facteur clé pour l'efficacité de la méthanisation. Pourtant, dans la nature, le méthane peut être formé sur une large plage de températures allant de 0 à 97 °C.

En général, on peut regrouper la biométhanisation en quatre grandes plages de température où différentes catégories de bactéries assurent le processus de digestion anaérobie. La première plage de température est celle qui s'effectue préférentiellement à basse température, c'est-à-dire à une température inférieure à 20 °C. Elle met en jeu les microorganismes psychrophiles. La deuxième plage de température est celle comprise entre 20 et 30 °C. Elle est opérée par des bactéries psychrotrophes, avec un optimum à 25 °C. La troisième plage est comprise entre 30 et 40 °C. Les bactéries mésophiles sont celles qui réalisent la digestion de la matière.

Ce mode de digestion est le plus courant dans les industries. Il ne nécessite pas un grand apport en ènergie. La digestion mésophile assure une vitesse constante et une bonne stabilité de la digestion anaérobie.

De façon générale, les processus de biométhanisation mésophile et thermophile sont mieux compris et plus souvent appliqués que les autres. Il existe des températures optimales pour la méthanisation, particulièrement dans les plages mésophiles autour de 35 °C et thermophiles autour de 55 °C. Le maintien de la stabilité de la température est important, car la performance de la méthanisation est non seulement reliée à la température, mais aussi à la stabilité des enzymes mises en jeu. Il est reconnu que certaines enzymes fonctionnent dans des plages de température bien spécifiques. Au-delà de cette température spécifique, commence une phase de dénaturation de l'enzyme et une inhibition de l'activité biologique. D'où la nécessité du suivi de la température durant les processus de biométhanisation. Les bactéries méthanogènes sont les plus sensibles aux changements de température parmi les différents microorganismes impliqués dans la digestion.[44]

4.3 Temps de séjour

Le temps de séjour correspond à la durée théorique de séjour dans le digesteur des substrats avant d'être èvacués, donc à la durée de contact entre les substrats et les bactéries. Il est en général

préconisé de dimensionner l'installation pour avoir un temps de séjour compris entre 40 et 60 jours. Ainsi, lors de la phase de démarrage, il est impératif de garantir un temps de séjour minimum aux premiers substrats incorporés. L'évacuation du digestat se faisant en général par surverse, il faut que le volume dans le digesteur ne dépasse pas le niveau de surverse pendant au moins les deux premiers mois.[45]

5. Valorisation du biogaz

5.1 Processus de valorisation du biogaz

Le processus commence par la collecte de déchets organiques provenant de sources telles que les déchets agricoles, les déchets industriels, les déchets municipaux ou ménagers, ainsi que les boues d'épuration des stations d'épuration. Ces déchets organiques sont introduits dans un digesteur anaérobie, où ils subissent une dégradation biologique pour produire du biogaz brut, un mélange principalement composé de méthane (CH_4) et de dioxyde de carbone (CO_2).

Une fois le biogaz produit, il subit un processus de valorisation visant à augmenter sa concentration en méthane. Lors de cette ètape, le biogaz brut est purifié par séparation du méthane et du dioxyde de carbone, ce qui permet d'obtenir un gaz de meilleure qualité, adapté à de nombreuses utilisations. Ce processus de valorisation transforme le biogaz en deux produits principaux : le bioGNL et le bioCO_2.

Le méthane purifié, ou biométhane, est ensuite liquéfié pour produire du BioGNL (Biométhane Liquéfié). Ce biométhane liquéfié est plus facile à transporter et à stocker, ce qui en fait une source d'énergie polyvalente. Le BioGNL peut être injecté dans les réseaux de gaz naturel, offrant une alternative renouvelable aux combustibles fossiles pour la distribution résidentielle et commerciale. Il sert ègalement de carburant propre pour divers procédés industriels et peut être utilisé comme carburant renouvelable pour les véhicules, offrant ainsi une alternative durable au diesel et à l'essence conventionnels.

Parallèlement, le dioxyde de carbone séparé est ègalement capté et liquéfié, créant un produit appelé BioCO_2 (CO_2 biogénique liquéfié). Ce CO_2 purifié a de nombreuses applications dans différents secteurs. Il peut être utilisé dans les procédés industriels nécessitant du dioxyde de carbone pur, comme la transformation des aliments et la carbonatation. Dans les serres, le BioCO_2 est précieux pour favoriser la croissance des plantes en augmentant les niveaux de CO_2 dans l'environnement. De plus, le BioCO_2 liquéfié peut être transformé en glace sèche, essentielle à la réfrigération et au transport des denrées périssables.

En convertissant le biogaz en produits de valeur, ce processus contribue à une èconomie circulaire, aide à réduire les èmissions de gaz à effet de serre et favorise l'utilisation de sources d'énergie renouvelables dans diverses applications.[46]

Une fois le biogaz produit, il peut être valorisé et utilisé de diverses manières :

— **Production d'électricité et de chaleur :** le biogaz peut être brûlé dans un générateur pour

produire de l'électricité et de la chaleur, ce qui le rend utile pour les fermes, les installations industrielles et même les ménages.
- **Biométhane pour les transports :** en valorisant le biogaz pour èliminer le CO_2 et les impuretés, il peut être converti en biométhane, une forme purifiée de méthane qui convient au carburant des véhicules et peut remplacer le gaz naturel.
- **Injection dans les réseaux de gaz naturel :** après purification, le biométhane peut être injecté directement dans les gazoducs existants, fournissant du gaz renouvelable aux utilisateurs résidentiels et commerciaux.
- **Utilisation du CO_2 :** le CO_2 séparé peut être capturé pour la transformation des aliments, l'agriculture en serre et d'autres industries qui nécessitent du CO_2 de qualité alimentaire.

Produire de l'électricité

Le module de cogénération est constitué d'un moteur adapté pour brûler du biogaz, qui entraîne une génératrice de courant. La chaleur est récupérée sur le système de refroidissement du bloc moteur et des fumées de combustion, puis alimente un circuit d'eau chaude. L'électricité produite peut être injectée sur le réseau et revendue à un acheteur d'énergie. Le dimensionnement du moteur prend en compte le débit prévisionnel de biogaz à valoriser. Les rendements annoncés par les motoristes sont des rendements théoriques obtenus dans des conditions normées de température et de pression.

Les rendements réels sont inférieurs de 2 à 5 % par rapport aux rendements théoriques. La consommation èlectrique des auxiliaires du moteur doit être déduite de l'électricité vendue ; cela représente de 3 à 5 % de l'électricité totale produite. Une maintenance préventive est fortement conseillée. L'usure prématurée et la casse des moteurs représentent la grande majorité des incidents constatés par les assureurs, ainsi qu'une source importante de pertes de recettes pour les unités.

La valorisation de la chaleur est ègalement essentielle : de 10 à 15 % de la chaleur produite servent à chauffer le digesteur. La valorisation de la chaleur résiduelle permet d'améliorer le bilan ènergétique de l'unité, d'apporter un revenu complémentaire et donc d'optimiser la rentabilité de l'installation. Par ailleurs, les aides de l'ADEME et, potentiellement, celles d'autres financeurs sont souvent conditionnées à l'atteinte d'une efficacité ènergétique globale généralement supérieure à 50 %, ce qui impose de valoriser efficacement la chaleur.

En moyenne, un moteur tourne environ 8 000 heures par an, soit près de 91 % du temps ; il faut donc trouver des débouchés pour la chaleur tout au long de l'année.[47]

La valorisation de la chaleur

De 10 à 15 % de la chaleur produite sert à chauffer le digesteur. La valorisation de la chaleur résiduelle permettra d'améliorer le bilan ènergétique de l'unité, d'apporter un revenu complémentaire et donc d'optimiser la rentabilité de l'installation. Par ailleurs, les aides de l'ADEME et potentiellement celles d'autres financeurs sont conditionnées à l'atteinte d'une efficacité ènergétique globale en général supérieure à 50 %, ce qui impose de valoriser efficacement la chaleur. En moyenne, un moteur tourne environ 8 000 heures par an (91 % du temps) : il faut donc trouver des débouchés pour la chaleur toute l'année.[47]

Pour cela, il est possible de combiner plusieurs usages :

— chauffage de maisons d'habitation, de gîtes… ;
— chauffage de bâtiments d'élevage et production d'eau chaude;
— chauffage de serres maraîchères ou horticoles, ainsi que production de micro-algues (spiruline) ;
— chauffage de bâtiments industriels ou d'établissements publics (EHPAD…) ;
— séchage de fourrages, de bois…

Produire du biométhane

Pour injecter du biométhane dans le réseau, plusieurs critères sont à respecter. Il est aussi nécessaire de vérifier la capacité du réseau à accueillir le débit souhaité.[48]

Les différentes ètapes d'épuration

Pour pouvoir être injecté dans le réseau, le biométhane doit respecter les qualités requises, qui dépendent des régions où l'on se trouve (gaz de type H ou B). Afin de respecter ces critères, le biogaz passe par plusieurs ètapes d'épuration :

— désulfuration ;
— déshumidification ;
— décarbonation.

Plusieurs procédés d'épuration existent pour atteindre un taux minimal de 97 % de méthane. Pour être injecté, le biogaz est acheminé jusqu'à un « poste d'injection » dans lequel ont lieu quatre ètapes :

— l'odorisation, qui permet de donner au biométhane l'odeur caractéristique du gaz naturel et ainsi d'assurer la sécurité des usagers ;
— le contrôle de la qualité du biométhane, permettant de vérifier la conformité de ses caractéristiques physico-chimiques aux prescriptions techniques en vigueur ;
— la régulation de la pression, qui permet au biométhane d'être prioritaire à l'injection dans le réseau ;
— le comptage, permettant de connaître les volumes de biométhane injectés, ou non, dans le réseau.

L'épuration du biogaz consiste à séparer les èléments inertes ou indésirables tels que le CO_2, le H_2S, l'eau et les siloxanes, afin d'obtenir un gaz concentré en ènergie, le biométhane, de qualité similaire à celle du gaz naturel. Dans la plupart des régions françaises, cela correspond à une teneur supérieure à 97 % de méthane, permettant ensuite son injection dans les réseaux.

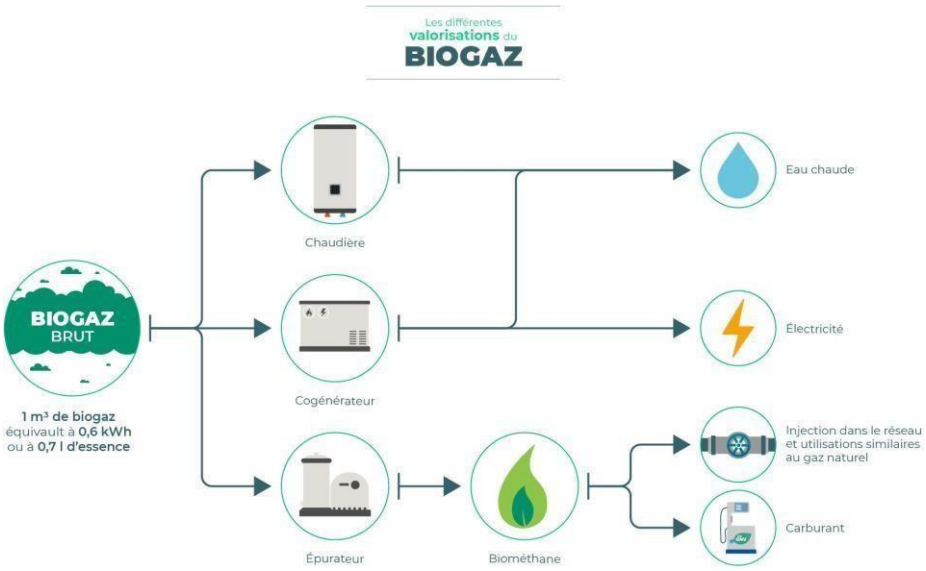

FIGURE 7 – valorisation du biogaz

Conclusion

En conclusion, le processus de production du biogaz repose sur plusieurs étapes complémentaires, depuis la collecte et la préparation des déchets organiques jusqu'à la valorisation du biogaz produit. La digestion anaérobie constitue l'étape principale de ce procédé, dont l'efficacité dépend fortement du choix de la technologie de digesteur ainsi que de la maîtrise des conditions opératoires telles que la température, le pH et le temps de séjour. Ainsi, la méthanisation représente une solution durable permettant à la fois la gestion des déchets organiques et la production d'une énergie renouvelable.

Toutefois, malgré ses avantages énergétiques et environnementaux, la production du biogaz peut présenter certains dangers et risques liés aux installations, aux émissions gazeuses et aux conditions d'exploitation. Pour cette raison, le chapitre suivant sera consacré à l'identification des dangers, à l'évaluation des risques ainsi qu'à l'étude des impacts environnementaux et sanitaires associés au processus de production du biogaz.

CHAPITRE 3

ANALYSE DES RISQUES HSE

Introduction

Connaître un procédé ne suffit pas à le maîtriser. Une unité de méthanisation peut être parfaitement dimensionnée sur le plan technique et rester une source de danger majeur si les risques qu'elle génère n'ont pas été identifiés, évalués et hiérarchisés avec rigueur. C'est précisément l'objet de ce chapitre, qui aborde la production de biogaz non plus sous l'angle de sa performance énergétique, mais sous celui de ses dangers potentiels pour les travailleurs, les riverains et l'environnement. L'analyse menée ici suit une progression logique : on identifie d'abord les sources de danger, on les évalue ensuite à l'aide des méthodes reconnues, puis on examine leurs conséquences possibles sur les milieux naturels et sur la santé humaine.

1. Identification des dangers

1.1 Risques chimiques

La méthanisation, bien qu'elle constitue une filière énergétique durable et en plein essor, implique la mise en œuvre de procédés complexes générant une multitude de dangers pour les travailleurs, les riverains et l'environnement. En effet, chaque étape du processus de la réception des intrants jusqu'à la valorisation du biogaz expose les opérateurs à des risques variés, qu'ils soient d'ordre chimique, biologique, mécanique, électrique ou encore environnemental.

Ces risques ne sont pas isolés : ils peuvent se combiner, s'amplifier mutuellement et survenir de manière simultanée, rendant leur maîtrise d'autant plus complexe. Leur identification précise et leur classification constituent donc un préalable indispensable à toute démarche de prévention efficace.

Dans ce cadre, les principaux risques associés aux installations de méthanisation peuvent être regroupés en plusieurs catégories distinctes, présentées ci-après :

1.1.1 Le sulfure d'hydrogène (H_2S)

Le sulfure d'hydrogène est, de loin, le danger chimique le plus redouté dans une unité de méthanisation. Sa traîtrise tient à une propriété paradoxale : à faible concentration, son odeur d'œuf pourri constitue un signal d'alerte ; mais au-delà d'un certain seuil, il paralyse instantanément les récepteurs olfactifs, laissant la victime sans aucun avertissement sensoriel.

L'exposition au H_2S peut causer des maux de tête, des vertiges, des nausées, des difficultés respiratoires et une irritation de la gorge à faible concentration ; à des niveaux élevés, elle entraîne une perte de conscience, des convulsions et peut être fatale. Il s'agit de la deuxième cause la plus fréquente de décès par inhalation de gaz sur le lieu de travail, juste après le monoxyde de carbone. Dans le contexte des déchets agro-alimentaires, la production de H_2S est particulièrement élevée lors de la digestion des protéines (abattoirs, laiteries, farines animales), ce qui impose une surveillance en continu de l'atmosphère dans les zones de réception, de déchargement et autour des digesteurs.[50]

1.1.2 Le méthane (CH_4)

Le méthane ne présente pas de toxicité directe à proprement parler, mais son accumulation en espace clos crée deux types de danger simultanément : l'asphyxie par déplacement de l'oxygène et l'explosion.

Le méthane est plus léger que l'air et s'accumule dans les parties hautes des locaux. Il est explosif à des concentrations comprises entre 5 et 15 % dans l'air. Bien que non toxique, il déplace l'air en espace confiné et crée une atmosphère appauvrie en oxygène ; c'est ainsi qu'il tue.

Le méthane est inodore et incolore, plus léger que l'air, asphyxiant simple et hautement explosif. Aucune valeur limite d'exposition n'est fixée dès lors que le taux d'oxygène dépasse 19,5 %. [51]

1.1.3 Le dioxyde de carbone (CO_2)

Le lisier peut produire de grandes quantités de dioxyde de carbone (CO_2). Ce gaz peut emplir tout l'espace clos en chassant l'oxygène (O_2). Une perte de conscience peut survenir à 12 % d'oxygène. À 4 %, quelques inspirations suffisent à faire perdre conscience. À 6 % d'oxygène, le décès survient en quelques minutes.

Le dioxyde de carbone a également des effets physiologiques et toxiques. À partir de 20 000 ppm (2 %), la respiration s'accélère. Une exposition de quelques minutes à 100 000 ppm (10 %) peut causer des troubles visuels et des difficultés respiratoires. À une concentration autour de 20 % ou plus, il peut entraîner une perte de conscience, un coma profond et la mort.[52]

1.1.4 Lámmoniac (NH_3)

L'ammoniac (NH_3) étant très peu absorbé par l'organisme, ses effets se limitent à son pouvoir irritant et corrosif pour les yeux, la peau et les voies respiratoires. Dans les bâtiments d'élevage et les milieux de travail, il devrait être maintenu à une concentration inférieure à 25 ppm. Une exposition à une concentration de 135 ppm durant 5 minutes cause une irritation et un larmoiement des yeux, ainsi qu'une irritation du nez et de la gorge. Une exposition à une concentration de 500 ppm durant 30 minutes cause une irritation grave des voies respiratoires. Il représente un danger pour la vie à une concentration de 300 ppm.[52]

Gaz de lisier : Principaux dangers et seuils d'alarme

Gaz dangereux		Dangers	Densité relative (air = 1)	(((•))) Alarme (ppm)
Formule	Nom			
CO_2	Dioxyde de carbone		1,53 ↓	5 000
H_2S	Hydrogène sulfuré		1,19 ↓	10
CH_4	Méthane		0,6 ↑	5 000 (*10% LIE*)
NH_3	Ammoniac		0,6 ↑	25

= Asphyxie; = Intoxication aiguë; = incendie/explosion; = Dégazage

↓ = plus lourd que l'air; ↑ = plus léger que l'air

FIGURE 8 – Émanations gazeuses liées au lisier

1.2 Risques biologiques

Ce type de risque est souvent traité comme secondaire dans les études HSE des unités de biogaz, à tort. Les personnes qui travaillent au quotidien dans ces installations manipulent des matières organiques en décomposition, potentiellement porteuses d'agents pathogènes.

Lors du déchargement des biomasses, les travailleurs sont fortement exposés aux poussières organiques, principalement composées de bioaérosols, et des concentrations élevées d'endotoxines ont été mesurées.

Les concentrations en endotoxines dans l'air dépassent fréquemment la valeur limite indicative de 90 EU/m^3 suggérée par la littérature spécialisée pour prévenir les effets sanitaires chroniques.[53]

Les risques biologiques dans une unité de méthanisation sont de deux ordres : ceux liés aux micro-organismes pathogènes présents dans les intrants, et ceux liés aux dysfonctionnements de l'écosystème microbien du digesteur.

a) Risques liés aux agents pathogènes

Les zones de réception, de préparation des intrants et de traitement du digestat exposent les opérateurs à des bioaérosols contenant des virus, bactéries, parasites et endotoxines pouvant générer infections, allergies et intoxications.

b) Dysfonctionnements microbiologiques du digesteur

L'acidose principal problème biologique des unités de méthanisation correspond à une accumulation d'acides gras volatils (AGV) entraînant une baisse du pH, une inhibition de l'activité bactérienne et une diminution de la production de biogaz.

L'alcalose correspond à une accumulation d'ammoniac dans le milieu, provoquant une hausse du pH, une toxicité ammoniacale et une inhibition de la méthanogénèse.

La carence en micro-nutriments inhibe les bactéries méthanogènes et peut déclencher secondairement une acidose.

Ces dysfonctionnements ont des conséquences en cascade : baisse ou arrêt de production de biogaz, dégagement de gaz malodorants et toxiques, et risque d'accident par accumulation gazeuse incontrôlée.[54]

1.3 Risques physiques

Explosion et incendie

Les explosions de gaz représentent 69,3 % de tous les accidents documentés dans les unités de biogaz, suivies des rejets de gaz toxiques à 21,3 %.

La mécanique de l'accident est simple : une fuite de biogaz dans un local mal ventilé atteint rapidement la limite inférieure d'explosivité (LIE) du méthane à 5 %. Il suffit alors d'une étincelle interrupteur électrique, outil métallique, cigarette, véhicule pour déclencher une déflagration ou une détonation.

La température d'inflammation est de 595 °C pour le méthane et de 700 °C pour le biogaz. Tout équipement générant des étincelles (moteurs électriques, génératrices, outils) constitue une source d'ignition potentielle dans les zones où le biogaz peut s'accumuler.[55]

Surpression et rupture d'équipements

Les digesteurs, cuves de stockage de biogaz et conduites fonctionnent sous pression positive. Un dysfonctionnement de la soupape de sécurité, une formation de croûte obstruant les soupapes, ou un emballement de la production biologique peut entraîner une surpression interne susceptible de provoquer la rupture mécanique de l'enceinte. Les conséquences incluent : projection de digestat, onde de pression, dispersion massive de biogaz et déclenchement possible d'un BLEVE (*Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion*) dans les cas extrêmes.

Espaces confinés et asphyxie

L'accumulation de biogaz en espace confiné peut significativement réduire le taux d'oxygène ambiant jusqu'à un niveau provoquant une anoxie entraînant des symptômes d'intoxication ou d'asphyxie pouvant aller jusqu'à la mort. La teneur minimale réglementaire en oxygène pour un travail en

sécurité est de 19 %.[56]

2. Évaluation des risques : méthodes d'analyse

Pour réaliser une analyse de risques efficace, il existe plusieurs méthodologies éprouvées. Nous avons listé ici les plus couramment utilisées en décrivant leur principe, leurs avantages et leurs domaines d'application. À noter qu'il est souvent bénéfique d'utiliser une combinaison de ces méthodes pour obtenir une analyse des risques complète et efficace.

2.1 Méthode APR

L'Analyse Préliminaire des Risques (APR) est une méthode qualitative utilisée pour identifier les dangers potentiels, analyser les situations dangereuses et proposer des mesures de prévention afin d'assurer la sécurité des installations industrielles. Dans une unité de production de biogaz à partir de déchets agro-alimentaires, l'APR permet d'anticiper les risques liés notamment au méthane, à la pression, à la température et aux équipements du procédé.

Objectifs de l'APR

Les principaux objectifs de l'APR appliquée à une unité de méthanisation sont les suivants :

— identifier les éléments dangereux du procédé de méthanisation ;
— analyser les causes possibles des situations dangereuses ;
— évaluer les conséquences sur les personnes, les équipements et l'environnement;
— mettre en place des mesures de prévention et de protection adaptées ;
— améliorer la sécurité et la fiabilité de l'installation.

Élément dangereux	Événement causant la situation dangereuse (E.C.S.D)	Situation dangereuse	Événement causant l'accident potentiel (E.C.A.P)	Accident potentiel	Gravité	Mesures de sécurité recommandées
Digesteur anaérobie	Surpression due à l'accumulation du biogaz	Accumulation excessive de méthane dans le digesteur	Présence d'une source d'ignition	Explosion du digesteur	4	Installation de soupapes de sécurité, capteurs de pression, système d'alarme et Maintenance périodique

Conduites de transport du biogaz	Fuite de méthane causée par une fissure ou corrosion	Formation d'une atmosphère inflammable	Étincelle électrique ou flamme	Incendie	4	Contrôle d'étanchéité, ventilation adaptée et détecteurs de gaz
Système de chauffage	Défaillance du système thermique	Température insuffisante dans le digesteur	Arrêt du processus de digestion	Diminution de la production du biogaz	2	Contrôle automatique de la température et entretien préventif
Réservoir de stockage	Débordement du réservoir	Pollution du sol et de l'environnement	Rupture du réservoir	Déversement des déchets organiques	3	Surveillance du niveau, alarme et inspection régulière
Pompe d'alimentation	Panne mécanique ou électrique	Arrêt de l'alimentation du digesteur	Blocage du procédé	Arrêt de production	2	Maintenance préventive et alimentation électrique de secours

Tableau 3 : APR

L'APR constitue une étape essentielle dans l'évaluation des risques industriels. Dans une installation de production de biogaz, cette méthode permet de prévenir les accidents majeurs tels que les incendies, les explosions et les fuites de méthane. Elle contribue également à améliorer la sécurité des travailleurs, la protection de l'environnement et la continuité du procédé de production.

2.2 Méthode HAZOP

La méthode HAZOP (*Hazard and Operability Study*) est une méthode systématique d'analyse des risques industriels utilisée pour identifier les déviations de fonctionnement d'un procédé ainsi que leurs causes et conséquences.

Cette méthode repose sur l'utilisation de mots-clés appliqués aux paramètres du procédé tels que :

- la pression
- la température
- le débit
- le niveau
- la concentration

Dans le cadre de la production de biogaz à partir des déchets agro-alimentaires, la méthode HAZOP permet d'identifier les anomalies pouvant affecter le fonctionnement du digesteur, des conduites et des équipements de stockage du biogaz.

L'objectif principal est de renforcer la sécurité des installations, réduire les risques d'incendie et d'explosion et améliorer la fiabilité du procédé.

partie considérée	Mot-clé	Paramètre	Déviation	Causes possibles	Conséquences	Détection	Mesures recommandées	Commentaire
Digesteur anaérobie	**Plus**	Pression	Pression trop élevée	Accumulation excessive du biogaz, obstruction des conduites	Explosion, fuite de méthane	Capteur de pression et alarme	Installation de soupapes de sécurité et maintenance préventive	Risque critique
Digesteur anaérobie	**Moins**	Température	Température trop faible	Panne du système de chauffage	Diminution de la production du biogaz	Capteur thermique	Contrôle automatique de la température	Surveillance continue
Conduites d'alimentation	**Moins**	Débit	Débit insuffisant	Pompe défaillante ou conduite obstruée	Baisse du rendement	Débitmètre	Nettoyage des conduites et vérification des pompes	Maintenance régulière
Digesteur anaérobie	**Plus**	Niveau	Niveau trop élevé	Excès d'alimentation ou défaillance de vidange	Débordement et pollution	Alarme de niveau	Installation d'un détecteur de niveau haut	Contrôle périodique
Réservoir de stockage	**Plus**	Concentration CH_4	Concentration excessive	Mauvaise ventilation	Incendie ou explosion	Détecteur de gaz	Système de ventilation et contrôlecontinu	Zone sensible
Réseau de transfert	**Inverse**	Sens d'écoulement	Retour du biogaz	Absence de clapet anti-retour	Endommagement des équipements	Surveillance humaine	Installation d'un clapet anti-retour	Vérification obligatoire

Tableau 4 : Tableau HAZOP

L'analyse HAZOP a permis d'identifier plusieurs déviations critiques dans le procédé de production du biogaz, notamment les surpressions, les variations de température, les fuites de méthane et les anomalies de débit. Cette méthode offre une analyse détaillée des causes, des conséquences et des mesures correctives associées aux risques industriels. Ainsi, l'utilisation de la méthode HAZOP contribue à améliorer la sécurité, la continuité du procédé et la protection de l'environnement au sein de l'installation de méthanisation.

2.3 Comparaison entre les méthodes

L'APR (Analyse Préliminaire des Risques) est une méthode qualitative permettant d'identifier rapidement les dangers principaux du système dès les premières étapes de l'étude. Elle offre une vision globale des risques potentiels tels que :

— les fuites de méthane
— les incendies
— les explosions
— les défaillances des équipements

Cependant, l'APR reste une analyse générale et moins détaillée.

En revanche, la méthode HAZOP est plus approfondie et plus systématique. Elle repose sur l'analyse des déviations des paramètres du procédé à l'aide de mots-clés comme :

— Plus
— Moins
— Aucun
— Inverse

La méthode HAZOP a permis d'identifier précisément :

— les surpressions dans le digesteur
— les variations de température
— les anomalies de débit
— les risques liés au stockage du biogaz

Les résultats obtenus montrent que :

— l'APR permet une identification rapide des risques majeurs
— la méthode HAZOP fournit une analyse détaillée des causes, conséquences et mesures correctives.

Ainsi, les deux méthodes sont complémentaires. L'APR constitue une étape préliminaire d'identification des dangers, tandis que HAZOP permet une étude approfondie du procédé afin d'améliorer la sécurité, la fiabilité et la maîtrise des risques industriels.

3. Impacts environnementaux potentiels

3.1 Impact sur la qualité de l'air

L'évaluation de l'impact atmosphérique d'une unité de méthanisation traitant des déchets agro-alimentaires ne peut se réduire à la seule question des fuites de méthane, aussi importante soit-elle. En réalité, l'installation génère plusieurs flux d'émissions gazeuses de nature distincte, qui interviennent à des étapes différentes du procédé et dont les effets sur l'environnement et la santé humaine se superposent sans nécessairement se confondre. Une analyse rigoureuse impose donc de les examiner séparément, avant d'en dresser un bilan global.

Les émissions fugitives de méthane et leur paradoxe climatique

Le biogaz est fréquemment présenté comme une énergie à bilan carbone neutre, dans la mesure où le CO_2 libéré lors de sa combustion a été préalablement capté par la biomasse au cours de sa croissance. Cette neutralité n'est cependant qu'une approximation valable en régime idéal. Dès lors que des fuites se produisent et que du méthane brut s'échappe dans l'atmosphère sans avoir été valorisé, le bénéfice climatique s'érode rapidement et peut même s'inverser. [57] Des mesures

réalisées sur plusieurs unités de biogaz ont montré des émissions fugitives de méthane variant entre 0,1 et 58,7 kg par heure, représentant des pertes allant de 0,02 à 8,1 % de la production totale. Or, le méthane possède un potentiel de réchauffement global vingt-huit fois supérieur à celui du CO_2 sur un horizon de cent ans [58] ; une perte de 8 % de la production signifie donc, en termes d'équivalent infrastructure de transition énergétique en source nette de pollution climatique.

Les points de fuite les plus fréquemment documentés sont les raccords de tuyauteries et les brides insuffisamment étanches, les passages de paroi des agitateurs, les membranes de toiture vieillissantes, les soupapes de sécurité lors de leurs ouvertures en surpression, ainsi que les surfaces de stockage du digestat liquide laissées à l'air libre. À ces sources directes s'ajoute le phénomène dit de *methane slip*, propre aux installations équipées d'une unité d'épuration du biogaz en biométhane : une fraction du méthane, non séparée lors du processus d'*upgrading*, transite avec le CO_2 rejeté et se retrouve libérée dans l'atmosphère sans avoir été valorisée. Ce glissement de méthane peut significativement réduire les bénéfices environnementaux du biométhane injecté en réseau, en fonction de la technologie d'épuration retenue et de son niveau de maintenance.[59]

Il convient également de mentionner le protoxyde d'azote (N_2O), dont le potentiel de réchauffement global est deux cent soixante-cinq fois supérieur à celui du CO_2. Contrairement au méthane, le N_2O n'est pas directement issu du procédé de digestion anaérobie mais résulte principalement des processus de nitrification et dénitrification partielles qui interviennent lors du stockage de la biomasse entrante et de la gestion du digestat, deux étapes souvent absentes des bilans environnementaux réalisés par les exploitants.[59]

Les émissions issues de la combustion

Un second registre d'impact atmosphérique, moins intuitif mais tout aussi documenté, est celui des polluants générés par la combustion du biogaz dans les moteurs de cogénération. Contrairement au gaz naturel, le biogaz brut contient des impuretés, en particulier le H_2S et des composés organiques volatils, dont la combustion produit des polluants réglementés. Une évaluation d'impact sanitaire indique que les NO_x contribuent à hauteur de 91 % aux dommages sur la santé humaine attribuables aux émissions de combustion du biogaz, suivis des SO_x pour 6,5 %, des COV pour 1,4 % et du CO pour 0,7 %.[60]

La formation des oxydes d'azote dans les moteurs alimentés au biogaz est un phénomène thermique bien établi : au-delà de 1 500 °C, l'azote atmosphérique réagit avec l'oxygène pour former du monoxyde d'azote, lequel s'oxyde secondairement en dioxyde d'azote dans l'atmosphère. Ce NO_2 est un précurseur de l'ozone troposphérique et participe à la formation du smog photochimique dans les zones urbaines et périurbaines où sont souvent implantées les unités de méthanisation agro-alimentaires. Par ailleurs, le H_2S résiduel non éliminé lors du prétraitement du biogaz est oxydé lors de la combustion en dioxydes et trioxydes de soufre, qui sont rejetés avec les gaz d'échappement et présentent une toxicité reconnue pour les muqueuses respiratoires [61]. Ces constats conduisent à une conclusion opérationnelle importante : l'épuration du H_2S avant la combustion ne relève pas seulement de la protection des équipements contre la corrosion ; elle constitue également une mesure directe de protection de la qualité de l'air, dont la portée dépasse les limites physiques du site industriel.

Les émissions d'ammoniac et leur portée régionale

L'ammoniac est le troisième polluant atmosphérique majeur généré par les unités de méthanisation traitant des substrats à forte teneur en protéines. Son mécanisme d'impact est indirect mais d'une portée spatiale considérable : dans l'atmosphère, le NH_3 réagit avec les acides sulfurique et nitrique pour former des particules fines secondaires, principalement du sulfate et du nitrate d'ammonium,

dont le diamètre aérodynamique est inférieur à 2,5 micromètres. Ces $PM_{2,5}$ pénètrent profondément dans les voies respiratoires inférieures et constituent, selon l'Organisation Mondiale de la Santé, l'un des polluants atmosphériques les plus préoccupants pour la mortalité cardiovasculaire et respiratoire. Un stockage couvert et étanche de la biomasse et du digestat est nécessaire pour contenir ces émissions, dont l'impact s'étend bien au-delà du périmètre immédiat de l'installation. Les principales sources d'émission d'NH_3 sur le site sont le déchargement des substrats protéiques à la réception, le brassage du contenu du digesteur, et surtout le stockage en lagune ouverte ou l'épandage du digestat liquide, opération durant laquelle la volatilisation de l'azote ammoniacal est particulièrement intense si elle n'est pas encadrée par des techniques d'incorporation rapide. [59]

Les nuisances olfactives comme indicateur de dysfonctionnement

Au-delà des impacts mesurables sur la composition chimique de l'atmosphère, les unités de biogaz sont associées à des nuisances olfactives qui constituent le premier signal perçu par les populations riveraines et le premier motif de plainte auprès des autorités environnementales. Les composés responsables de ces nuisances forment un ensemble de molécules à très faible seuil de perception : le H_2S, détectable par au moins la moitié de la population à une concentration aussi basse que 0,47 ppb ; le méthanethiol (CH_3SH), aux effluves de chou pourri ; les acides gras volatils à courte chaîne, responsables des odeurs acides et fermentées ; et les amines biogènes, au caractère ammoniacal prononcé. Des mesures réalisées autour d'unités de biogaz traitant des déchets municipaux ont relevé des concentrations d'odeur comprises entre 200 et 1 000 unités odeur par mètre cube autour des installations, avec des teneurs en ammoniac de 0,3 à 20 mg/Nm³ et en COV totaux de 5 à 40 mg/Nm³[62]. Une étude complémentaire menée sur six sites polonais a démontré que ces concentrations odorantes sont significativement amplifiées par la température ambiante et l'humidité relative de l'air, ce qui explique l'intensification des plaintes de riverains lors des périodes estivales et après les épisodes pluvieux.[63]

Il importe de souligner que la nuisance olfactive ne doit pas être réduite à un simple inconfort subjectif. Elle constitue un indicateur opérationnel précieux : une odeur anormalement intense signale presque toujours une défaillance d'étanchéité, une surcharge du digesteur, une accumulation de digestat non couvert, ou une soupape de sécurité qui s'ouvre trop fréquemment. En ce sens, la surveillance olfactive systématique, qu'elle soit instrumentale ou basée sur des panels de nez humains, s'intègre pleinement dans la démarche HSE de l'installation, au même titre que la mesure des concentrations gazeuses ou le contrôle des paramètres de procédé.

3.2 Impact sur les ressources en eau

L'eau constitue l'une des ressources les plus exposées aux dysfonctionnements d'une unité de méthanisation. Contrairement à l'air, qui dilue et disperse les polluants gazeux, les milieux aquatiques, qu'il s'agisse des eaux souterraines ou des eaux de surface, accumulent les contaminants sur des durées longues et les transportent vers des usages sensibles : alimentation en eau potable, irrigation agricole, aquaculture et écosystèmes aquatiques. Les impacts sur les ressources en eau ne relèvent donc pas d'un seul mécanisme, mais de plusieurs vecteurs de contamination distincts, qui peuvent se combiner et se renforcer mutuellement si la gestion du site est défaillante.

La contamination des eaux souterraines par les nitrates

Le premier vecteur de contamination des ressources en eau provient non pas du digesteur lui-même, mais de la gestion du digestat liquide lors de son épandage agricole. Cette fraction liquide, riche en azote ammoniacal, constitue un fertilisant de valeur agronomique reconnue, à condition que son application soit rigoureusement ajustée aux besoins des cultures. Lorsque les doses d'apport dépassent la capacité d'absorption des plantes, l'azote excédentaire, qui ne peut être immobilisé dans le sol indéfiniment, se transforme par nitrification en nitrates solubles qui migrent verticalement à travers le profil pédologique jusqu'aux nappes phréatiques. L'épandage de la fraction liquide du digestat sur des terres agricoles peut en effet générer un lessivage significatif de l'azote et son infiltration dans les eaux souterraines, polluant les cours d'eau voisins et affectant la vie aquatique.[64]

La problématique est amplifiée par un déséquilibre structurel bien documenté en Europe : les grandes unités de méthanisation centralisées produisent des volumes de digestat qui excèdent fréquemment la capacité d'absorption des terres agricoles environnantes, conduisant à des épandages excessifs et localisés. Ce déséquilibre conduit à des problèmes environnementaux sérieux, notamment des phénomènes d'eutrophisation par lessivage et ruissellement de nutriments, ainsi qu'à la pollution des eaux souterraines et de surface. La Directive Nitrates européenne (91/676/CEE) tente d'encadrer cette problématique en imposant un plafond de 170 kg d'azote organique par hectare et par an dans les zones vulnérables, mais son application reste inégale selon les États membres et les contextes pédoclimatiques locaux.[65]

La contamination des eaux potables par les nitrates présente des conséquences sanitaires directes et documentées. La consommation d'eau à teneur élevée en nitrates est associée à des troubles thyroïdiens et à la méthémoglobinémie infantile, appelée également « syndrome du bébé bleu », pathologie grave qui affecte la capacité des nourrissons à transporter l'oxygène dans leur sang. Ces risques justifient que la gestion du digestat ne soit jamais traitée comme une simple question agronomique, mais pleinement intégrée dans l'analyse HSE de l'installation.

Les fuites accidentelles et leurs effets sur les écosystèmes aquatiques

Au-delà des impacts chroniques liés à l'épandage, les fuites accidentelles de digestat brut, par rupture de cuve, débordement lors de fortes pluies ou défaillance des systèmes de rétention, constituent un risque aigu dont les effets sur les milieux aquatiques peuvent être immédiats et dévastateurs. Une étude expérimentale publiée dans *Science of the Total Environment* a étudié l'impact de déver-sements de digestat à différentes concentrations sur des communautés microbiennes de sédiments fluviaux, et a montré que les conséquences varient avec la dose : à forte concentration de diges-tat dans l'écosystème aquatique récepteur, la déplétion en oxygène résultante peut provoquer des mortalités massives de poissons et d'espèces aquatiques dépendant de l'oxygène ; à des concentra-tions plus faibles, les apports élevés en nutriments provenant du ruissellement de digestat peuvent conduire à une eutrophisation et à une dégradation de la qualité de l'eau des cours d'eau.[66]

L'eutrophisation constitue précisément l'un des mécanismes de dégradation aquatique les plus documentés dans la littérature environnementale. Elle désigne l'enrichissement excessif d'un plan d'eau en nutriments, principalement l'azote et le phosphore, qui stimule la prolifération incontrôlée de phytoplancton et d'algues. Cette biomasse algale, en se décomposant, consomme l'oxygène dissous, crée des zones hypoxiques qui asphyxient la faune aquatique, génère des toxines nuisibles pour la santé humaine et animale, et dégrade irréversiblement la qualité de l'eau sur des horizons temporels de plusieurs décennies. Le phosphore joue un rôle particulièrement critique dans les écosystèmes d'eau douce, où il constitue l'élément limitant de la croissance algale : un apport, même modeste, de phosphore soluble peut déclencher une prolifération algale disproportionnée par rapport à la dose initiale.

Les micropolluants organiques, les métaux lourds et les résistances aux antibiotiques

La recherche récente a mis en évidence une troisième catégorie de risques pour les ressources en eau, moins visible que les nitrates mais potentiellement plus durable : la présence dans le digestat de micropolluants organiques persistants, de métaux lourds et de gènes de résistance aux antibiotiques. Ces contaminants proviennent directement des substrats entrants, médicaments vétérinaires résiduels dans les effluents d'élevage, métaux traces dans les boues de stations d'épuration ou pesticides dans les résidus de cultures, et ne sont que partiellement éliminés au cours du processus de digestion anaérobie.

Des travaux récents ont montré que le digestat peut contenir des antibiotiques et leurs métabolites, des bactéries résistantes aux antibiotiques et des gènes de résistance aux antibiotiques, ainsi que des métaux lourds. Il existe donc un risque élevé que ces micropolluants soient transmis aux sols lors de l'épandage du digestat utilisé comme fertilisant organique. Or, une fois ces gènes de résistance introduits dans les sols et les eaux, leur dissémination dans les populations bactériennes environnementales peut compromettre à terme l'efficacité des traitements antibiotiques, un enjeu de santé publique qui dépasse largement le périmètre de la filière biogaz.[67]

Les métaux lourds tels que le cadmium, le mercure, le nickel, le chrome et le plomb sont caractérisés par une haute biostabilité et une longue demi-vie dans l'environnement, et peuvent exercer une pression sélective sur les microorganismes. Ces métaux, introduits dans l'installation avec certains substrats agro-alimentaires industriels ou les boues de stations d'épuration, s'accumulent préférentiellement dans la fraction solide du digestat et, par lessivage, peuvent atteindre les aquifères sur des échelles de temps de plusieurs dizaines d'années. Leur toxicité chronique pour les organismes aqua-

tiques et pour la santé humaine, notamment les cancers, les atteintes rénales et l'immunodépression, justifie une caractérisation systématique des substrats entrants et une surveillance régulière de la composition du digestat.

Une étude suédoise portant sur le digestat issu de déchets alimentaires a par ailleurs identifié, parmi 133 composés émergents analysés, 48 détectés au moins une fois dans les biofertilisants issus de trois unités de biogaz différentes, confirmant que le spectre des micropolluants potentiellement transférables aux eaux est bien plus large que les seuls nitrates ou métaux lourds réglementés.[68]

La gestion des eaux de procédé sur le site

L'impact sur les ressources en eau ne se limite pas aux effets de l'épandage hors site. Sur l'installation elle-même, les eaux de ruissellement issues des plateformes de réception des substrats, les eaux de nettoyage des équipements et les lixiviats des zones de stockage du digestat solide constituent des effluents chargés en matières organiques, en azote ammoniacal et en agents biologiques pathogènes. Si ces effluents ne sont pas collectés et traités avant rejet, ils représentent un vecteur de contamination directe des eaux de surface et des sols environnants.

La réglementation française, via l'arrêté du 10 novembre 2009 modifié relatif aux installations de méthanisation soumises à autorisation, impose que toutes les surfaces susceptibles d'être en contact avec le digestat soient imperméabilisées et équipées de systèmes de collecte des effluents. Ces dispositions s'inscrivent dans le cadre plus large du régime des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE), qui soumet les unités de biogaz de grande capacité à des prescriptions détaillées en matière de protection des eaux souterraines et superficielles.[69]

3.3 Impact sur les sols

Le sol constitue le réceptacle final de la quasi-totalité des flux de matière issus d'une unité de méthanisation : les nutriments du digestat épandu y sont absorbés ou lessivés, les micropolluants s'y accumulent, et les perturbations physiques y laissent des empreintes durables sur la structure et la vie microbienne. La relation entre la filière biogaz et les sols est donc ambivalente par nature : le digestat, correctement géré, peut améliorer la fertilité des terres agricoles et réduire le recours aux engrais minéraux de synthèse ; mal géré, il peut dégrader durablement les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol, avec des conséquences qui se manifestent sur des échelles de temps bien supérieures à celles de la production de biogaz elle-même. C'est cette dualité, bénéfice potentiel sous conditions strictes et risque réel en cas de dérive, qui justifie d'examiner l'impact sur les sols avec la même rigueur analytique que les impacts atmosphériques ou aquatiques.

L'accumulation des métaux lourds et ses conséquences à long terme

Parmi les risques pédologiques les mieux documentés, l'accumulation progressive de métaux lourds dans les horizons superficiels des sols agricoles recevant du digestat occupe une place centrale dans la littérature scientifique récente. Cette accumulation ne résulte pas d'une contamination accidentelle mais d'un apport chronique, diffus et cumulatif, lié à la présence de concentrations non négligeables de métaux traces dans certains substrats entrants, tels que les effluents d'élevage enrichis en cuivre et en zinc par les compléments alimentaires, les boues de stations d'épuration urbaines, les déchets

d'abattoir et les résidus industriels agro-alimentaires.

Bien que le digestat issu de la digestion anaérobie puisse améliorer les propriétés des sols, son épandage répété conduit souvent à l'accumulation de métaux lourds dans les horizons superficiels, représentant une menace significative pour la santé des sols, la sécurité des cultures et l'équilibre de l'écosystème dans son ensemble. Cette accumulation expose chroniquement les êtres humains à des risques sanitaires sérieux, notamment le cancer du poumon, l'affaiblissement du système immunitaire, les atteintes rénales et les fractures osseuses.

La particularité des métaux lourds, notamment le cadmium, le mercure, le plomb, le chrome et le nickel, réside dans leur extrême persistance dans les matrices pédologiques. Ces éléments sont caractérisés par une haute biostabilité et une longue demi-vie dans l'environnement, et peuvent exercer une pression sélective sur les microorganismes du sol, favorisant l'émergence de populations bactériennes résistantes et perturbant les équilibres de la microflore native. Contrairement aux nitrates, qui peuvent être lessivés et dilués dans les aquifères, les métaux lourds s'adsorbent sur les colloïdes argileux et humiques et s'accumulent irréversiblement dans le profil pédologique, d'où leur retrait est pratiquement impossible sans recours à des techniques de phytoremédiation ou de dépollution coûteuses et lentes.[70]

Les perturbations des propriétés physiques du sol

L'impact du digestat sur les propriétés physiques des sols est plus nuancé que pour les métaux lourds, en ce sens qu'il peut être bénéfique ou délétère selon les conditions d'application, notamment la dose, la fréquence, la forme du digestat, liquide ou solide, et le type de sol récepteur. Cette ambivalence est bien illustrée par la littérature récente, qui révèle des résultats parfois contradictoires selon les contextes pédoclimatiques.

D'un côté, des études ont montré que l'apport régulier de digestat solide, riche en matières lignocellulosiques relativement stables, contribue à la formation d'agrégats stables, améliore la porosité du sol et renforce sa capacité de rétention hydrique, avec des effets comparables à ceux d'un amendement organique classique. De l'autre, des travaux ont établi que l'application de matières organiques à faible teneur en matière sèche, comme les digestats liquides et les lisiers, avait une capacité limitée à améliorer le fonctionnement biologique et physique du sol. La densité apparente du sol augmentait et la porosité diminuait lorsque des matériaux organiques à faible teneur en matière sèche étaient appliqués ; deux années d'application de digestat ont conduit à une détérioration des propriétés physiques du sol comparativement à l'application d'engrais minéraux.[71]

L'élévation de la conductivité électrique du sol, indicateur de la salinité, constitue un autre effet physico-chimique documenté de l'épandage de digestat. Une augmentation des valeurs de conductivité électrique a été observée après application de digestat, les sols recevant la fraction solide présentant une salinité plus élevée que ceux recevant la fraction liquide, à l'exception de la dose la plus forte, où les deux fractions conduisaient à des niveaux de conductivité similaires. Une salinisation excessive du sol, même modérée, peut compromettre la germination des semences, réduire la disponibilité de l'eau pour les plantes et modifier les équilibres ioniques du milieu pédologique. Ces effets se manifestent d'autant plus rapidement que les sols sont de texture légère et les conditions climatiques sèches, comme c'est précisément le cas dans les régions semi-arides telles que le nord de l'Algérie.[72]

Les perturbations de la vie microbienne du sol

Le sol n'est pas un substrat inerte : il abrite une communauté microbienne d'une extraordinaire complexité, pouvant atteindre plusieurs milliards de microorganismes par gramme, dont l'activité assure les cycles biogéochimiques fondamentaux de la biosphère : minéralisation de la matière organique, fixation de l'azote atmosphérique, solubilisation du phosphore et décomposition des xénobiotiques. Toute perturbation durable de cette communauté a des répercussions sur la fertilité et la résilience du sol bien au-delà de la simple question de la nutrition des cultures.

L'impact du digestat sur les communautés microbiennes du sol a fait l'objet d'études de long terme particulièrement instructives. Une étude conduite sur une décennie en France (2012–2022) sur des parcelles recevant annuellement du digestat de lisier de porc a mis en évidence que les effets à long terme de l'application annuelle de digestat pendant dix ans incluaient une diversité microbienne du sol était plus élevée dans les parcelles traitées au digestat que dans celles traitées au lisier brut, accompagnée de modifications de la structure de la communauté microbienne dont les caractéristiques se rapprochaient de celles observées avec les engrais minéraux. Ce résultat nuancé illustre bien la complexité du sujet : le digestat n'est ni neutre ni uniformément bénéfique pour la microbiologie du sol ; il réoriente les communautés microbiennes dans une direction qui peut s'éloigner de l'état de référence naturel, avec des conséquences sur les fonctions écosystémiques encore mal quantifiées.[73]

À cette perturbation fonctionnelle s'ajoute le risque de dissémination de gènes de résistance aux antibiotiques dans le microbiome tellurique. Les résultats disponibles confirment que le digestat constitue un réservoir de gènes de résistance aux antibiotiques, avec des concentrations allant de $5{,}73 \times 10^{2}$ à $8{,}89 \times 10^{10}$ copies par gramme de digestat, et que les concentrations élevées de gènes intégrase observées indiquent que des éléments génétiques mobiles peuvent être impliqués dans la propagation de la résistance aux antibiotiques dans l'environnement. Cette dissémination, une fois opérée dans les sols, est pratiquement impossible à endiguer : les gènes de résistance se transfèrent horizontalement entre espèces bactériennes, persistent des années dans les matrices pédologiques et peuvent être captés par les cultures et atteindre la chaîne alimentaire humaine, ce qui constitue un enjeu de santé publique que la filière biogaz ne peut se permettre d'ignorer.[74]

Les risques spécifiques liés aux plateformes de réception et de stockage

Outre les effets de l'épandage agricole du digestat hors de l'unité de production, les sols situés à l'intérieur du périmètre industriel sont également exposés à des risques de contamination directe. Les plateformes de réception des déchets agro-alimentaires, si elles ne sont pas intégralement imperméabilisées et équipées de systèmes de collecte des lixiviats, laissent les jus de déchets s'infiltrer dans les horizons superficiels. Ces lixiviats, concentrés en matière organique biodégradable, en azote ammoniacal et en agents pathogènes, créent des zones de contamination localisée qui peuvent évoluer vers une anoxie des horizons pédologiques par consommation de l'oxygène disponible lors de leur dégradation microbienne.

De même, les zones de stockage du digestat solide, lorsqu'elles ne bénéficient pas d'une dalle étanche et d'un dispositif de récupération des eaux de ruissellement, constituent des sources de contamination pédologique chronique dont les effets s'accumulent sur les horizons profonds au fil des années d'exploitation de l'installation.

3.4 Impacts sur la santé et la sécurité des travailleurs

Les activités de méthanisation agro-alimentaire exposent les travailleurs à différents risques susceptibles d'affecter leur santé et leur sécurité. Ces risques résultent principalement de la présence de gaz toxiques, de micro-organismes, d'équipements mécaniques et de conditions de travail particulières telles que les espaces confinés ou les environnements bruyants. Une analyse des effets sanitaires et sécuritaires apparaît donc nécessaire afin d'identifier les principaux dangers professionnels associés à l'exploitation des unités de production de biogaz et de mettre en place des mesures de prévention adaptées.

3.4.1 Effets sur la santé des travailleurs

Les irritations et inflammations aiguës constituent les premiers effets sanitaires observés, incluant la dermatite, la rhinite, la sinusite, la conjonctivite, la pharyngite, l'asthme et les troubles gastro-intestinaux, causés par l'exposition aux moisissures, levures, endotoxines, mycotoxines et β-1-3-D-glucanes présents dans les bioaérosols. Les pneumopathies d'hypersensibilité représentent des maladies immunologiques plus graves comme la maladie du poumon du fermier et le poumon de compost, qui se manifestent par un syndrome grippal avec toux sèche, dyspnée, fièvre, céphalées et peuvent évoluer vers une insuffisance respiratoire chronique à long terme, causées par *Saccharopolyspora rectivirgula*, *Mycobacterium* spp., moisissures, levures et endotoxines. Les pneumopathies toxiques, notamment le syndrome toxique des poussières organiques, résultent de l'inhalation d'endotoxines, mycotoxines et β-1-3-D-glucanes.[75]

Les maladies infectieuses graves observées incluent la légionellose, ou maladie du légionnaire, caractérisée par fièvre, toux sèche, confusion, diarrhées, douleurs abdominales et frissons, causée par *Legionella pneumophila*, qui peut se développer dans les systèmes d'eau et de ventilation. La tuberculose et les infections cutanées ou des tissus mous sont causées par *Mycobacterium tuberculosis* et les mycobactéries non tuberculeuses. La bactériémie, le choc septique et la myonécrose sont cau-sés par *Clostridium* spp., tandis que les infections urinaires et les endocardites sont causées par Enterococcus faecalis.[75]

Les études épidémiologiques ont confirmé des associations statistiques significatives entre l'exposition aux endotoxines et la bronchite chronique dans les groupes modérément exposés, ainsi que des sifflements respiratoires dans les groupes très exposés. L'exposition à *Aspergillus fumigatus* provoque des symptômes respiratoires même à faible exposition. Des concentrations significatives de particules, d'agents microbiens, d'endotoxines et de composés organiques volatils ont été mesurées dans l'environnement de travail des centrales de biogaz.[76]

Les zones critiques d'exposition sanitaire sont la réception et le prétraitement des matières organiques fraîches, qui constituent les zones les plus dangereuses toutes saisons confondues, suivies par le post-traitement par maturation. Les zones de prétraitement où les matières sont agitées lors du brassage manuel ou mécanique et de l'arrosage restent les plus dangereuses pour l'exposition aux bioaérosols.[75]

3.4.2 Risques liés à la sécurité des travailleurs

Type de risque	Danger spécifique	Causes principales	Conséquences des accidents	Zones critiques
Asphyxie	Méthane (CH_4) et CO_2 déplacent l'oxygène	Accès aux cuves sans ventilation préalable, espaces confinés mal ventilés	Perte de conscience rapide, mort par arrêt respiratoire en l'absence de sauveteur équipé, asphyxie en quelques respirations	Digesteur, stockage biogaz, local technique, tous les espaces confinés
Incendie / Explosion	Méthane inflammable entre 4 % et 15 % dans l'air (ATEX)	Fuites de biogaz (soudures défectueuses, soupapes, membranes déchirées, raccords), espaces confinés avec atmosphère explosive, phases de démarrage/arrêt, travaux par points chauds (soudure, meulage)	Incendies catastrophiques, explosions dévastatrices, blessures graves, destruction d'installation	Toutes les zones de stockage biogaz, conduites, digesteur, locaux techniques
Toxicité aiguë (H_2S)	Hydrogène sulfuré 50–5000 ppm dans biogaz, toxicité cellulaire par inhibition cytochrome oxydase	Fuites de conduites, soupapes défaillantes, digesteur, accumulation dans zones basses	Irritation respiratoire à faible dose, paralysie respiratoire rapide à haute dose (> 500 ppm), perte de conscience en quelques respirations, mort par arrêt respiratoire, accidents mortels documentés	Digesteur, fuites de conduites, soupapes, zones basses
Toxicité (NH_3)	Ammoniac présent dans biogaz et digestat	Stockage intrants, manipulation digestat, fuites	Irritation voies respiratoires supérieures, irritation oculaire, brûlures chimiques cornée, brûlures respiratoires à fortes concentrations	Stockage intrants, digestat, zones de manipulation
Toxicité (COV)	250+ composés organiques volatils dans biogaz (aldéhydes, composés soufrés, hydrocarbures)	Fuites diffuses, prétraitement, zones de ventilation insuffisante	Maux de tête, nausées, étourdissements, irritations muqueuses, effets respiratoires et neurologiques selon exposition	Prétraitement, fuites diffuses, zones mal ventilées

Électrique	Électrocution, arc électrique	Moteurs, alternateurs, armoires électriques haute tension de cogénération, maintenance sans consignation	Électrocution mortelle, brûlures électriques graves, lésions internes par passage du courant	Local cogénération, armoires électriques, équipements haute tension
Chute de hauteur	Chute de plusieurs mètres	Maintenance sur méthaniseurs (hauteur plusieurs mètres), toits de stockage ballons membrane, plateformes sans garde-corps	Fractures, traumatismes crâniens, lésions internes, décès	Méthaniseurs, toits ballons membrane, plateformes perchées
Brûlure	Contact surfaces > 80 °C	Moteurs cogénération, échangeurs chaleur, tuyauteries vapeur, post-traitement thermique	Brûlures 2ème/3ème degré, lésions cutanées permanentes	Cogénération, échangeurs, tuyauteries, post-traitement thermique
Écrasement / Collision	Engins lourds circulant près travailleurs	Bennes réception, tracteurs, chargeuses, travailleurs à pied, zones mal éclairées/visibilité réduite	Écrasement mortel, fractures multiples, traumatismes graves	Zone réception matières, stockage digestat, cours de l'installation
Nuisances olfactives	Odeurs fortes biogaz, digestat, fermentation	Fermentation matières organiques, fuites diffuses, stockage	Diminution vigilance, baisse concentration, risque accident indirect, inconfort important	Toutes zones de l'installation, particulièrement réception et stockage

Tableau 5 : Risques liés à la sécurité des travailleurs [75-76-77]

Conclusion

La méthanisation agro-alimentaire constitue une filière importante de valorisation des déchets organiques et de production d'énergie renouvelable. Toutefois, son exploitation ne peut être envisagée sans une maîtrise rigoureuse des risques environnementaux, sanitaires et sécuritaires qui l'accompagnent. Les émissions gazeuses, les bioaérosols, les nuisances olfactives, les risques d'explosion, les contraintes physiques et les effets potentiels du digestat sur les sols montrent que cette technologie nécessite une approche intégrée fondée sur la prévention, le contrôle technique et le respect des règles de sécurité. Ainsi, le développement des unités de biogaz doit s'appuyer sur une gestion responsable des intrants, une surveillance régulière des installations et une protection adaptée des travailleurs, afin de garantir une valorisation durable, sûre et respectueuse de l'environnement.

CHAPITRE 4

Fabrication d'un digesteur de méthanisation
des déjections bovines

Introduction

La méthanisation est un procédé biologique qui permet de transformer la matière organique en biogaz grâce à l'action de micro-organismes en absence d'oxygène. Les déjections de vache constituent une matière première abondante dans les exploitations agricoles et possèdent un fort potentiel de production de biogaz.

Les photographies fournies illustrent les différentes étapes de fabrication d'un digesteur artisanal réalisé à partir de deux fûts plastiques. Le système comprend une chambre de digestion, une chambre de stockage du biogaz, des conduites de transfert et une sortie équipée d'une vanne permettant l'utilisation du gaz produit.

L'objectif de ce chapitre est de présenter la conception, la fabrication, le fonctionnement et les avantages de ce type de digesteur.

4.1 Généralités sur la méthanisation

La méthanisation est un processus naturel de dégradation de la matière organique dans un milieu privé d'oxygène.

Les principales étapes biologiques sont :

1. l'hydrolyse des matières organiques ;
2. l'acidogénèse ;
3. l'acétogénèse ;
4. la méthanogenèse.

Le résultat final est la production :

— d'un biogaz composé principalement de méthane (CH_4) et de dioxyde de carbone (CO_2) ;
— d'un digestat pouvant être utilisé comme fertilisant agricole.

Les déjections bovines sont particulièrement adaptées à ce procédé car elles contiennent une importante population bactérienne facilitant le démarrage de la fermentation.

4.2 Présentation du digesteur réalisé

Le digesteur présenté est constitué de deux fûts plastiques bleus reliés entre eux par des conduites en PVC.

FIGURE 9 – Digesteur assemblé

Cette photographie montre l'installation complète :

— un premier fût servant de chambre de digestion ;
— un second fût servant de réservoir intermédiaire ;
— des tuyaux PVC assurant le transfert du gaz ;
— une vanne rouge de contrôle ;
— une vanne bleue destinée à la sortie du biogaz ;
— une flamme démontrant la présence de méthane combustible.

Cette image constitue la preuve expérimentale du bon fonctionnement du système.

4.3 Matière première

La deuxième photographie présente le substrat utilisé. Il s'agit d'un mélange de bouse de vache.

FIGURE 10 – Décréments de vaches

Ce mélange est préparé afin d'obtenir une boue suffisamment fluide pour faciliter l'activité des bactéries méthanogènes.

4.4 Fermentation en cours

La troisième photographie montre l'intérieur du digesteur pendant la digestion anaérobie.

FIGURE 11 – Matières organiques en décomposition

On observe :

— une couche liquide;
— des matières organiques en décomposition ;
— des bulles de gaz indiquant l'activité microbienne.

4.5 Matériel nécessaire

Pour construire un digesteur semblable, il faut :

a) Équipements principaux

— deux fûts plastiques de 200 litres ;
— des tubes PVC de diamètre 20 à 40 mm ;
— des coudes PVC ;
— des raccords filetés ;
— des vannes d'arrêt ;
— de la colle PVC ;
— des joints d'étanchéité ;
— un flexible à gaz.

b) Outils

— une perceuse ;
— une scie à métaux ;
— des clés de serrage ;
— un mètre ruban ;
— un marqueur.

c) Matière organique

— des déjections de vache fraîches ;
— de l'eau propre.

4.6 Conception du digesteur

Le principe de fonctionnement repose sur la fermentation anaérobie. Le premier fût constitue le réacteur principal où se déroule la dégradation biologique.

Le second fût assure :

— la régulation de pression ;
— le stockage temporaire du gaz ;
— la séparation partielle entre liquide et gaz.

Le réseau de tuyauterie assure :

— le transfert du biogaz ;
— l'équilibrage des pressions;
— l'alimentation éventuelle d'un brûleur.

4.7 Étapes de fabrication

Après la préparation du substrat, les fûts destinés au digesteur sont soigneusement nettoyés afin d'éliminer toute trace de produit chimique, puis inspectés pour vérifier l'absence de fissures et assurer l'étanchéité des couvercles. Des ouvertures sont ensuite réalisées pour permettre l'entrée du substrat, la sortie du digestat et le passage des conduites de gaz, en veillant à ce que leur diamètre corresponde aux raccords utilisés. Les conduites en PVC sont alors assemblées conformément au schéma de conception et les raccords sont collés avec soin afin de prévenir toute fuite, notamment au niveau des zones de jonction.

Deux vannes sont installées, l'une pour le contrôle intermédiaire et l'autre pour la sortie du gaz, permettant ainsi l'isolement du système, la régulation du débit de biogaz et les opérations de maintenance. Une vérification de l'étanchéité est ensuite effectuée en remplissant le système d'air sous faible pression et en appliquant de l'eau savonneuse sur les raccords ; l'apparition de bulles révèle d'éventuelles fuites qui doivent être corrigées.

Enfin, le digesteur est chargé avec un substrat préparé à partir d'un mélange homogène composé de 50 % de bouse de vache et de 50 % d'eau. Ce mélange est introduit dans le digesteur jusqu'à environ deux tiers de son volume total, de manière à conserver un espace libre nécessaire à l'accumulation du biogaz produit lors de la fermentation.

4.8 Fonctionnement biologique

Une fois chargé, le digesteur est fermé hermétiquement. Les bactéries commencent alors à décomposer la matière organique.

Pendant cette phase :

— les composés complexes sont hydrolysés;
— les acides organiques sont formés;
— le méthane est progressivement produit.

La durée de fermentation varie généralement entre :

— 20 et 40 jours selon la température ;
— la qualité du substrat ;
— le pH du milieu.

4.9 Production et utilisation du biogaz

Le biogaz produit est composé en moyenne de :

Composant	Pourcentage
Méthane (CH_4)	50 à 70 %
Dioxyde de carbone (CO_2)	30 à 45 %
Vapeur d'eau	1 à 5 %
Gaz traces	< 1 %

FIGURE 12 – Production du biogaz

Le gaz peut être utilisé pour :

— la cuisson ;
— l'éclairage ;
— le chauffage de l'eau ;
— l'alimentation de petits moteurs adaptés.

La présence d'une flamme visible sur la photographie confirme que le gaz produit contient une quantité suffisante de méthane pour la combustion.

On observe :

— un boîtier de filtre de type traitement d'eau, sous forme de cartouche bleue transparente ;
— deux raccords permettant l'entrée et la sortie du gaz ;
— une personne en train d'installer ou de raccorder un tube.

Épurateur de biogaz

Ce dispositif est utilisé comme filtre ou épurateur de biogaz. Il peut contenir :

— de la laine d'acier pour l'élimination du sulfure d'hydrogène (H_2S) ;
— du charbon actif ;
— un matériau absorbant l'humidité.

L'objectif est de purifier le biogaz avant son utilisation afin de réduire les odeurs, de limiter la corrosion des équipements et d'améliorer la qualité de la combustion.

4.10 Avantages du système

a) Avantages environnementaux

— réduction des déchets organiques ;
— limitation des émissions de gaz à effet de serre ;
— production d'énergie renouvelable.

b) Avantages économiques

— réduction de la consommation de gaz commercial ;
— valorisation des déjections animales;
— production d'un fertilisant naturel.

c) Avantages sociaux

— amélioration de l'autonomie énergétique;
— réduction de la déforestation liée à l'usage du bois de chauffe ;
— amélioration des conditions de vie en milieu rural.

4.11 Limites et recommandations

Malgré ses avantages, ce type de digesteur présente certaines limites :

— faible capacité de stockage ;
— sensibilité aux variations de température ;
— nécessité d'un entretien régulier;
— risque de fuite si l'étanchéité n'est pas assurée.

Recommandations

— maintenir une température comprise entre 25 °C et 37 °C ;
— vérifier régulièrement les raccords ;
— éviter l'introduction de produits chimiques ;
— nettoyer périodiquement les conduites.

Conclusion

La fabrication d'un digesteur de méthanisation à partir de fûts plastiques constitue une solution simple, économique et adaptée aux exploitations agricoles disposant de déjections bovines. Les photographies présentées montrent les principales composantes du dispositif : le montage des fûts, la préparation du substrat et la production effective de biogaz attestée par une flamme de combustion.

Ce système permet simultanément de valoriser les déchets organiques, de produire une énergie renouvelable et d'obtenir un fertilisant organique de qualité. Son adoption peut contribuer à l'amélioration de l'autonomie énergétique des ménages et des exploitations agricoles tout en participant à la protection de l'environnement.

Conclusion générale

Conclusion générale

La production de biogaz à partir de déchets organiques représente une solution pertinente face aux défis énergétiques, environnementaux et économiques actuels. À travers ce travail, il a été montré que la méthanisation permet de transformer des matières résiduelles, souvent considérées comme des déchets, en une source d'énergie renouvelable exploitable, tout en produisant un digestat valorisable comme fertilisant agricole.

L'étude théorique a permis de présenter les principes fondamentaux du biogaz, sa composition, les étapes biologiques de la digestion anaérobie et les principaux paramètres influençant le rendement du procédé. Elle a également mis en évidence l'importance du choix des substrats, de la maîtrise des conditions opératoires et du contrôle des risques associés à cette technologie.

L'analyse HSE a montré que la méthanisation, bien qu'avantageuse, nécessite une gestion rigoureuse des dangers liés aux gaz inflammables et toxiques, aux risques biologiques, aux nuisances olfactives, aux équipements sous pression et aux impacts potentiels sur l'environnement. La sécurité des travailleurs, la prévention des fuites, la ventilation, la détection des gaz et l'entretien régulier des installations constituent donc des éléments essentiels pour garantir un fonctionnement fiable et sûr.

La partie pratique consacrée à la fabrication d'un digesteur artisanal à partir de fûts plastiques a montré qu'il est possible de produire du biogaz à petite échelle avec des moyens simples et accessibles. Les photographies présentées ont illustré les différentes étapes du dispositif : préparation du substrat, fermentation anaérobie, production du gaz, épuration et utilisation par combustion. Cette réalisation confirme le potentiel des déjections bovines comme matière première pour la production de biogaz en milieu agricole.

En définitive, le biogaz constitue une filière prometteuse pour la valorisation des déchets organiques, la réduction des émissions polluantes et le renforcement de l'autonomie énergétique, notamment dans les zones rurales. Cependant, son développement doit s'accompagner d'une démarche de prévention, de formation et de contrôle technique afin d'assurer la sécurité des installations et la protection de l'environnement. La généralisation de ce type de système pourrait contribuer de manière significative à une transition énergétique plus durable et à une meilleure gestion des ressources organiques disponibles.

Dans une perspective de développement, la filière biogaz présente un intérêt particulier pour l'Algérie. Le pays dispose d'importantes ressources organiques issues de l'élevage, de l'agriculture, des marchés, des abattoirs, des industries agroalimentaires et des centres d'enfouissement technique. Ces gisements pourraient être valorisés localement afin de produire une énergie renouvelable complémentaire au gaz naturel, de réduire la pression sur les ressources fossiles et de limiter les émissions de méthane provenant de la décomposition non contrôlée des déchets. Le développement de petites unités de méthanisation dans les exploitations agricoles, les zones rurales et les communes pourrait aussi contribuer à améliorer l'autonomie énergétique locale et à fournir un fertilisant organique utile pour les sols agricoles.

Pour favoriser cette évolution en Algérie, plusieurs actions peuvent être envisagées : renforcer les programmes de sensibilisation et de formation des agriculteurs, encourager les projets pilotes de

digesteurs ruraux, intégrer la méthanisation dans les politiques de gestion des déchets, soutenir la recherche universitaire sur l'adaptation des digesteurs au climat local, et mettre en place des mécanismes d'accompagnement technique et financier. Ainsi, le biogaz pourrait devenir un levier concret de transition énergétique, d'économie circulaire et de développement durable, particulièrement dans les régions agricoles et les zones isolées où les besoins en énergie et en gestion des déchets restent importants.

Références bibliographiques

Références

[1] D. Deublein and A. Steinhauser, *Biogas from Waste and Renewable Resources : An Introduction*, 2nd ed. Weinheim, Germany : Wiley-VCH, 2011.

[2] A. J. Ward, P. J. Hobbs, P. J. Holliman, and D. L. Jones, "Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources," *Bioresource Technology*, vol. 99, no. 17, pp. 7928–7940, 2008.

[3] K. Möller and T. Müller, "Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth," *Engineering in Life Sciences*, vol. 12, no. 3, pp. 242–257, 2012.

[4] P. G. Kougias and I. Angelidaki, "Biogas and its opportunities—A review," *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, vol. 12, no. 3, Art. no. 14, 2018.

[5] I. Hegazy, N. Paltrinieri, and N. Dechy, "Biogas plants accidents : Analyzing occurrence, severity, and associations between 1990 and 2023," *Safety Science*, vol. 176, Art. no. 106527, 2024.

[6] K. Rajendran, S. Aslanzadeh, and M. J. Taherzadeh, "Household Biogas Digesters—A Review," *Energies*, vol. 5, no. 8, pp. 2911–2942, 2012.

[7] J. Cheng, Ed., *Biomass to Renewable Energy Processes*. Boca Raton, FL, USA : CRC Press, 2010.

[8] Académie des technologies, *Le biogaz*. Paris, France : EDP Sciences, 2016. ISBN : 978-2-7598-1850-1.

[9] Nénufar, "Composition du biogaz," *nenufar.fr*, 17 mars 2021. [En ligne].

[10] J. Guittard, "La méthanisation," *Espace pédagogique de l'Académie de Poitiers – Biotechnologies Biochimie Génie Biologique*, Académie de Poitiers.

[11] ORDECO, "Biodéchets alimentaires – Restauration, déchets organiques de l'industrie agro-alimentaire," *ordeco.org*. [En ligne].

[12] ECOinfos – Les Énergies Renouvelables, "Tout savoir sur la méthanisation," *les-energies-renouvelables.eu*. [En ligne]. Disponible : https://www.les-energies-renouvelables.eu/conseils/methanisation/.

[13] R. Agabi, A. Bouhadid, and Y. Lahaouareche, "La valorisation des déchets organiques," Mémoire de Master, Département de Biologie, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Sciences de la Terre et de l'Univers, Université 8 Mai 1945, Guelma, Algérie, sept. 2020.

[14] J. Vernier, *Les déchets*. Paris, France : Éditions Ellipses. [En ligne]. Disponible : https://www.editions-ellipses.fr/PDF/9782729850784_extrait.pdf.

[15] ORDECO, "Réglementation générale des déchets" [image en ligne], *ordeco.org*. [En ligne]. Disponible : https://www.ordeco.org/reglementation-generale-des-dechets.

[16] R. Moletta, *La méthanisation*, 3e éd. Paris, France : Lavoisier, 2015, 528 p.

[17] GRDF, "Comment valoriser les biodéchets ?" *grdf.fr*. [En ligne].

[18] GRDF, "Le BioGNV : un carburant bas carbone," *grdf.fr*. [En ligne].

[19] Métha'Synergie, "La valorisation du digestat," *methasynergie.fr*. [En ligne].

[20] N. Dagorn et H. Lagrange, "Co-produits de méthanisation – Enfouir les digestats juste après épandage pour bien les valoriser," ARVALIS – Institut du végétal, 10 févr. 2022. [En ligne].

[21] Google Images, “Figure 3,” image en ligne.

[22] Camfil, “Biogaz : définition, avantages et inconvénients,” *camfil.com*, 17 mai 2024.

[23] A. Chelha, “Étude technico-économique d’un projet de bio-méthanisation des déchets fermiers,” Mémoire de Master, Département de Génie Chimique, Laboratoire de Valorisation des Énergies Fossiles, École Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2016.

[24] A. A. Werkneh, “Biogas impurities : environmental and health implications, removal technologies and future perspectives,” *Heliyon*, vol. 8, no. 10, Art. no. e10929, oct. 2022, doi : 10.1016/j.heliyon.2022.e10929.

[25] International Energy Agency (IEA), *Outlook for Biogas and Biomethane*. Paris, France : IEA Publications, 2025.

[26] A. I. Kouzi, M. Puranen, and M. H. Kontro, “Evaluation of the factors limiting biogas production in full-scale processes and increasing the biogas production efficiency,” *Environ-mental Science and Pollution Research*, vol. 27, no. 22, pp. 28155–28168, Aug. 2020, doi : 10.1007/s11356-020-09035-1.

[27] Camfil, “Biogaz : définition, avantages et inconvénients,” Camfil France, 17 mai 2024. [En ligne]. Disponible : https://www.camfil.com/fr-fr/infos/turbomachines-et-energie/biogaz---definition-avantages-et-inconvenient.

[28] Club Biogaz ATEE, *Le biogaz, une énergie renouvelable multiforme, stratégique dans la transition : Livre blanc du biogaz*. Paris, France : Association Technique Énergie Environnement (ATEE), mai 2014.

[29] “What Are Biogas Environmental Impacts ?” *Sustainability Directory*, Mar. 12, 2025. [Online]. Available : https://energy.sustainability-directory.com/question/what-are-biogas-environmental-impacts/.

[30] R. Wüstenhagen, M. Wolsink, and M. J. Bürer, “Social acceptance of renewable energy innovation : An introduction to the concept,” *Energy Policy*, vol. 35, no. 5, pp. 2683–2691, May 2007, doi : 10.1016/j.enpol.2006.12.001.

[31] A. Abada, M. Ikram, and M. Kousksou, “An overview of sustainable bioenergy potential in Algeria,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 72, pp. 240–245, May 2017, doi : 10.1016/j.rser.2017.01.072.

[32] M. Arab and T. Yessad, *Gestion et caractérisation des déchets ménagers et assimilés dans le village d’Azra, Tigzirt, Wilaya de Tizi-Ouzou*, Mémoire de Master, Spécialité Protection des Écosystèmes, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Tizi-Ouzou, Algérie, 2021.

[33] L. Brik and A. Guerriche, *La valorisation des déchets*, Mémoire de Master, Spécialité Écologie Microbienne, Département d’Écologie et Environnement, Université de Bouira, Bouira, Algérie, 2021.

[34] F. U. Battistuzzi, A. Feijao, and S. B. Hedges, “A genomic timescale of prokaryote evolution : insights into the origin of methanogenesis,” *BMC Evolutionary Biology*, vol. 4, no. 44, 2004, doi : 10.1186/1471-2148-4-44.

[35] A. Chelha, “Mémoire de Master en Génie Chimique,” Département du Génie Chimique, Laboratoire de Valorisation des Énergies Fossiles, soutenu publiquement le 21 juin 2016.

[36] Image en ligne.

[37] FranceEnvironnement, “Quels sont les types de digesteurs existants ?”, 25 janv. 2024. [En ligne]. Disponible : https://www.franceenvironnement.com/question/quels-sont-les-types-de-digesteurs-existants.

[38] R. Moletta, “Technologies de la méthanisation de la biomasse : déchets ménagers et agricoles,” in *La méthanisation*, 2e éd., 2011, p. 177.

[39] D. House, *Biogas Handbook*. United States : Alternative House Information, 2006, pp. 46–47.

[40] F. Perron, "Potentiel énergétique et gains environnementaux générés par la biométhanisation des matières organiques résiduelles au Québec," Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Québec, Canada, 2010.

[41] N. Bernet and P. Buffière, "Caractérisation de la mise en oeuvre de la méthanisation," in *La méthanisation*, R. Moletta, Ed., 2e éd. Paris, France : TEC & DOC, 2008, pp. 87–113.

[42] "Digesteur anaérobie humide" [image en ligne].

[43] "Digesteur anaérobie en mode discontinu" [image en ligne].

[44] S. B. I. Ouedraogo, *Adoption de la technologie du biodigesteur pour la production de biométhane dans la région de la Boucle du Mouhoun au Burkina Faso*, Mémoire de maîtrise, Département de Biologie végétale, Université Laval, Québec, Canada, 2016.

[45] Association des Agriculteurs Méthaniseurs de France (AAMF), *Guide de suivi de la biologie sur une unité de méthanisation agricole*. Rennes, France : AILE, avec le soutien de l'ADEME, juin 2011. [En ligne]. Disponible : https://aamf.fr/wp-content/uploads/2021/11/Guide-s uivi-biologie-2011-AILE.pdf.

[46] Solveno Technologies, "Valorisation du biogaz," Solveno Technologies. [En ligne]. Disponible : https://www.solvenotechnologies.com/fr/connaissance/valorisation-du-biogaz.

[47] AILE (Association d'Initiatives Locales pour l'Énergie et l'Environnement), *Le biogaz*. [En ligne]. Disponible : https://aile.asso.fr/biogaz/ressources-outils/le-biogaz/.

[48] IFP Energies nouvelles, "Biogaz et biométhane : transformer nos déchets en énergie." [En ligne]. Disponible : https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptag es/energies-renouvelables/biogaz-et-biomethane-transformer-nos-dechets-en-ene rgie.

[49] Image en ligne.

[50] T. L. Guidotti, "Hydrogen sulfide : Advances in understanding human toxicity," *International Journal of Toxicology*, vol. 29, no. 6, pp. 569–581, Dec. 2010, doi : 10.1177/1091581810384882.

[51] Archview Services, "Staying Compliant With Biogas Safety Regulations," Apr. 12, 2024, updated Aug. 29, 2024. [Online]. Available : https://www.archviewservices.com/staying-compl iant-with-epa-biogas-regulations/.

[52] CNESST, "Gaz de lisier," Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail, Québec, Canada. [En ligne]. Disponible : https://www.cnesst.gouv.qc.ca/fr/preve ntion-securite/identifier-corriger-risques/liste-informations-prevention/gaz-l isier.

[53] M. Tamburini, R. Pernetti, M. Anelli, E. Oddone, A. Morandi, A. Osuchowski, S. Villani, C. Montomoli, and M. C. Monti, "Analysing the impact on health and environment from biogas production process and biomass combustion : A scoping review," *International Jour-nal of Environmental Research and Public Health*, vol. 20, no. 7, p. 5305, Mar. 2023, doi : 10.3390/ijerph20075305.

[54] A. Bec, F. Boutin, P. Delaunois, J. Beillevaire, A. Giraudeau, S. Moreau, G. Mauguen, T. Palka, G. Petegnief, C. David, F. Marc, and B. Sallé, *Méthanisation de déchets issus de l'élevage, de l'agriculture et de l'agroalimentaire : risques et prescriptions de sécurité*. Paris, France : Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS), ED 6153, juin 2013.

[55] K. Adam and S. Evanno, *Règles de sécurité des installations de méthanisation agricole*. Verneuil-en-Halatte, France : Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (INERIS), Guide technique, première édition, fév. 2018.

[56] "Biogas Safety First and the Safety of AD Plants," *Anaerobic Digestion Community Website*, Feb. 27, 2021. [En ligne]. Disponible : https://anaerobic-digestion.com/biogas-safety-f irst-and-the-safety-of-ad-plants/.

[57] C. Scheutz, P. Kjærgaard, M. Bogner, A. De Visscher, and P. H. Nielsen, "Total methane emission rates and losses from 23 biogas plants," *Waste Management*, vol. 97, pp. 64–74, Oct. 2019, doi : 10.1016/j.wasman.2019.07.029.

[58] G. Myhre, D. Shindell, F.-M. Bréon, W. Collins, J. Fuglestvedt, J. Huang, et al., "Anthropo-genic and Natural Radiative Forcing," in *Climate Change 2013 : The Physical Science Basis*, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, U.K. : Cambridge University Press, 2013, ch. 8.

[59] N. Rodríguez-Eugenio, F. McLaughlin, and T. Pennington, "Environmental impact of biogas : A short review of current knowledge," *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, vol. 53, no. 10, pp. 899–906, 2018, doi : 10.1080/10934529.2018.1459076.

[60] R. Paglini, F. M. Caresana, M. M. Carnesecchi, and A. M. Ferrari, "Biogas impurities : Environmental and health implications, removal technologies and future perspectives," *RSC Advances*, vol. 12, no. 56, pp. 36173–36200, 2022, doi : 10.1039/D2RA06087K.

[61] J. Bandara, N. S. B. Jayatunga, M. A. K. Perera, and M. A. R. M. Fernando, "Computational investigation of NOx emission in biogas combustion," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 30, no. 38, pp. 89548–89558, 2023, doi : 10.1007/s11356-023-28607-5.

[62] M. Wiśniewska, M. Kulig, and J. Lelicińska-Serafin, "Odour Nuisance at Municipal Waste Biogas Plants," *Energies*, vol. 14, no. 20, Art. no. 6470, 2021, doi : 10.3390/en14206470.

[63] M. Wiśniewska, M. Kulig, and J. Lelicińska-Serafin, "Odour Emissions of Municipal Waste Biogas Plants," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 3, Art. no. 1093, 2020, doi : 10.3390/app10031093.

[64] N. Svoboda, H. Taube, M. Wienforth, A. Kluß, H. Kage, and F. Ohl, "Nitrogen leaching losses after biogas residue application to maize," *Field Crops Research*, vol. 140, pp. 95–103, Jan. 2013, doi : 10.1016/j.fcr.2012.10.009.

[65] J. N. Meegoda, B. Li, K. Patel, and L. B. Wang, "A Review of the Processes, Parameters, and Optimization of Anaerobic Digestion," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 15, no. 10, Art. no. 2224, Oct. 2018, doi : 10.3390/ijerph15102224.

[66] S. Harirchi, S. Wainaina, T. Sar, S. A. Nojoumi, M. Parchami, M. Parchami, et al., "Microbiological insights into anaerobic digestion for biogas, hydrogen or volatile fatty acids (VFAs) : a review," *Critical Reviews in Biotechnology*, vol. 42, no. 5, pp. 6521–6557, 2022, doi : 10.1080/07388551.2022.2031555.

[67] I. Wolak, M. Zdanowski, K. Harnisz, A. Korzeniewska, and J. Cydzik-Kwiatkowska, "Digestate from Agricultural Biogas Plants as a Reservoir of Antimicrobials and Antibiotic Resistance Genes," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 20, no. 3, Art. no. 2672, 2023, doi : 10.3390/ijerph20032672.

[68] W. Jia, Y. Wang, X. Zhang, Y. Chen, and Y. Li, "Organic micropollutants, heavy metals and pathogens in anaerobic digestate based on food waste," *Waste Management*, vol. 144, pp. 144–153, 2022, doi : 10.1016/j.wasman.2022.03.021.

[69] République Française, *Arrêté du 10 novembre 2009 fixant les règles techniques applicables aux installations de méthanisation, modifié par l'arrêté du 14 juin 2021* . Paris, France : Ministère de la Transition Écologique, 2021.

[70] Green Gas Inc., "Stages of Anaerobic Digestion : Essential Guide to Biogas Production," Green Gas Inc., Aug. 7, 2025. [Online].

[71] National Environmental Trainers, “What is H2S (Hydrogen Sulfide) ?” *National Environmental Trainers Blog*. [Online]. Available : https://www.natlenvtrainers.com/blog/article/what-is-h2s/. [Accessed : Jun. 5, 2026].

[72] J. C. Gaby, M. Zamanzadeh, and S. J. Horn, “The effect of temperature and retention time on methane production and microbial community composition in staged anaerobic di-gesters fed with food waste,” *Bioresource Technology*, vol. 189, pp. 327–334, 2015, doi : 10.1016/j.biortech.2015.04.050.

[73] IEA Bioenergy Task 37, *Nutrient Recovery by Biogas Digestate Processing*. Paris, France : International Energy Agency Bioenergy, 2015.

[74] N. Bernet, “Principes et application de la digestion anaérobie pour la production d’énergie,” INRA, UR0050, Laboratoire de Biotechnologie de l’Environnement, F-11100 Narbonne, France, in *Colloque international « Biodiversité et changements globaux : valorisation des efluents des industries, des résidus agro-pastoraux et forestiers »*, Ngaoundéré, Cameroun, juil. 2015.

[75] B. Bakhiyi, J.-F. Masson, and S. Bauchert, “Exposition des travailleurs aux substances chimiques et aux agents biologiques dans les usines de biométhanisation des matières orga-niques putrescibles : Évaluation exploratoire,” Institut de recherche en santé et sécurité du travail du Québec (IRSST), Rapport de recherche R-1023, 2018. [Online]. Available : https://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-1023.pdf.

[76] M. Tamburini and R. Pernetti, “Analysing the Impact on Health and Environment from Bio-gas Production Process and Biomass Combustion : A Scoping Review,” *International Jour-nal of Environmental Research and Public Health*, vol. 20, no. 5, p. 5305, Mar. 2023, doi : 10.3390/ijerph20055305. [Online]. Available : https://www.mdpi.com/1660-4601/20/5/5305.

[77] J. Broz, “Étude comparative des dangers et des risques liés au biogaz et au gaz naturel,” INERIS, Rapport d’étude N° 46032 – DRA – 2006-JBr/Biogaz/1, 2006. [Online]. Available : https://www.ineris.fr/sites/default/files/contribution/Documents/Rapport_Biogaz_web.pdf.