

Page de gard_finale.pdf

Table des matières.pdf

Liste des figures tableaux photos abréviation.pdf

Introduction générale.pdf

CHAP 01 Valorisation des déchets solides.pdf

CHAP 02 Digestion anaérobique et biogaz.pdf

CHAP 03 Matériels et méthodes.pdf

CHAP 04 Résultats et discussions.pdf

CONCLUSION générale.pdf

REFERANCS BIBLIOGRAPHIQUE.pdf

Annexes.pdf

RESUME.pdf

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université de Ghardaïa



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie des procédés



**Laboratoire de Mathématiques
et Sciences Appliquées**



**Laboratoire Energie, Environnement
et Systèmes d'Information**

**Valorisation Energétique par
La Production d'Electricité à Partir de la Digestion
Anaérobie des Déchets Organiques dans le Milieu
Saharien**

Thèse de Doctorat LMD en **Génie des procédés**
Spécialité: **Gestion et valorisation des ressources naturelles dans
les régions sahariennes**

Présentée par l'étudiant: TAHRI Ahmed

Devant le jury composé de:

No	Nom et prénom	Grade	Etablissement	Qualité
1	DAOUDI Bahmed	Professeur	Université de Ghardaïa	Président
2	KALLOUM Slimane	Maître de conférences A	Université d'Adrar	Rapporteur
3	BABA AMER Zohra	Maître de conférences A	Université de Ghardaïa	Co- rapporteur
4	IDDOU Abdelkader	Professeur	Université d'Adrar	Examineur
5	TOUAFEK Khaled	Maître de recherche A	U R A E R Ghardaïa	Examineur
6	BOUSDIRA Khalida	Maître de recherche A	U R A E R Ghardaïa	Examineur

Année universitaire: 2018-2019

Table des matières

Liste des figures.....	i
Liste des tableaux.....	ii
Liste des photos.....	iii
Liste des abréviations.....	v
Liste des unités.....	vi
Introduction générale.....	1
PARTIE THEORIQUE	
Chapitre I: Valorisation des déchets solides	
Introduction.....	4
I.1. Définition des déchets.....	4
I.2. les principaux types de déchets.....	4
I.2.1. D'après leur origine.....	4
I.2.1.1. Les déchets ménagers et assimilés.....	4
I.2.1.2. Les déchets industriels.....	4
I.2.1.2.1. Les déchets industriels banals.....	4
I.2.1.2.2. Les déchets industriels dangereux.....	5
I.2.2. D'après leur nature.....	5
I.2.2.1. Déchets dangereux.....	5
I.2.2.2. Déchets inertes.....	5
I.2.2.3. Déchets ultimes.....	5
I.3. Déchets ménagers.....	5
I.3.1. Définition.....	5
I.3.2. La composition des déchets ménagers.....	6
I.3.3. La production des déchets ménagers.....	7
I.3.4. Les modes d'élimination et de traitement des déchets ménagers.....	9
I.3.4.1. La mise en décharge.....	9
I.3.4.2. Le recyclage.....	10
I.3.4.3. Traitement thermique (L'incinération).....	11
I.3.4.4. Le traitement biologique.....	13
I.3.4.4.1. Le compostage.....	13
I.3.4.4.2. La fermentation alcoolique.....	18
I.3.4.4.3 : La méthanisation.....	20
Chapitre II: La digestion anaérobique et biogaz	
Introduction.....	21
II.1. Définition de la digestion anaérobique.....	21
II.2. Historique de la méthanisation.....	21
II.3. Mise en œuvre de la méthanisation.....	22
II.4. Les Etapes de la méthanisation.....	22
II.4.1. L'hydrolyse.....	23
II.4.2. L'acidogenèse.....	23
II.4.3. L'acétogenèse.....	23
II.4.4. La méthanogenèse.....	23
II.5. Les paramètres influençant la méthanisation.....	24
II.5.1. pH.....	24
II.5.2. La température.....	24
II.5.3. L'absence d'oxygène.....	29
II.5.4. Rapport C/N.....	29
II.5.5. Brassage.....	30
II.5.6. Pression partielle en hydrogène.....	30
II.5.8. L'absence des inhibiteurs.....	31
II.5.9. Temps de rétention hydraulique (TRH).....	32
II.6. Le digesteur.....	33

II.6.1. Définition.....	33
II.6.2. Classifications des différents types de digesteurs.....	34
II.6.2.1. Mode de l'alimentation.....	34
II.6.2.1.1. Les digesteurs discontinus.....	34
II.6.2.1.2. Les digesteurs continus.....	35
II.6.2.2. Classification selon le type de substrat.....	36
II.6.2.3. Classification selon le nombre d'étapes.....	36
II.7. Les avantages et les inconvénients de la digestion anaérobie.....	38
II.2. biogaz.....	39
II.2.1. Définition et Composition.....	39
II.2.1. Historique.....	39
II.2.3. Ressources de biogaz.....	40
II.2.4. Valeur énergétique.....	41
II.2.5. Purification du biogaz.....	41
II.2.6. Valorisation de biogaz.....	42
II.2.6.1. Valorisation thermique en chaudière.....	43
II.2.6.2. Valorisation électrique du biogaz.....	43
II.2.6.3. Valorisation en carburant automobile.....	43
II.2.6.4. Valorisation par injection dans le réseau de gaz de ville.....	43
II.3. Substrat.....	43
II.3.1. Les effluents d'élevage.....	43
II.3.2. Les eaux usées urbains.....	43
II.3.3. Les déchets agro-alimentaires.....	44
II.3.4. les ordures ménagères.....	44

PARTIE PRATIQUE

Chapitre III: Matériels et méthode

Introduction.....	45
III.1. A l'échelle du laboratoire.....	45
III.1.1. Optimisation de temps de rétention hydraulique(TRH).....	45
III.1.2. Pour l'optimisation du taux de la charge organique moyenne(COM).....	47
III. 2. A l'échelle pilote(Le digesteur enterré).....	47
III. 2.1. Les étapes de construction.....	47
III. 2.2. Etas finale de l'installation pilote de production de biogaz.....	49
III. 2.3. Le substrat.....	50
III. 2.4. Méthodes utilisées.....	50
III.3. Traitement de biogaz produit.....	50
III.3.1. Filtre de dioxyde de carbone (CO ₂).....	50
III.3.2. Déshydratation du biogaz (Piège à eau).....	51
III.3.3. Désulfuration de biogaz (filtrage de H ₂ S):.....	52
III.4. Mesure de biogaz.....	53
III.4.1. Le compresseur à air.....	53
III.4.2. Régulateur gaz (détendeur).....	53
III.4.3. Le Compteur à gaz.....	53
III.5. Production d'électricité.....	54
III.5.1. Générateur de gaz.....	54
III.5.2. Méthodes utilisées.....	54
III.6. Méthodes analytiques.....	55
III.6.11. Quantification de volume de biogaz et de CH ₄ produit.....	56
III.7. Analyse statistiques.....	58

Chapitre VI: Résultats et discussions

Introduction.....	59
VI.1. Optimisation de temps de rétention hydraulique.....	59
VI.1.1. Caractéristiques initiales du substrat.....	59
VI.1.2 Le pH.....	60
VI.1.3 Rapport AGV/TAC.....	63

VI.1.4. volume de biogaz.....	66
VI.1.5. volume de méthane.....	69
VI.1.6. Cumulation des volumes.....	71
VI.1.7. Caractérisation du substrat après la digestion.....	72
VI.1.8. Conclusion.....	73
VI.2. Optimisation du taux de charge organique moyenne.....	74
VI.2.1. Caractéristiques initiales du substrat.....	74
VI.2.2. Le pH.....	75
VI.2.3. Rapport AGV/TAC.....	78
VI.2.4. volume de biogaz.....	81
VI.2.5. volume de méthane(CH ₄).....	86
VI.2.6. Cumulation des volumes.....	87
VI.2.7. Caractérisation du substrat après la digestion.....	87
VI.2.8. Conclusion.....	87
VI.3. Démarrage de digesteur pilote.....	89
VI.3.1 Caractérisation du substrat utilisé.....	89
VI.3.2 Le pH.....	89
VI.3.3 La Demande chimique en oxygène(DCO).....	90
VI.3.4 Le volume de biogaz et de méthane.....	90
VI.3.5 Variation du Titre Alcalimétrique Complet (TAC).....	91
VI.3.6 Inflammabilité du biogaz.....	92
VI.3.7 Evolution des fluors microbiens.....	93
VI.3.7.1. Les germes totaux.....	94
VI.3.7.2 Les coliformes fécaux.....	95
VI.3.7.3 Les staphylocoques.....	95
VI.3.7.4 Les streptocoques fécaux.....	95
VI.3.8. Conclusion.....	96
VI.4 Production d'électricités.....	97
VI.4.1 Identification qualitative du biogaz par la chromatographie en phase gazeuse(CPG).....	97
VI.4.2. Suivi de la tension du courant électrique	98
VI.4.3. Suivi de l'intensité du courant électrique	99
VI.4.4. La puissance du courant électrique.....	99
VI.4.5. Conclusion.....	101
Conclusion générale.....	102

Liste des figures

Figure 01 : Composition moyenne des déchets ménages Algériens (Année 2016).....	7
Figure 02 : Projection de la production de déchets ménagers en Algérie.....	8
Figure 03: Recyclage des déchets organique.....	9
Figure 04 : Schéma d'une installation d'incinération des déchets	12
Figure 05: Schéma simplifié du mécanisme réactionnel mis en jeu lors du compostage.....	14
Figure 06 : Schéma de fabrication du bioéthanol à partir des déchets organique.....	19
Figure 07: Les principales étapes de la méthanisation.....	23
Figure 08: Flux métabolique de la digestion anaérobie.....	25
Figure 09 : Différentes formes de digesteurs.....	34
Figure 10 : Une installation de bio-digesteur type chinois.....	35
Figure 11 : Principe d'un réacteur homogène et exemple d'une installation.....	36
Figure 12: Exemple de schéma de principe du digesteur à cellules (fermentation discontinue).....	37
Figure 13 : Stratégies de mise en œuvre de la digestion anaérobie en deux étapes.....	37
Figure 14 : Equivalences énergétiques de 1 m ³ de méthane.....	40
Figure 15: Dispositif expérimental du digesteur continu à l'échelle du laboratoire.....	45
Figure 16: Les différents composants du digesteur enterré.....	50
Figure 17: Schéma descriptif Filtre de dioxyde de carbone CO ₂	51
Figure 18: Schéma descriptif de piège à eau.....	52
Figure 19: Schéma descriptif Filtre de sulfure d'hydrogène (H ₂ S).....	53
Figure 20: Schéma représentatif de système de mesure du volume du biogaz et de CH ₄ produit. (Test de potentiel méthanogène ou BMP).....	57
Figure 22: Evolution de pH pour le TRH 14.....	60
Figure 23: Evolution de pH pour le TRH 21.....	60
Figure 24: Evolution de pH pour le TRH 28.....	61
Figure 25: Evolution de pH pour le TRH 35.....	61
Figure 26: Evolution de rapports AGV/TAC avec TRH 07.....	62
Figure 27: Evolution de rapports AGV/TAC avec TRH 14.....	62
Figure 28: Evolution de rapports AGV/TAC avec TRH 21.....	63
Figure 29: Evolution de rapports AGV/TAC avec TRH 28.....	63
Figure 30: Evolution de rapports AGV/TAC avec TRH 35.....	60
Figure 31: Evolution des volumes de biogaz avec le TRH 07.....	60
Figure 32: Evolution des volumes de biogaz avec le TRH 14.....	61
Figure 33: Evolution des volumes de biogaz avec le TRH 21.....	61
Figure 34: Evolution des volumes de biogaz avec le TRH 28.....	64

Figure 35: Evolution des volumes de biogaz avec le TRH 35.....	64
Figure 36: Evolution des volumes de méthane avec le TRH 07.....	65
Figure 37: Evolution des volumes de méthane avec le TRH 14.....	65
Figure 38: Evolution des volumes de méthane avec le TRH 21.....	66
Figure 39: Evolution des volumes de méthane avec le TRH 28.....	67
Figure 40: Evolution des volumes de méthane avec le TRH 35.....	67
Figure 41: Les cumule des volumes (biogaz et méthane) avec les différents temps des réentions hydrauliques.	72
Figure 42: Evolution du pH en fonction de temps avec COM 1.....	75
Figure 43: Evolution du pH en fonction de temps avec COM 1,5.....	75
Figure 44: Evolution du pH en fonction de temps avec COM 2.....	76
Figure 45: Evolution du pH en fonction de temps avec COM 3.....	76
Figure 46: Evolution du pH en fonction de temps avec COM 4.....	77
Figure 47: Evolution du rapport AGV/TAC en fonction de temps avec COM 1.....	77
Figure 48: Evolution du rapport AGV/TAC en fonction de temps avec COM 1,5.....	78
Figure 49: Evolution du rapport AGV/TAC en fonction de temps avec COM 2.....	78
Figure 50 : Evolution du rapport AGV/TAC en fonction de temps avec COM 3.....	79
Figure 51: Evolution du rapport AGV/TAC en fonction de temps avec COM 4.....	79
Figure 52: Production des volumes de biogaz en fonction de temps avec COM 1.....	80
Figure 53: Production des volumes de biogaz en fonction de temps avec COM 1,5.....	81
Figure 54: Production des volumes de biogaz en fonction de temps avec COM 2.....	81
Figure 55: Production des volumes de biogaz en fonction de temps avec COM 3.....	82
Figure 56: Production des volumes de biogaz en fonction de temps avec COM 4.....	82
Figure 57: Production des volumes de méthane en fonction de temps avec COM 1.....	83
Figure58 Production des volumes de méthane en fonction de temps avec COM 1,5.....	84
Figure 59: Production des volumes de méthane en fonction de temps avec COM 2.....	84
Figure 60: Production des volumes de méthane en fonction de temps avec COM 3.....	85
Figure 61: Production des volumes de méthane en fonction de temps avec COM 4.....	85
Figure 62: Volumes de biogaz et de méthane produit cumuler après chaque expérience.....	86
Figure 63: Evolution de pH en fonction du temps.....	89
Figure 64: Evolution de la DCO en fonction du temps.....	90
Figure 65:Variation de volume de biogaz.....	91
Figure 66:Variation de volume de méthane.....	91
Figure 67: Variation de pH et TAC pendant la digestion.....	92
Figure 68: Evolution des germes totaux avant et après la digestion.....	92
Figure 69: Evolution des coliformes fécaux avant et après la digestion.....	93
Figure 70:Evolution des staphylocoques avant et après la digestion.....	94

Figure 71: Evolution des streptocoques avant et après la digestion.....	95
Figure 72: Comparaison entre notre biogaz et le gaz naturel de HassiR'mel.....	98
Figure 73: Enregistrement de la tension du courant électrique avec le gaz de ville et notre biogaz.....	98
Figure 74: Enregistrement de l'Intensité du courant électrique avec le gaz de ville et notre biogaz.....	99
Figure 75: Puissance du courant électrique avec le gaz de ville et notre biogaz.....	100

Liste des tableaux

Tableau 01 : La composition de déchets ménagers produit annuellement par les ménages algériens.....	5
Tableau 02: Des exemples de production des déchets ménagers dans des zones déférant.....	7
Tableau 03:Quelques exemples de production des déchets ménagers dans le monde.....	7
Tableau 04: Comparaison de la digestion en condition thermophile et mésophile.....	28
Tableau 05:Effet de l'oxygène sur les différentes phases de la digestion anaérobie.....	29
Tableau 06: Début de production du biogaz.....	30
Tableau07: Concentrations en ions provenant la stimulation ou l'inhibition de la Méthanisation.....	32
Tableau 08: Différents exemples de TRH suivant le procédé de digestions.....	33
Tableau 09 : Principaux composés autres que CH ₄ présents dans le biogaz et leurs effets.....	39
Tableau 11 : Les composés et leurs techniques d'élimination.....	42
Tableau 12 : Les étapes de construction d'un digesteur enterré d'une capacité de 4m ³	47
Tableau 13 : Les analyses effectués.....	55
Tableau 14: Caractéristiques du substrat et de L'inoculum avant le lancement d'expérience...	73
Tableau 15: Caractéristiques du substrat après chaque temps de séjour.....	83
Tableau 16: Caractéristiques du substrat avant le lancement d'expérience.....	85
Tableau 17: Caractéristiques finale du substrat après chaque 'expérience.....	91
Tableau18: Caractéristiques du substrat avant le lancement d'expérience.....	93
Tableau 19: Identification et pourcentage des différentes composantes de notre biogaz avant et après filtration.....	97
Tableau 20: Volumes de gaz consommé par le générateur pendant l'expérience.....	100

Liste des photos

Photo 01: Digesteur continu à l'échelle du laboratoire.....	46
Photo 02: Echantillon du substrat étudié.....	46
Photo 03: Digesteur enterré a l'URER/MS ADRAR.....	49
Photo 04: Installation finale.....	54
Photo 05: Système de mesure du volume du biogaz et de CH ₄ (BMP).....	57
Photo 06: Test d'inflammabilité du biogaz.....	93
Photo 07: Observation macroscopique des germes totaux sur le milieu PCA.....	97
Photo 08: Observation macroscopique des coliformes fécaux sur le milieu sur milieu VRBL.....	94
Photo 09 : Observation macroscopique des staphylocoques sur le milieu de Baird-Parker.....	95
Photo 10: Résulta pour les streptocoques.....	96

Liste des abréviations

TWh : Téra watt

PCI : Le Pouvoir Calorifique Inférieur

REFIOM : Les résidus d'épuration des fumées des incinérateurs d'ordures ménagères

CO : Monoxyde de carbone

NO_x : D'oxydes d'azote

HCl : Chlorure d'hydrogène

SO₂: Dioxyde de soufre

CSD: Centres de stockage

HAP: Hydrocarbure aromatique polycyclique

OM : Ordures ménagères

LFC: Lits fluidisés circulants

CO₂: Dioxyde de carbone

pH: Potentiel hydrogène

C/N: Rapport carbone azote

AGV: Les acides gras volatiles

TRH : Temps de rétention hydraulique

H₂S: Hydrogène sulfuré

N₂: Azote

H₂O: Eau

CH₄: Méthane

MS: Matière sèche

ANOVA: Analyse de variance

MO: Matière organique

BMP: Test de potentiel méthanogène

CPG: Chromatographie en phase gazeuse

TAC : Titre alcalimétrique complet

DCO_s : Demande chimique en oxygène soluble

DCO_t : Demande chimique en oxygène totale

DBO: Demande Biologique en Oxygène

UFC: Unité formant des colonies

COM : Charges organiques moyennes

OMS: Organisation mondiale de la santé

Liste des unités

°C : Degré Celsius

%: Par cent

ton/an: tonne par année

kg/hab./j: Kilogrammes d'habitant par jour

kWe : Kilowatts

kWh : Kilowatts par heure

GWh : Gigawatts par heure

m.s⁻¹ : Mètre sur seconde

g/l : Gramme par litre

mg/l: Milligramme par litre

j: Jours

m³: Mètre cube

m³/jour : Mètre cube par Jours

vol. : Volume

Mtep/an: milliaire de tonne par année

Kcal : kilocalories

€ : Euro

cm : Centimètre

L : litre

g ms/L : Gramme de matière sèche par litre

g ms/L/J : Gramme de matière sèche par litre par jour

ml : Millilitre

M/l : Moule par litre

g/l : Gramme par litre

mg/L: Milligramme par litre

mgO₂/l : Milligramme l'oxygène par litre

meq/L : Milliéquivalents par litre

INTRODUCTION GENERALE

Les déchets municipaux causés des dommages pour l'environnement et l'homme ensemble, avec une production mondiale de 2,01 milliards de tonnes des déchets municipaux par an selon les estimations de la banque mondiale en 2018 [1]. Cette situation catastrophique, accompagné avec des besoins croissants en énergie plus de 121 000 TWh par an en 2050 [2], cette production d'énergie reposé sur les énergies fossiles elle se répartissait en 32,5 % de pétrole, 27,9 % de charbon, 23,4 % de gaz naturel, 4,4 % de nucléaire et 11,0 % d'énergies renouvelables (hydroélectricité 6,8 %, éolien 1,9 %, biomasse et géothermie 1,0 %, solaire 0,7 %, agro carburants 0,6 %)[3].

Et afin de trouver une solution à ces deux problèmes mondiaux (déchets municipaux et énergie), il met en évidence l'importance du phénomène de la digestion anaérobie comme une solution à ces deux problèmes à la fois. Ce phénomène est utilisé comme matière première la majeure partie des déchets ménagers quelle est la matière organique (Plus de 60 pour cent des déchets ménagers est une substance organique) ce qui contribue à réduire la malfaisance de ces déchets premièrement, ainsi que l'un des produits final de ce phénomène il est biogaz qui contient une proportion importante de méthane(CH₄) qui peut être utilisé comme énergie renouvelable deuxièmement.

Le biogaz est une source d'énergie renouvelable qui peut être utilisé pour la génération de la chaleur et de l'électricité ou raffiné pour être utilisé comme biocarburant.

En Algérie, les premières réalisations de biodigestion étaient réalisé vers la fin des années trente, sous l'impulsion de deux professeurs de l'École nationale de l'agriculture d'Alger (El Harrach), ISMAN et DUCCELLIER, qui a déposé un brevet en 1938 aux Etats-Unis d'un système de production d'une circulation pulsante dans un appareil contenant des produits dégageant du gaz [4]. Ce travail a été considéré comme le début maîtrise de la production de biogaz non seulement en Algérie mais aussi dans le monde entier. En outre, ils ont construit le premier digesteur Sur la base de leur brevet, de nombreuses installations agricoles étaient équipées de digesteurs de fumier à gaz et divers équipements de valorisation du biogaz s'étaient développés.

En 1949, un moteur de 08 réservoirs de 40 m³ a été mis au point. Approvisionné en 260 tonnes de fumier (05 bovins, 12 chevaux et 25 porcs) et une production

de près de 30 000 m³ de biométhane par an jusqu'aux années soixante [5]. Le biogaz a été mis au point dans les cuisines des internats (200 élèves), pour les besoins du laboratoire et de 02 tracteurs.

Après la découverte de carburants moins coûteux à la fin de les années quarante, les activités dans le domaine de la bio méthanisation diminué très rapidement. Un peu d'intérêt a été donné à cette technologie malgré les ressources importantes et les applications réussies de l'Institut national d'agronomie (El Harrach) et du Centre de Développement des Energies Renouvelables(CDER), grâce à la création de deux usines expérimentales à Bechar et à Ben Aknoun, en 1986 et en 2001, pour l'étude de la production de biogaz à partir de bouse de vache. Depuis, très peu de digesteurs ont été développés.

Cependant, il faut noter les efforts du gouvernement algérien gouvernement ces dernières années à développer cette technologie en modernisant la décharge de Ouled Fayet, qui a été mise en service en 2011 [6]. L'objectif principal du projet est de capter le gaz de la décharge, qui contient 50% de méthane (CH₄); la quantité attendue de réduction des émissions est de 83 000 T équivalent CO₂ / an.

Outre la biomasse, les projets énergétiques sont au cœur des phase d'étude de faisabilité telle que le projet biomasse de SONELGAZ sur le site de Oued Smar, d'une capacité installée de 02 MW pouvant atteindre un pic de 06 MW de la décharge de ce site, et la centrale de valorisation énergétique du biogaz généré en décharge de Batna.

La station d'épuration des eaux usées de Baraki, dotée de procédés sophistiqués, est mise à l'essai depuis janvier 2007 avec des capacités de traitement de 250 000 m³ par an. Actuellement en Algérie, c'est l'une des rares stations à faire fonctionner ses chaudières par son propre biogaz [7].

Le Sahara algérien est caractérisée par des groupes de population appelé LEKSOR, qui sont caractérisés par :

- Son grand nombre (Plus de 300 uniquement dans la région d'Adrar)
- Très longue distance entre eux
- Faible densité de population
- Dépendance totale de la population à l'agriculture.

Ces caractéristiques rendent la connexion de la population au réseau électrique difficile et coûteux, et parfois impossible avec un terrain désertique difficile.

Et Comme objectif de ce travail nous sommes intéressés de produire de l'électricité par la valorisation énergétique des déchets organique (moyens locaux) dans le milieu saharien et en

particulier dans la région d'Adrar sud-ouest de l'Algérie. Ceci est fait en utilisant le phénomène de la digestion anaérobie, pour résoudre le problème d'énergie dans ces zones isolées, ainsi qu'une solution au problème environnemental causé par les déchets organiques.

Pour cela, nous avons divisé ce travail en quatre chapitres. Les deux premiers chapitres sont consacrés à la partie théorique reliée à notre travail, en premier chapitre nous avons abordé la bibliographie liée aux déchets solides en général et leur cycle de vie en particulier, et les différentes méthodes de traitement et de valorisation des déchets organiques, le deuxième chapitre a été étudiée la digestion anaérobie, par leur différentes étapes, et leur paramètres physico-chimiques, et les différents types de bioréacteurs et aussi les différentes méthodes de valorisation du biogaz. Les deux derniers chapitres sont consacrés au côté pratique, où il est dans l'avant dernier chapitre nous avons exprimé tout le matériels exploités et les différentes méthodes utilisées dans ce travail, en revanche, le dernier chapitre est consacré à la présentation des résultats obtenus et à leur discussion, et à la fin une conclusion des principaux résultats.

Introduction :

La gestion des déchets, ou revalorisation est un ensemble de procédés par lesquels on transforme un déchet matériel ou organique dans l'objectif d'un usage spécifique comme le recyclage, le compostage ou encore la transformation en énergie : dans ce deuxième cas, on parle de valorisation énergétique. La valorisation des déchets est généralement considérée comme une solution préférable à l'élimination des déchets.

Dans ce chapitre nous avons abordé la bibliographie liée aux déchets solides en général et leur cycle de vie en particulier, et les différentes méthodes de traitement et de valorisation des déchets organiques.

I. Valorisation des déchets solides:**I.1. Définition des déchets:**

Les déchets sont définis comme : tous résidus d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon ou a l'obligation de s'en défaire dans le but de ne pas nuire à la collectivité et de protéger l'environnement [8].

I.2. les principaux types de déchets :

Ils sont classés en deux grandes catégories :

I.2.1. D'après leur origine:**I.2.1.1. Les déchets ménagers et assimilés:**

Ils sont les déchets produits par l'activité des ménages, les commerçants, les artisans, ce type de déchets ne présente pas des caractères dangereux ou polluants ce sont :

- Les ordures ménagères ;
- Les déchets encombrants ;
- Les ordures des rues et des marches ;
- Les déchets verts ;
- Les boues de décantation et de station d'épuration [9].

I.2.1.2. Les déchets industriels:

Ils proviennent de l'industrie, du commerce, de l'artisanat et des transports. Ils regroupent:

I.2.1.2.1. Les déchets industriels banals: Ils sont constitués des :

- Emballages des ménages ;
- Emballages des entreprises ;
- Papiers et cartons ;

- Verres ;
- Bois ;
- Plastique ;
- Inertes (gravis, sable...) ;
- Métaux ferreux et non ferreux [10].

I.2.1.2.2. Les déchets industriels dangereux:

Ils sont constitués des déchets organiques, des déchets minéraux liquides ou solides.

Ce type des déchets peut présenter des risques pour la santé et génèrent souvent des nuisances pour l'environnement, pour ces raisons, ils doivent être collectés, transportés, traités, éliminés ou stockés selon des règles strictes.

On distingue les:

- Solvants ;
- Hydrocarbures ;
- Goudrons ;
- Acides ;
- Peintures ;
- Boues de stations de traitement des rejets industriels ;
- Déchets phytosanitaires ;
- Déchets toxiques en quantité dispersées [11].

I.2.2. D'après leur nature:

I.2.2.1. Déchets dangereux:

Il s'agit de déchets qui, par leur nature, sont hautement polluants et susceptible de présenter un danger pour l'homme et/ou l'environnement. Ils nécessitent un traitement particulier et sécurisé, et répondent à la réglementation en vigueur, en raison de leur toxicité [12].

I.2.2.2. Déchets inertes:

Un déchet inerte est un déchet qui ne subit aucune modification physique, chimique ou biologique important. Les déchets inertes ne se décomposent pas, ne brûlent pas, ne produisent aucune réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas d'autres matières avec lesquelles elles entrent en contact d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humain [13].

I.2.2.3. Déchets ultimes:

Ils sont les déchets résultant ou non du traitement d'un déchet, qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par

extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux. Ce sont des déchets qui ne subissent aucune transformation physique, chimique ou biologique importante [14].

I.3. Déchets ménagers :

I.3.1. Définition :

Les déchets ménagers ou les déchets municipaux sont les ordures ménagères issues de l'activité domestiques de ménages, et qui sont collectés par les communes [15].

I.3.2. La composition des déchets ménagers :

La composition des déchets ménagers est assez diverse et varie en fonction de nombreux facteurs, on cite :

- Le type habitat (résidentiel ou urbain) ;
- Les saisons, les fêtes et les week-ends ;
- La géographie : à l'échelle d'une région et d'un pays ;
- La réglementation locale ;
- Les méthodes de gestion des déchets [16].

La composition des déchets est déterminée par le tri par classe. Les déchets ménagers sont séparés par le tri manuel en un certain nombre de classes correspondant à une classification en sept classes :

- a- Matières fermentescible (résidus de jardin, herbes, feuilles, restes alimentaires, épluchures de légumes et de fruits etc...) ;
- b- Matières plastiques (emballages plastiques, pots de yaourt etc...) ;
- c- Papiers-cartons (journaux, serviettes, enveloppes etc...) ;
- d- Textiles (vêtements, draps, serviettes, couvertures etc...) ;
- e- Métaux (boîtes de conserves, casseroles, lames etc...) ;
- f- Verre (emballages en verre, lampes, etc...) ;
- g- Déchets divers [déchets spéciaux (seringues usagées, piles, thermomètres, médicaments périmés), bois, chaussures, poils, lièges, cuir etc...] [17].

Tableau 01 : La composition de déchets ménagers produit annuellement par les ménages algériens [18].

Composent	Quantité (tonne/an)
Papier	385000
Plastique	130000
Métaux	100000
Verre	50000
Matières diverses	95000

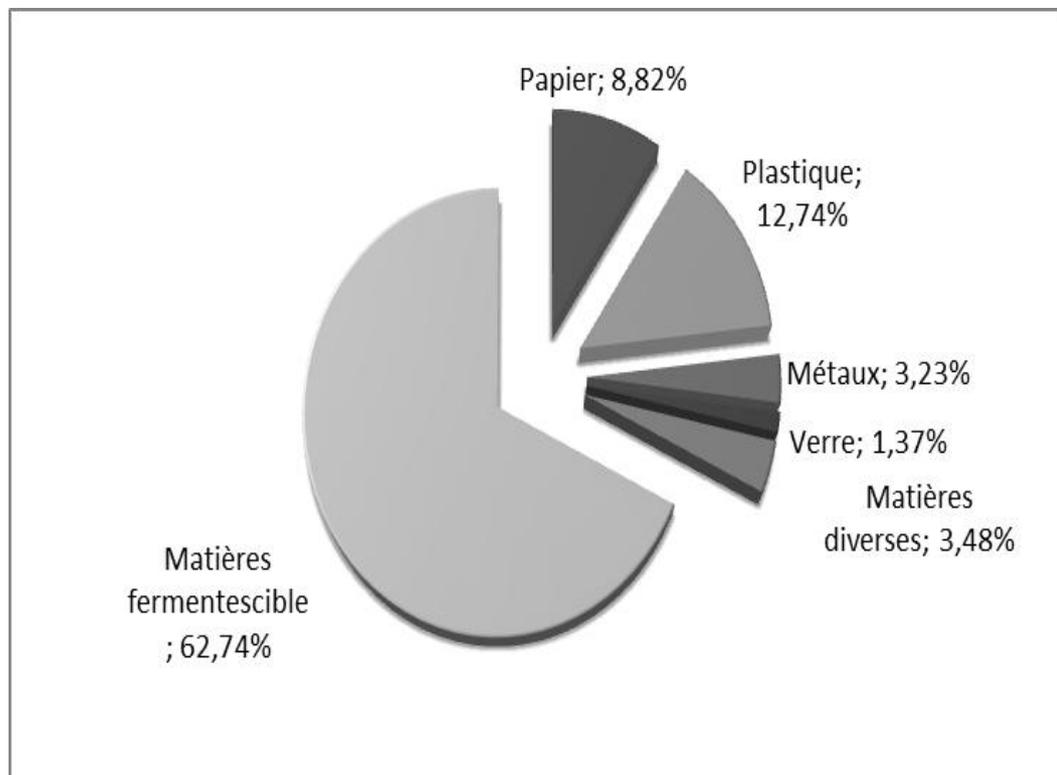


Figure 01 : Composition moyenne des déchets ménages Algériens année 2016 [19].

I.3.3. Production des déchets ménagers :

L'évolution de la production des déchets ménagers est essentiellement liée à deux facteurs :

- L'évolution démographique.
- L'évolution quantitative par habitant.

Les quantités des déchets ménagers générées dans une ville dépendent de :

- 1) L'habitat (milieu rural ou urbain, avec un taux généralement plus faible en milieu rural)
- 2) Le niveau de vie, les habitudes et les mœurs de la population (la production tend à s'accroître avec le niveau de vie ; ex. zones résidentielles par rapport aux autres zones.).
- 3) Les conditions climatiques, ainsi que les variations annuelles et saisonnières.
- 4) Les mouvements plus ou moins importants de la population au cours de l'année : foires, pèlerinage, vacances annuelle, etc.
- 5) Des modes de conditionnement des denrées et des marchandises [20].

Tableau 02: Exemples de production des déchets ménagers dans des zones déférant [21].

Zones de production	Production(kg/hab./j)
Pays hautement industrialisés	1,1-1,2
Pays moins avancés	0,35
Zone urbaine	0,8-1
Zone rurale	0,6-0,8
Logement ou hôtel	0,6-0,8
Campings	0,3-0,5
Passage	0,1-0,2

La production mondiale de déchet ménager est de 2,4 milliards de tonnes par années, qui donné un moyenne mondiale de 1,095 Kg/habitant/jour [21].

Tableau 03: Quelques exemples de production des déchets ménagers dans le monde [22].

Pays	Production(kg/hab./j)
États unis d'Amérique	2
Royaume-Uni	1,6
Allemagne	1,7
France	1
Espagne	1,6
Italie	1.4
Belgique	1,2
Pays-Bas	1,6
Chine	0,5
Inde	0,46
Maroc	0,6
Algérie	0,6

Et l'Algérie avec une population de 35 millions d'habitant génère chaque année 8,5 millions de tonne des déchets ménagers, avec une moyenne nationale de 0,6 Kg/habitant/jour [23].

En pratique et en particulier dans les pays en voie de développement, on devra toujours faire la distinction entre les quantités des déchets ménagers générées et les quantités de ces ordures collectées.

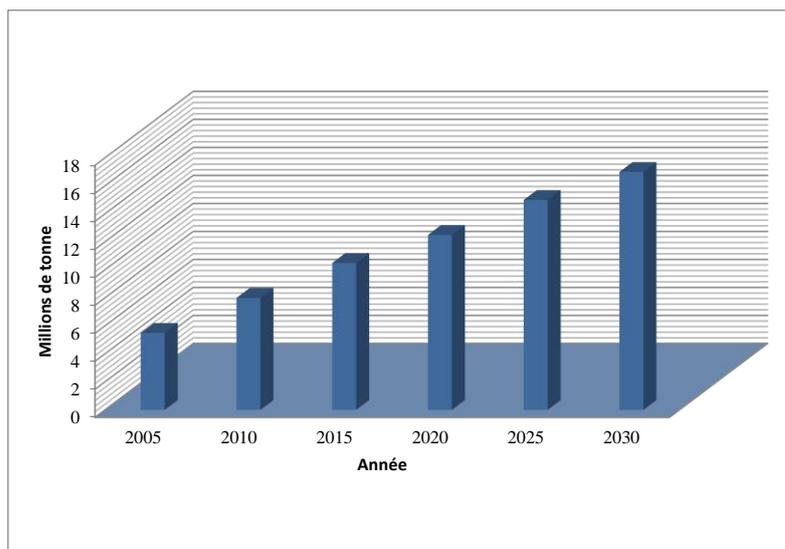


Figure 02 : Projection de la production de déchets ménagers en Algérie [24].

I.3.4. Modes d'élimination et de traitement des déchets ménagers :

L'accumulation de déchets provoque des inquiétudes pour la santé et l'environnement, actuellement, on peut distinguer quatre filières principales du traitement des ordures ménagères et assimilés, qui répondent à des problématiques et des évolutions différentes :

- La mise en décharge (le stockage) ;
- Le recyclage ;
- Le traitement thermique (l'incinération, pyrolyse et gazéification)
- Le traitement biologique [aérobie et anaérobie (la méthanisation)] [25].

I.3.4.1. La mise en décharge :

Les décharges produisent spontanément du biogaz car les déchets fermentescibles y sont régulièrement déposés. L'émission peut durer plusieurs dizaines d'années, d'abord à un rythme croissant, puis décroissant. Le processus peut être accéléré en humidifiant la matière, auquel cas le potentiel de production peut être récupéré entre 5 ou 10 ans. Sans installation particulière autre que le captage des gaz dans les alvéoles, on peut ainsi récupérer 60 m^3 de méthane par tonne enfouie [26].

I.3.4.2. Le recyclage :

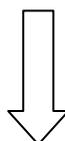
Le recyclage est la réintroduction directe d'un déchet dans le cycle de production dont il est issu, en remplacement totale ou partiel d'une matière première neuve. Par exemple, prendre une bouteille cassée, les refondre, et en faire des bouteilles neuves [27].

Recyclage

Idée de sélection et de réparation

Pour une nouvelle production de

Qualité voisine



- rechapage des pneus
- régénération des huiles
- papier, verre,
- métaux...

Figure 03: Recyclage des déchets organique [28].

I.3.4.3. Traitement thermique (L'incinération) :**a) Définition:**

L'incinération est un mode de traitement et d'élimination des ordures ménagères (OM) très répandu qui permet la réduction d'environ 90 % du volume et 75 % de la masse des déchets et la destruction complète des bactéries [29].

Elle conduit à la formation de scories, appelés mâchefers d'incinération des OM (MIOM) qui ont l'avantage de pouvoir être valorisées, sous certaines conditions, en travaux publics (remblai et autres). Elle consiste à brûler les ordures dans un four spécialement adapté à une température d'environ 850 °C en libérant de la chaleur et de la vapeur, des effluents gazeux (fumées), des mâchefers (30 %) et des cendres volantes (3 - 4 %).[29]

b) Technique

Une unité d'incinération des déchets organiques, comporte d'abord une fosse de réception des ordures ménagères et un grappin qui porte ces matières dans une trémie qui alimente les fours. La technique la plus employée est celle du four à grille ; les ordures sont déposées sur la partie haute d'une "grille" légèrement inclinée, faite de barreaux jointifs dont les mouvements des uns par rapport aux autres assurent à la fois un retournement et un brassage des matières et une lente translation de celles-ci vers la partie basse de la grille .

De l'air passe à travers les barreaux, assurant la combustion des ordures ménagères. La partie non brûlée est éteinte à l'eau ; c'est le mâchefer d'où l'on extrait les parties métalliques par magnétisme et par courant de Foucault. Les fumées, dont la température est de 900 °C au moins et peut atteindre 1500 °C dans les grosses installations, doivent être refroidies à 200 °C pour pouvoir être traitées. [29]

Cette partie de combustion est complétée par une installation de traitement des fumées pour les débarrasser de leurs cendres volantes (avec un électro-filtre) et des substances polluantes conformément à des normes qui deviennent très sévères, ce traitement donnant lui-même naissance à une autre forme de déchets, les résidus d'épuration de fumées d'incinération d'ordures ménagères (REFIOM) . [29]

Les eaux de traitement de fumée, sauf en cas de "traitement sec", à la poudre de bicarbonate de soude, doivent également être traitées. Le mâchefer est un produit évolutif (comme un ciment) ; il demande souvent un traitement pour être stabilisé et pour que les impuretés toxiques qu'il contient soient bien fixées. Quand il passe avec succès les tests de lixiviation, il est déclaré bon pour être utilisé dans les travaux routiers. Sur une tonne d'ordures ménagères moyennes, 650 kg se retrouvent à l'état gazeux et 240 à 300 kg à l'état solide sous la forme de mâchefer, 20 à 40 kg de ferrailles, 20kg de cendres et 2 à 20 kg de REFIOM selon la technique d'épuration employée. [29]



Figure 04 : Schéma d'une installation d'incinération des déchets. [29]

1/ Les camions vident dans la fosse les ordures ménagères, 2/ Le grappin achemine les déchets vers le four, 3/ Le four est alimenté en continu à plus de 1000°C, 4/ L'échange de chaleur entre l'air chaud du four et l'eau circulant dans les tuyaux va produire de la vapeur qui est revendue à des industriels voisins de l'usine, 5/ Les métaux sont extraits des mâchefers pour être recyclés. Les mâchefers sont valorisés en sous couche routière, 6/ Les fumées sont traitées par injection de chaux et de charbon actif, 7/ Les fumées sont dépoussiérées après passage dans les filtres, 8/ Les Résidus d'Épuration des Fumées d'Incinération des Ordures Ménagères (REFIOM) sont envoyés en centre d'enfouissement, 9/ La cheminée est équipée d'analyseurs pour mesurer la qualité de rejets atmosphériques en continu.

c) Valorisation de l'énergie de l'incinération

La combustion des déchets fournit de la vapeur à 20, 30 jusqu'à 40 bars. Celle-ci pourra actionner une turbine "à condensation" pour la production du maximum d'électricité possible ou bien, par un échangeur, donner sa chaleur à un réseau de chaleur ou à une industrie. Elle pourra également être employée en "cogénération", c'est à dire produire de l'électricité dans une turbine à contre-pression qui la laisse à une pression de 3 à 10 bars et à une température suffisante pour alimenter un réseau de chaleur [29].

A partir de la vapeur, le rendement énergétique de la production de chaleur seule est alors de 95%, celui de la production d'électricité de 25 à 30 %, en fonction de la taille de l'unité, et celui de la cogénération de 80 %. Une tonne d'ordures ménagères de PCI 2000 calories fournit ainsi 1700 kWh de chaleur utilisable, ou 400 à 500 kWh électriques, ou encore, en cogénération, 100 à 200 kWh électriques et 1000 à 1500 kWh thermiques. Les unités de grande taille les plus récentes ou celles qui traitent des ordures ménagères au fort pouvoir calorifique peuvent atteindre le ratio de 600 ou même 700 kWh électrique par tonne d'ordures ménagères. [29]

I.3.3.4. Le traitement biologique :

Le traitement biologique utilise des micro-organismes vivants pour décomposer des déchets organiques, CO₂, et simples substances inorganiques ou en substances organiques plus simples telles que des aldéhydes et des acides.

Il existe plusieurs traitements biologiques utilisés pour le traitement des déchets comme : traitements aérobies, traitements anaérobies,...

I.3.3.4.1. le compostage:

a) Définition : Est un processus biologique dans lequel les déchets fermentescibles (matières organique) sont transformés par les micro-organismes du sol en un terre noire riche en matières nutritives appelé compost (engrais naturel).

Ainsi le compostage est basé sur la fermentation naturelle des déchets en milieu aérobie(ou les micro- organismes ne peuvent vivre qu'en présence d'oxygène). [46]

b) Mécanisme réactionnel: La dégradation de la matière organique lors du compostage se traduit d'abord par une hydrolyse, puis par une dégradation biochimique des composés lysés. Ces réactions entraînent la formation de CO₂, de chaleur et d'eau. L'étape d'hydrolyse dépend essentiellement des caractéristiques physico-chimiques de l'andain (porosité, humidité, granulométrie). [46]

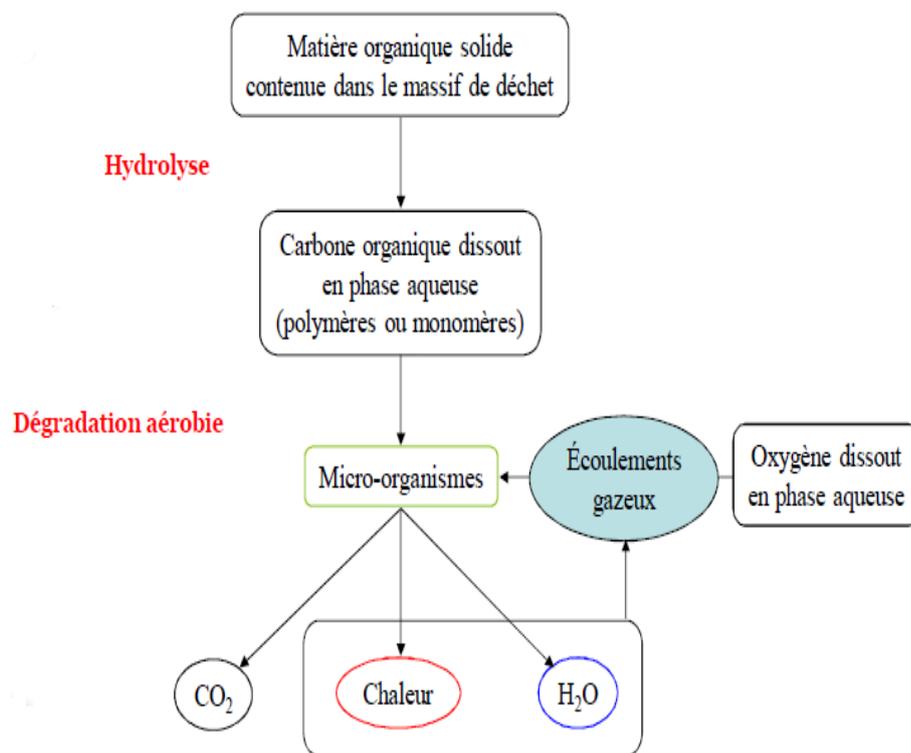


Figure 05: Schéma simplifié du mécanisme réactionnel mis en jeu lors du compostage.

[46]

c) Avantages du compostage:

- Diminution du volume (30 à 60 %) et du poids (40 à 60 %), donc diminution des consommations de carburant et du temps de travail pour l'épandage.
- Assainissement du produit : l'échauffement des tas élimine un grand nombre de graines adventices et de germes pathogènes.
- Concentration en éléments fertilisants : le compost, devenu plus sec et plus concentré, peut être épandu à plus faible dose par ha.
- Amélioration de la structure du sol : effet mulch (protection du sol, lutte contre l'érosion...), stimulation de la vie microbienne, amélioration de la prospection racinaire et de la capacité de rétention en eau.
- Stockage et bonne diffusion dans le temps de l'azote.
- Amélioration de la flore et meilleure appétence pour les épandages sur prairie.
- Autorisation de diminution des distances d'épandage par rapport aux habitations : 10m au lieu de 100m.
- Grâce à la diminution des odeurs et à son plus bel aspect visuel, le compost peut être épandu relativement près des zones habitées sans conflits de voisinage. [47]

d) Types de compostage**d-1) Compostage anaérobie :**

La décomposition se produit quand l'oxygène (O) est absent ou présent en quantité limitée.

Dans ce processus, les microorganismes anaérobies dominent et élaborent des composés intermédiaires comme du méthane, des acides organiques, du sulfure d'hydrogène et d'autres substances.

En l'absence d'oxygène, ces composés s'accumulent et ne sont pas métabolisés. Un grand nombre de ces composés ont des odeurs fortes et certains d'entre eux présentent une phytotoxicité. Comme le compostage anaérobie est un processus s'effectuant à basse température, les graines d'adventices et les pathogènes ne sont pas affectés. De plus, le processus nécessite souvent plus de temps que le compostage aérobie. Ces inconvénients contrebalancent les avantages de ce processus, à savoir le peu de travail nécessaire et la perte limitée d'éléments nutritifs au cours du processus [48].

d-2) Compostage aérobie :

Le processus de compostage aérobie débute par la formation du tas. Dans de nombreux cas, la température atteint rapidement 70 à 80°C au cours des deux premiers jours. Tout d'abord, des organismes mésophiles (dont la température de croissance optimale est comprise entre 20 et 45°C) se multiplient rapidement grâce aux sucres et acides aminés facilement disponibles. Ils produisent de la chaleur par leur propre métabolisme et élèvent la température à un point tel que leurs propres activités sont inhibées. Alors, quelques champignons ainsi que de nombreuses bactéries thermophiles (dont la température de croissance optimale est comprise entre 50 et 70°C) poursuivent le processus, en augmentant la température du compost à 65°C, voire même plus. Cette hausse de température est cruciale pour la qualité du compost car la chaleur tue les pathogènes et les graines d'adventices [49].

La phase active de compostage est suivie par une période de maturation, pendant laquelle la température du tas diminue graduellement. Le début de cette phase est identifiable lorsque le retournement ne provoque plus d'augmentation de la température du mélange. A ce stade, un autre groupe de champignons thermophiles apparaît, responsables d'une étape importante de décomposition des matériaux

composant les membranes cellulaires végétales comme la cellulose et l'hémicellulose. La maturation du compost permet d'éviter les risques entraînés par l'utilisation d'un compost immature: faim d'azote (N) et déficience en oxygène, et effets toxiques des acides organiques sur les plantes.

Finalement, la température diminue jusqu'à la température ambiante. Quand le compost est prêt, le tas devient plus homogène et moins biologiquement actif bien que des organismes mésophiles recolonisent le compost. Le matériau devient brun foncé à noir. Les particules sont plus petites et homogènes, et la texture ressemble à celle d'un sol. Au cours du processus, la quantité d'humus augmente, le rapport entre le carbone et l'azote (C/N) diminue, le pH devient neutre, et la capacité d'échange du matériau augmente [50].

e) Facteurs influençant le compostage aérobie:

e-1)Aération

Le compostage aérobie nécessite d'importantes quantités d'oxygène, tout particulièrement lors du stade initial. L'aération est la source d'oxygène, et se trouve être ainsi un facteur indispensable pour le compostage aérobie. Quand l'approvisionnement en oxygène n'est pas suffisant, la croissance des micro-organismes aérobies se trouve limitée, ce qui ralentit la décomposition. De plus, l'aération permet de diminuer l'excès de chaleur et d'éliminer la vapeur d'eau et les autres gaz piégés dans le tas. L'évacuation de la chaleur est particulièrement importante dans les climats chauds, compte tenu des risques plus élevés de surchauffe et d'incendie. Par conséquent, une bonne aération est indispensable pour un compostage efficace. Celle-ci pourra être atteinte si la qualité physique des matériaux (taille des particules et teneur en eau), la taille du tas et la ventilation sont contrôlées et si le mélange est fréquemment retourné [51].

e-2)Humidité

L'humidité est nécessaire pour assurer l'activité métabolique des micro-organismes. Le compost devrait avoir une teneur en eau de 40 à 65 pour cent. Si le tas est trop sec, le processus de compostage est plus lent, alors qu'au-dessus de 65 pour cent d'humidité, des conditions anaérobies se rencontrent. En pratique, il est conseillé de commencer le tas avec une teneur en eau de 50 à 60 pour cent, pour atteindre à la fin du processus, une humidité de 30 pour cent [51].

e-3)Éléments nutritifs

Les micro-organismes ont besoin de C, N, phosphore (P) et potassium (K) comme éléments nutritifs principaux. Le rapport C/N est un facteur particulièrement important. Le rapport optimal C/N se situe entre 25 et 30 bien que des rapports situés entre 20 et 40 soient aussi acceptables. Quand le C/N est supérieur à 40, la croissance des micro-organismes est limitée, et implique une durée de compostage plus longue. Un rapport C/N inférieur à 20 entraîne une sous-utilisation de l'azote et le surplus d'azote pourra alors être perdu dans l'atmosphère sous forme d'ammoniac ou d'oxyde nitreux, et l'odeur pourra devenir un problème. Le rapport final C/N devrait se situer entre 10/1 et 15/1 [51].

e-4)Température

Le processus de compostage met en œuvre deux gammes de température: mésophile et thermophile. Alors que la température idéale pour la phase initiale de compostage est de 20 à 45qC, par la suite, les organismes thermophiles ayant pris le contrôle des étapes ultérieures, une température située entre 50 et 70qC est idéale. Les températures élevées caractérisent les processus de compostage aérobie et sont les indicateurs d'une activité microbienne importante. Les pathogènes sont en général détruits à 55qC et plus, alors que le point critique d'élimination des graines d'adventices est de 62qC. Le retournement et l'aération peuvent être utilisés pour réguler la température [52].

e-5)Teneur en lignin :

La lignine est un des principaux constituants des parois cellulaires des plantes, et sa structure chimique complexe la rend hautement résistante à la dégradation microbienne.

La nature de la lignine a deux implications. Premièrement, la lignine réduit la biodisponibilité des autres constituants des parois cellulaires, ce qui se traduit par un rapport réel C/N (rapport entre C biodégradable et N) plus faible que celui généralement mentionné. Deuxièmement, la lignine sert d'amplificateur de porosité, ce qui crée des conditions favorables pour le compostage aérobie. Par conséquent, alors que l'apport de champignons décomposeurs de lignine peut dans certains cas augmenter le carbone disponible, accélérer le compostage et réduire les pertes azotées, dans d'autres cas, cela risque d'entraîner un rapport réel C/N plus élevé et une porosité médiocre, deux facteurs responsables d'un allongement de la durée de compostage [52].

e-6) Polyphénols :

Les polyphénols comprennent les tannins hydrolysables et condensés. Les tannins insolubles condensés lient les parois cellulaires et les protéines et les rendent physiquement et chimiquement moins accessibles aux décomposeurs. Les tannins solubles condensés et hydrolysables réagissent avec les protéines et réduisent leur dégradation microbienne et donc les rejets azotés. Les polyphénols et la lignine attirent plus l'attention en tant que facteurs inhibiteurs. Ont suggéré que les teneurs de ces deux substances soient utilisées pour classer les matières organiques afin d'obtenir une meilleure utilisation des ressources naturelles au sein de l'exploitation agricole, y compris le compostage [52].

e-7) Valeur du pH :

Bien que l'effet tampon naturel du compostage permette l'utilisation de substances dans une large gamme de pH, celui-ci ne devrait pas être supérieur à 8. A des pH plus élevés, une plus grande quantité d'ammoniac est générée et risque d'être perdue dans l'atmosphère [52].

I.3.3.4.2. La fermentation alcoolique :

a) Définition : La fermentation alcoolique est l'un des procédés de vinification, qui permet de transformer les sucres fermentescibles en anaérobiose par des levures de type (*Saccharomyces cerevisiae*) en alcool et gaz carbonique avec dégagement de calories selon la réaction suivante :



La fermentation dure de 40 à 72 heures et la température est fixée entre 28°C et 32°C, elle se fait principalement par trois grands types : en batch, en Fed-batch (ou semi-continu) ou en continu. Les procédés batch et continu sont les plus utilisés à l'échelle industrielle [53].

Au cours de la fermentation alcoolique, le glucose est transformé en acide pyruvate qui est métabolisé en dioxyde de carbone et acétaldéhyde, et ensuite en éthanol. D'autres monosaccharides, outre que le glucose, peuvent aussi être utilisés. Certains monosaccharides peuvent directement entrer dans la chaîne de réaction de la fermentation (c'est le cas du fructose). D'autres peuvent être transformés en glucose par des enzymes de la cellule. Dans le cas de disaccharides ceux-ci doivent d'abord être digérés en monosaccharides [53].

Cette digestion peut se faire à l'extérieur de la cellule ou à l'intérieur de celle-ci dans les deux cas, la digestion se fait sous l'action d'enzymes spécifiques synthétisées par la levure. Pour assurer un métabolisme optimal à la levure, le mout de fermentation ne doit pas dépasser une concentration en sucres supérieure à 30 g/L. Par ailleurs, le milieu doit être supplémenté par des sels minéraux (sel ammoniacaux) et autres facteurs de croissance. La concentration initiale en sucres fermentescibles doit être très importante car elle conditionne le taux d'alcool à la fin de la fermentation [54].

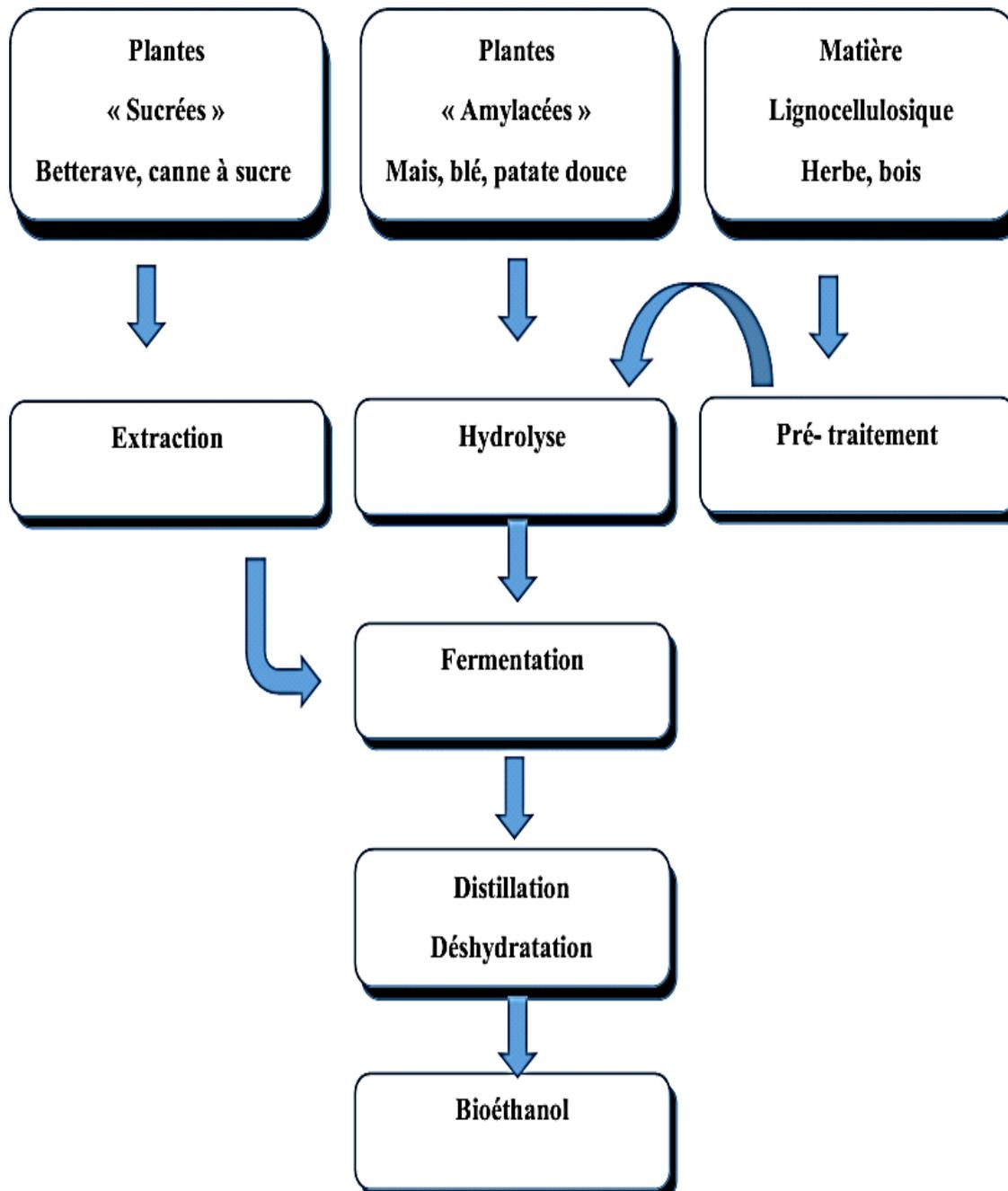


Figure 06 : Schéma de fabrication du bioéthanol à partir des déchets organique [54].

b) Les microorganismes utilisés :

Une grande variété de microorganismes produit de l'éthanol à partir de polysaccharides.

Cependant peu sont réellement compétitifs en termes de :

- Rendement en éthanol par rapport au substrat consommé ;
- Capacité fermentaire ;
- Tolérance à l'éthanol élevée ;
- Adaptation aux conditions de fermentation.

Les efforts de recherche portent sur l'amélioration de l'étape de fermentation, notamment par la recherche d'organismes ou de souches plus résistantes aux différents stress rencontrés lors de la fermentation alcoolique (température, faible concentration en glucose, haute concentration en éthanol...etc.) [55].

c) Les principaux produits de la fermentation alcoolique :

Les principaux produits de la fermentation alcoolique sont évidemment l'éthanol et le dioxyde de carbone. Le reste du glucose est utilisé lors de la croissance pour la production de biomasse et la production de sous alcoolique sont le glycérol, le succinate et l'acétate à 5% du substrat carboné restant. De l'acétaldéhyde, des acides gras (acide hexanoï alcools à plus de deux carbones ...etc.) [56].

d) Propriétés et intérêts de l'éthanol

L'éthanol (alcool éthylique) est un liquide inflammable, limpide, sans couleur et légèrement toxique. L'éthanol est généralement obtenu par une conversion microbiologique des sucres et des amidons fermentescibles. Il est employé couramment comme combustible, dissolvant, désinfectant et matière première dans l'industrie chimique. L'éthanol dont la concentration dépasse 50% peut être employé comme combustible pour la cuisson. Il est facile d'emploi et peut être appliqué directement dans les cuisinières. Il brûle sans fumée et ne crée pas de pollution à l'intérieur [56].

I.3.3.4.3 : La méthanisation: est la transformation de la matière organique en biogaz (principalement méthane et gaz carbonique) par une communauté microbienne qui fonctionne en anaérobiose. Cette transformation très répandue dans la nature, se retrouve dans les marais, dans les intestins d'animaux, d'insectes... et de manière très générale lors du stockage de la matière organique en absence d'oxygène [56].

Introduction:

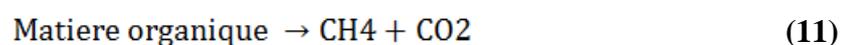
La méthanisation repose sur le principe de la digestion anaérobie en écosystème microbien : le processus de décomposition de la matière organique est régi par les micro-organismes en l'absence d'oxygène. Les déchets fermentescibles sont acheminés dans un dé conditionneur où sont triés les emballages des matières organiques. Ces dernières sont ensuite expédiées dans une unité de production de biogaz. Après décomposition, les déchets organiques servent à produire du fertilisant agricole et du biogaz servant à produire de l'électricité ou de la chaleur.

Ce chapitre a été étudiée la digestion anaérobie, par leur différentes étapes, et leur paramètres physico-chimiques, et les différents types de bioréacteurs et aussi les différentes méthodes de valorisation du biogaz.

II. La digestion anaérobique (la méthanisation)**II.1. Définition de la digestion anaérobique :**

La méthanisation est un processus naturel, Elle est l'une des voies de dégradation des matières organiques, qu'elles soient d'origine animale ou végétale. Le principe de la méthanisation repose sur la dégradation de matières organiques en l'absence d'oxygène (digestion anaérobie) et à l'abri de la lumière par l'action combinée de plusieurs communautés de micro-organismes. C'est une technique qui conduit à la production d'un mélange gazeux appelé biogaz, source d'énergie renouvelable, dont le gaz principale est le méthane(CH₄) et d'un digestat utilisé comme fertilisant [57].

La production de biogaz s'effectue dans l'environnement de façon naturelle (exemple : le gaz de marais-lieu de décomposition de matière végétales et animales ou l'on peut observer la formation des bulles à la surface de l'eau). Les bactéries qui réalisent ces réactions se trouvent à l'état naturel dans le lisier et dans les écosystèmes anaérobies ; elles se développent naturellement dans un milieu sans oxygène. Ainsi, tous les déchets organiques, à l'exception des déchets ligneux (déchets de bois), peuvent être traités par méthanisation, et notamment les déchets et effluents liquides [57].



II.2. Historique de la méthanisation:

La méthanisation a été découverte en 1776 par Volta. Pendant une de ses promenades, il remarqua que du gaz se dégageait d'un marais. Il mit en évidence l'inflammabilité de ce gaz. Lavoisier, en 1787 lui donne le nom de «gaz hydrogenium carbonatrum », le terme méthane est proposé en 1865 et confirmé en 1892 par -un congrès international de nomenclature chimique. Sa formation est attribuée à l'activité microbienne se développant dans des milieux naturels anaérobies [58].

L'utilisation de la digestion anaérobie pour le traitement des eaux usées et la stabilisation des déchets solides ne sont pas nouvelles du tout; elles sont utilisées depuis le 19ème siècle. Dans les régions rurales de la Chine et de l'Inde, des constructions simples de réacteur ont été longtemps employées pour traiter les déchets animaux et agricoles dans le but principal de récupérer l'énergie pour faire cuire et allumer [58].

Le processus de méthanisation est un phénomène naturel mais peut être aussi provoqué. Les ruminants et termites sont connus comme de grands producteurs de biogaz. Les premières recherches descriptives sur la digestion anaérobie ont été effectuées à la fin du XIXème siècle. La première unité de production de biogaz a été réalisée en grand Bretagne en 1895. Il été produit par une unité de méthanisation installée sur le site d'une station d'épuration. Il a été utilisé pour l'éclairage des rues de la vie d'Exeter. Dans les années 1920, l'allemand IMHOFF met au point un système de digestion continu, équipe plusieurs villes allemands quelques années plus tard. Les premiers systèmes de digestion discontinue ont été développés en Algérie à partir de 1939 par ISMAN et DUCELLIER. Ces techniques ont été oubliées jusqu'aux années soixante (chocs pétroliers) ou il fallait les redécouvrir pour trouver d'autre sources d'énergie. [58]

II.3. Mise en œuvre de la méthanisation:

- Elle est réalisée dans des réacteurs biologiques fermés : les digesteurs ;
- Température : mésophile (37 °C), Thermophile (55°C) ;
- Alimentation :
 - continue (la matière entre et sort en continu tous les jours) ;
 - discontinue. Le digesteur est chargé puis vidé quand la fermentation est terminée (des dizaines de jours après) ;
- Digesteurs agité (continue) ou non (discontinue) ;

- Teneur en eau dans le digesteur :
 - moins de 5% de matière sèche : fermentation “liquide” ;
 - 5 à 20 % : fermentation “humide” ;
 - 20 à 40% : fermentation “sèche” [59].

II.4. Etapes de la méthanisation:

Le processus de biodégradation anaérobie de la matière organique se déroule en quatre étapes biochimiques peuvent être représentés par les figure 11 et 12.

Trois différentes familles de microorganismes sont les principales responsables de la transformation depuis des polymères organiques complexes, jusqu'au méthane, l'eau et le dioxyde de carbone.

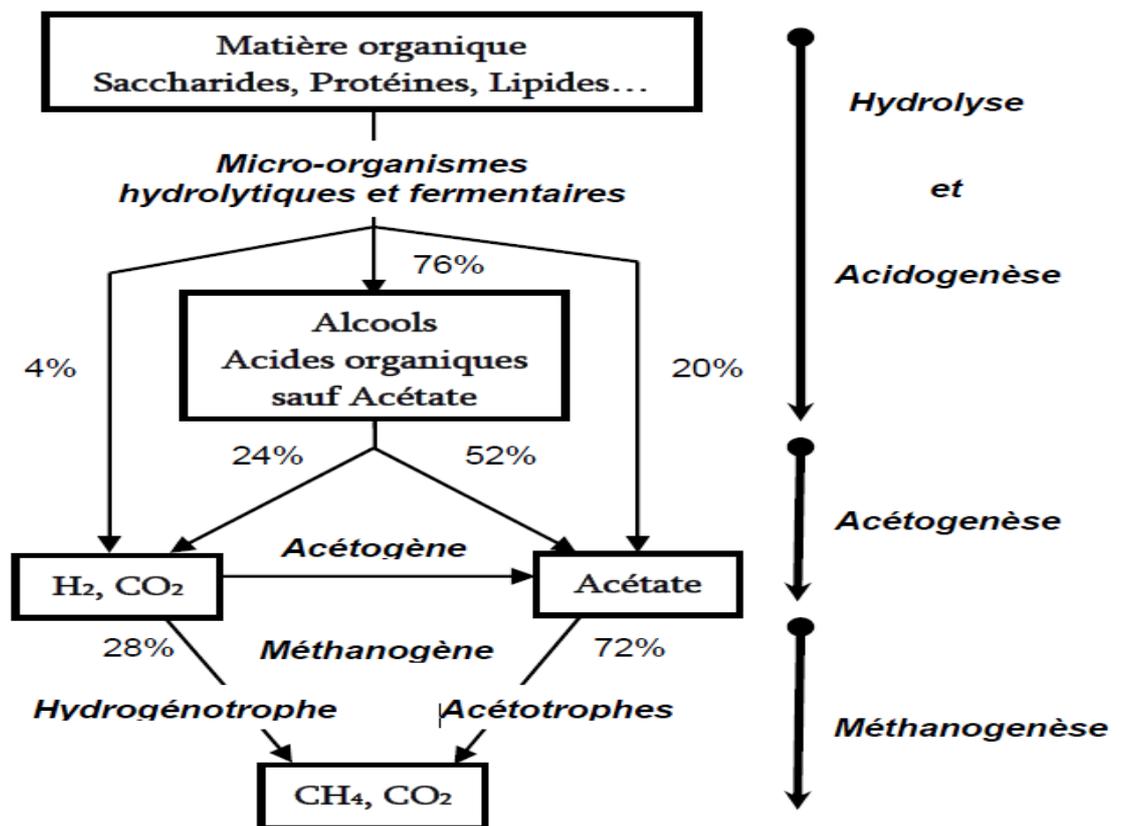
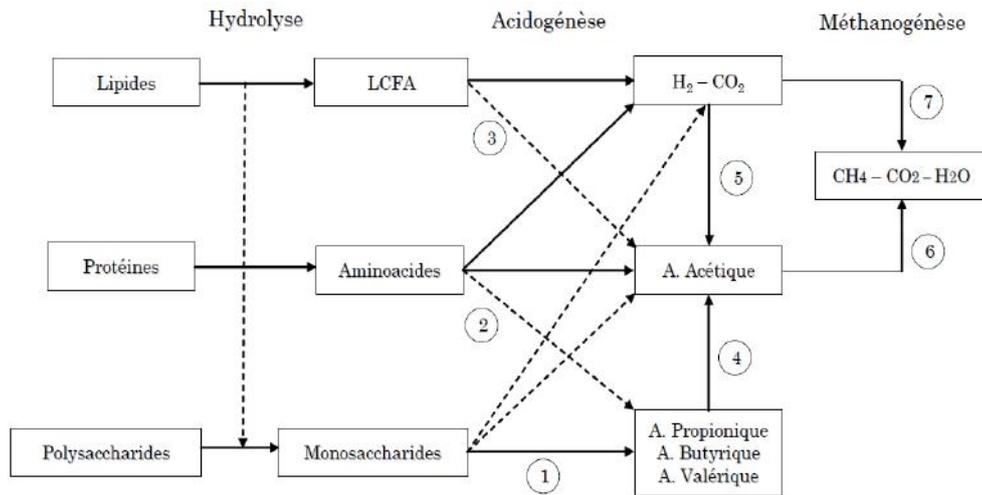


Figure 07: les principales étapes de la méthanisation [59].



1 : Acidogénèse à partir de monosaccharides 2 : Acidogénèse à partir d’acides gras à longue chaîne (LCFA en anglais) 3 : Acidogénèse à partir d’acides gras à longue chaîne (LCFA en anglais) 4 : Acétogénèse à partir de a. propionique, a. butyrique et a. valérique 5 : Homoacétogénèse 6 : Méthanisation Acétoclaste 7 : Méthanisation Hydrogenophile

Figure 08: Flux métabolique de la digestion anaérobie [59].

II.4.1. Hydrolyse:

La phase d’hydrolyse est la première étape de la digestion anaérobie, pendant laquelle la plupart des macromolécules complexes sont transformées en composés plus simples (monomères). Les lipides sont transformés en acides gras et en glycérol ou en autres alcools, les polysaccharides en acides, en aldéhydes et en alcools, après un stade intermédiaire en monosaccharides et glucides, pendant que les protéines sont transformées en acide acétique et azote ammoniacal après un stade intermédiaire comme aminoacides [60].

II.4.2. Acidogénèse:

Ensuite vient l’étape d’acidogénèse, pendant laquelle la plupart des composés organiques simples et des monomères organiques sont transformés en acides gras volatiles (A. Acétique, A. Propionique, A. Butyrique, A. Valérique), avec dans certains cas, une production d’hydrogène.



Les organismes responsables de ces deux premières étapes de transformation sont les bactéries acidogènes et fermentaires comme *Clostridium* sp et *Bacillus* sp. [60].

II.4.3. Acétogénèse:

La phase suivante correspond à l'acétogénèse où les acides gras volatils, et les substances de petite taille moléculaire, comme quelques alcools et aldéhydes, sont transformés en acide acétique (ou acétate) par des organismes acétogènes producteurs obligés d'hydrogène (OHPA) et des bactéries homoacétogènes. Il est alors possible d'avoir aussi un procédé d'oxydation de l'acétate jusqu'à H₂ et CO₂ par des bactéries spécifiques. Les *Syntrobacter* sp et les *Sytrophomonas* sp sont quelques organismes responsables de ces réactions [61].

II.4.4. Méthanogénèse:

Finalement à partir de l'acétate (ou de l'acide acétique) ou de l'hydrogène et du CO₂, les organismes méthanogènes acétoclastes et les méthanogènes hydrogénophiles (microorganismes du type Archaea) produisent le méthane. Parmi les organismes qui ont ce type de métabolisme, on peut citer Méthanosarcina, Méthanothrix et Méthanoaeta. [62].

- Les méthanogènes acétotrophes convertissent l'acétate en dioxyde de carbone et en méthane. La décarboxylation de l'acétate fait intervenir deux réactions couplées, dont le bilan d'enthalpie libre rend thermodynamiquement possible la production de méthane. présente ce bilan.



- Les méthanogènes hydrogénotrophes réduisent le dioxyde de carbone, les carbonates et les bicarbonates avec le dihydrogène pour former du méthane et de l'eau. [62].



II.5. Les paramètres influençant la méthanisation:

La digestion anaérobie doit se dérouler dans des conditions environnementales maîtrisées. Un certain nombre de paramètres doivent faire l'objet d'un suivi régulier pour s'assurer du bon fonctionnement du procédé.

II.5.1. pH:

Le pH est un paramètre essentiel car l'écosystème de la digestion anaérobie. En particulier les organismes méthanogène, est sensible à la variation de pH. Celui-ci à également un effet indirecte sur le fonctionnement du système par la modification des équilibres chimiques des acides et des bases faible, notamment les (AGV, le sulfure d'hydrogène et l'ammonium dont les formes non ionisées peuvent inhiber la méthanisation. Il est donc important de suivre le pH et, si nécessaire, de l'ajuster dans l'alimentation ou de le réguler automatiquement dans le digesteur. Le pH optimum de la méthanisation se situe autour de la neutralité, entre 6.5 et 8.5. Un élément important pour le maintien du pH est l'alcalinité du digesteur [63].

II.5.2. Température:

La température influence les taux de croissance des espèces microbiennes de la digestion anaérobie. Or les réactions liées à ce processus sont athermiques. Il est donc indispensable d'apporter une source de chaleur extérieure pour pouvoir atteindre les conditions optimales de température [64].

Les différents groupes bactériens responsables des étapes successives de méthanisation ont des températures optimales de fonctionnement différentes. On distingue trois niveaux de température pour le fonctionnement des méthaniseurs :

- **Psychrophile à basse température 5°C à 25°C:** utilisée normalement dans les méthaniseurs fonctionnant à la température ambiante. Cette technique exige des longs temps de rétention, c'est la raison pour laquelle elle n'est plus utilisée en Europe.
- **Mésophile à moyen température 25°C à 38°C:** la plupart des digesteurs anaérobies européens opèrent dans cette gamme de température.
- **Thermophile à haute température au-dessus de 50°C jusqu'à 70°C:** cette technique est moins utilisée en raison des besoins énergétiques importants pour maintenir la température dans le méthaniseur. Toutefois, il peut arriver que ce procédé soit utilisé en complément du procédé mésophile, puisque les matières organiques prioritairement dégradées ne sont pas nécessairement les même dans les deux processus [64].

Les avantages d'un régime thermophile par rapport à un régime mésophile sont une réduction du temps de séjour du procédé, une destruction des microorganismes pathogènes, une augmentation de la solubilité et de l'accessibilité des substrats. Les inconvénients sont une dépense énergétique importante pour le maintien de la température à 55°C, un potentiel d'instabilité plus élevé avec notamment un risque d'inhibition par l'ammoniac plus important [64].

Tableau 04: Comparaison de la digestion en condition thermophile et mésophile [65].

Critère	Digestion mésophile	Digestion thermophile
Charge organique	faible	élevée
Destruction des pathogènes	faible	élevée
Sensibilité aux composés toxiques	faible	élevée
Sensibilité aux changements de température	inférieure	supérieure
Vitesse réactionnelle	inférieures	supérieures
Coûts opérationnels	faible	élevée
Maintien de la température	Mayenne difficile	difficile

II.5.3. L'absence d'oxygène:

L'oxygène est évidemment un inhibant (réaction anaérobie), cependant une petite quantité d'oxygène n'inhibe pas totalement et immédiatement la production de biogaz. En effet, certains groupes de bactéries, appelées anaérobies facultatives, peuvent tolérer et absorber une petite quantité d'oxygène évitant ainsi d'inhiber les autres groupes de bactéries ne tolérant pas du tout l'oxygène (bactéries anaérobies strictes). L'absence de l'oxygène est une condition pour le développement des bactéries méthanogènes, qui sont anaérobies strictes [65].

Tableau 05: Effet de l'oxygène sur les différentes phases de la digestion anaérobique [65].

Hydrolyse	Acidogénèse	Acétogénèse	Méthanogénèse
-Bactéries anaérobies strictes et facultatives ; - Type Escherichi, streptococcus, clostridium.	-Bactéries anaérobies strictes et facultatives ; -Type clostridium principalement.	- Bactéries anaérobies strictes ; - Type syntrobacter, syntrophys ou syntro-phomonas.	-Bactéries anaérobies strictes, groupes des archae ; -Type méthano-bactériales, méthano-coccales, méthano-microbiales

II.5.4. Rapport C/N:

Le carbone et l'azote sont des éléments essentiels à la nutrition des microorganismes, ainsi que le phosphore et le soufre. Le carbone est primordial pour les bactéries en tant que source d'énergie et l'azote autant qu'élément de structure cellulaire. Les rapports C/N supérieurs à 23/1 ont été identifiés comme inadaptés pour une digestion optimale ; et des rapports inférieurs à 10/1 se sont révélés inhibiteurs selon des études portant sur la digestion anaérobique thermophile des déchets de volailles et d'autres substrats celluloses. Pour un fonctionnement optimum d'un réacteur à chargement continu, les bactéries ont besoin d'un rapport C/N convenable pour leur métabolisme le rapport C/N idéal est de 30. En effet les bactéries ont besoin de trente fois plus de carbone que d'azote. Si ce rapport n'est pas maintenu on observe un défaut de croissance des bactéries ou bien une accumulation des nutriments est donc un changement des caractéristiques biochimiques du milieu. Un rapport C/N adéquat est donc important pour avoir un bon fonctionnement de la digestion anaérobique [66].

II.5.5. Brassage:

Le brassage du digesteur n'est pas essentiel pour que la digestion anaérobique se déroule.

Cependant, il permet l'obtention d'un milieu homogène, c'est un moyen de favoriser les transferts thermiques, ioniques et métaboliques. Il permet aussi une augmentation des contacts entre les substrats à digérer et la flore fixée et évite les courts circuits dans le

réacteur, un court-circuit correspond à la sortie prématurée d'une partie du substrat de la cuve car celle-ci ne suit pas le parcours habituel, l'effluent ne subit pas donc la méthanisation totale. Le brassage se fait à l'aide d'un agitateur mécanique, ou d'un système hydraulique par la recirculation de la boue ou réinjection du gaz produit [66].

II.5.6. Pression partielle en hydrogène :

L'hydrogène est une molécule clé dans le processus de la digestion anaérobie. Il est produit lors de l'acétogénèse à partir des produits de l'acidogénèse (AGV). La thermodynamique des réactions de production d'hydrogène est défavorable dans les conditions standards ($\Delta G^\circ > 0$). Cette faible pression partielle est assurée par les bactéries homoacétogènes et hydrogénophiles qui consomment H_2 au fur et à mesure de sa production [66].

II.5.7. Humidité:

Pour toute activité biologique, la présence d'eau est indispensable surtout à la multiplication des microorganismes, d'après Marache, une humidité minimale de 60 à 70% est nécessaire à la méthanisation [67].

Le taux de dilution est un facteur favorisant; une augmentation du taux de dilution mène à une augmentation importante du volume du biogaz produit.

Tableau 06: Début de production du biogaz [67].

Taux de dilution (%)	90%	80%	60%	40%
Début de production de biogaz (j)	40	40	67	113

II.5.8. L'absence des inhibiteurs:

La fermentation anaérobie est réputée pour sa sensibilité aux matières toxiques et particulièrement la phase méthanogène, qui est encore plus sensible. Ces éléments inhibiteurs sont présents dans le substrat lui-même, ou produits lors de la digestion, parmi eux on peut citer :

a- Oxydants :

Les oxydants sont des inhibiteurs à cause de leurs grands rôles dans la régulation du potentiel redox. Comme les bactéries méthanogènes exigent de bas potentiels redox, on limite au minimum l'apport de substances oxydantes telles que les nitrates, les nitrites et évidemment l'oxygène [68].

b- Ammoniaque :

L'ammoniaque est considéré comme un inhibiteur ayant un effet toxique sur les microorganismes de la digestion anaérobie et notamment des méthanogènes acétoclastes. L'ammoniaque est souvent rencontré dans les supports ayant un fort taux de protéines, il se forme rapidement dans le digesteur, par biodégradation des constituants protéiques et au-delà de 2 à 3 g/l, il devient toxique et inhibiteur pour les micro-organismes méthanogènes. L'ammoniaque libre a été reconnu plus toxique que l'ion ammonium (CH_4^+). En générale, les taux d'ammoniac CH_4 libre devraient être maintenus en dessous de 80 ppm pour éviter l'inhibition. Il a été montré qu'une très forte concentration de l'ordre de 1500 à 3000 ppm en ion ammonium est tolérable [68].

c- Les acides gras volatiles(AGV):

L'accumulation des acides gras volatils (AGV) pendant le déséquilibre du processus reflète directement un désaccouplement cinétique entre les producteurs et les consommateurs acides. La concentration d'AGV a été plus suggérée pour le contrôle et la surveillance du digesteur anaérobie, dans un système faiblement protégé, le pH, l'alcalinité partielle et les mesures d'AGV sont utiles pour le contrôle de processus tandis que dans le système à pouvoir tampon élevé (fortement protégé), l'AGV est fiable pour indiquer le déséquilibre de processus.

Cependant, plusieurs études ont précisé que l'AGV individuel peut fournir une information plus importante comme avertissement à têt avant l'échec de processus [69].

d- Métaux lourds :

Certains d'entre eux sont toxiques pour les organismes anaérobies, même à de faibles concentrations. Les métaux lourds bloquent le métabolisme et tuent les organismes en inactivant le groupe d'enzymes à savoir les sulfhydriles par formation de mercaptides.

Par contre il est possible d'éliminer les produits toxiques du support nutritif ou de les diluer jusqu'à passer en dessous du seuil de toxicité [69].

e- Cations :

Les cations eux aussi présenteraient une toxicité à une certaine concentration vis-à-vis de la méthanisation en se liant aux acides gras volatils. Le tableau suivant montre l'effet des ions [70].

Tableau 07: Concentrations en ions provenant la stimulation ou l'inhibition de la Méthanisation [70].

Ions	Stimulation (mg/l)	Inhibition modérée (mg/l)	Inhibition totale (mg/l)
Na ⁺	100/200	3500/5500	8000
K ⁺	200/400	2500/4500	12000
Ca ⁺⁺	100/200	1000/1500	3000
Mg ⁺⁺	75/150	1000/1500	3000

II.5.9. Temps de rétention hydraulique (TRH) :

C'est le temps de séjour moyen du substrat dans le réacteur. C'est-à-dire le rapport du volume utile du fermenteur sur le débit volumique du substrat. Ce paramètre opératoire a un impact direct sur les différentes étapes réactionnelles de la digestion anaérobie. En effet, un temps de séjour inférieur à 5 jours est insuffisant pour avoir une digestion stable en raison du lessivage des microorganismes méthanogènes. Voici quelques exemples du temps de rétention de lagunage anaérobie [71].

Le temps de séjour aussi est fixé par la vitesse de croissance des bactéries impliquées dans la digestion anaérobie. Ces micro-organismes ont des vitesses de croissance différentes. Le temps de rétention hydraulique est déterminé expérimentalement, il varie de quelques heures à quelques mois. Les valeurs obtenues dépendent tout d'abord du procédé retenu: discontinu ou continu, des types de fermenteurs la température de fonctionnement du procédé [71].

Tableau 08: Différents exemples de TRH suivant le procédé de digestions [71].

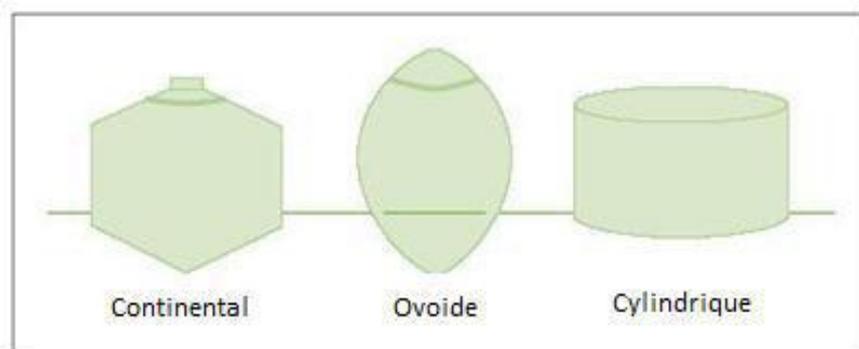
Procédé	TRH
Réacteurs homogènes conventionnels	10 à 40 j minimum
Digesteurs infiniment mélangés	10 à 20 j
Réacteurs de seconde génération : contact anaérobie	6 à 8 j
Réacteurs à cellules fixées	1 à 4 j suivant le substrat

II.6. Le digesteur:

II.6.1. Définition:

Le digesteur, cœur où se réalise la méthanisation, et aussi appelé fermenteur ou bioréacteur anaérobie. Il est une simple cuve fermée, étanche et isolée thermiquement, dans laquelle différents micro-organismes dégradent chimiquement et biologiquement les déchets et les effluents organiques et produisent en stade finale du biogaz. Il peut être équipé des systèmes : de chauffage, d'agitation, de prélèvements et d'un système de mesure de teneur en gaz, de dispositif permettant le contrôle de différents paramètres : la température, le pH, la pression,...etc [72].

Il existe plusieurs formes de digesteur (ovoïde, cylindrique, ou bien continental), généralement construit en béton avec une protection interne en résine époxy mais pour les digesteurs de grande taille, l'acier vitrifié s'avère souvent plus compétitif.

**Figure 09 : Différentes formes de digesteurs.**

II.6.2. Classifications des différents types de digesteurs:

II.6.2.1. Mode de l'alimentation:

Le choix de digesteur varie en fonction du type des déchets à traiter et de l'application projetée. Le cycle de méthanisation peut être discontinu ou continu.

II.6.2.1.1. Les digesteurs discontinus:

La cuve de fermentation est chargée, dans les réacteurs discontinus, en une seule fois, avant la fermentation et est déchargée, comme celle-ci est finie. Les substrats peuvent être immergés ou non. Une préfermentation aérobie est effectuée pendant quelques jours, afin de dégrader les molécules peu polymérisées, qui peuvent acidifier le milieu. C'est un procédé utilisé, surtout, pour un substrat tel que des fumiers pailleux ou des ordures ménagères [73].

a. Des exemples de réacteurs discontinus:

a.1. Le procédé de Ducellier-Isman:

Ce digesteur est composé d'une cuve de 10 à 50 m³ avec une cloche servant de gazomètre au-dessus. L'étanchéité est assurée par l'eau qui sert de joints gazeux. La présence d'eau entre le couvercle et le corps de la cuve forme un joint hydraulique, empêchant le gaz s'échapper.

Une étape initiale de fermentation aérobie de 4 à 7 jours est nécessaire pour faire monter la température et éviter l'acidification du milieu. La fermentation aérobie produit du biogaz pendant deux mois avec une moyenne de 0.17 m³/jour.

Ce procédé a été amélioré, pour la méthanisation des résidus d'élevage, avec une préfermentation aérobie de 2 jours par insufflation d'air. Le démarrage s'effectue grâce au mélange du substrat à fermenter et d'une partie de celui de la cuve précédente. La productivité monte à des niveaux de 0.8 à 0.9 m³/jour [73].

a.2. Les réacteurs non immergés avec recirculation des liquides:

C'est une amélioration du procédé Ducellier-Isman. Cette amélioration est obtenue par un arrosage séquentiel de la masse en fermentation qui représente un exemple de digesteur

discontinu développé par le centre internationale de l'énergie et de l'hydraulique (Burkina Faso). [73]

II.6.2.1.2. Les digesteurs continus:

Les réacteurs continus sont réalimentés quotidiennement avec une quantité spécifique de substrat. Cette introduction est accompagnée par la vidange d'un volume égale d'effluent. Ce procédé réclame des conditions de fonctionnement plus précises que pour les réacteurs discontinus. Il faut une alimentation régulière, un contrôle de pH, de la température et un brassage, si nécessaire [74].

a. Exemples de digesteur continu:

a. 1. Les réacteurs de type chinois :

Les réacteurs de type chinois sont essentiellement sphériques et sont alimentés, au moins une fois par jour. Ils sont d'un volume de 6 à 8 m³. Leur productivité est de 0,15 à 0,3 m³/jour.

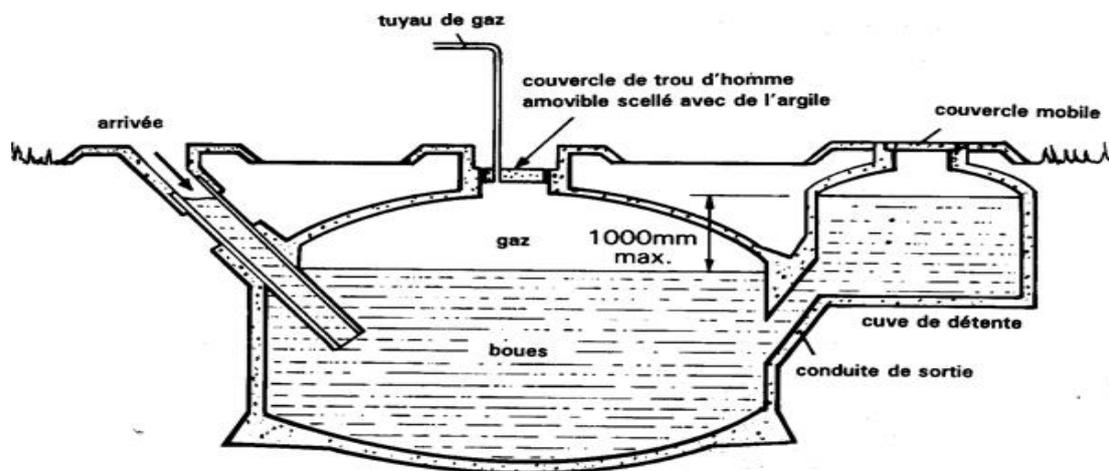


Figure 10 : Une installation de bio-digester type chinois [47].

a.2. Les réacteurs homogènes:

Ce sont des réacteurs de la seconde génération, qui traitent surtout des effluents liquides. Ils ont un temps de séjour des liquides plus faibles que les autres réacteurs continus.

Les temps de séjour dans les réacteurs homogènes sont de l'ordre de l'heure. Il faut donc, pour retenir les micro-organismes dans les réacteurs, penser à des mécanismes comme la formation de granules, la décantation, la fixation sur un support [74].

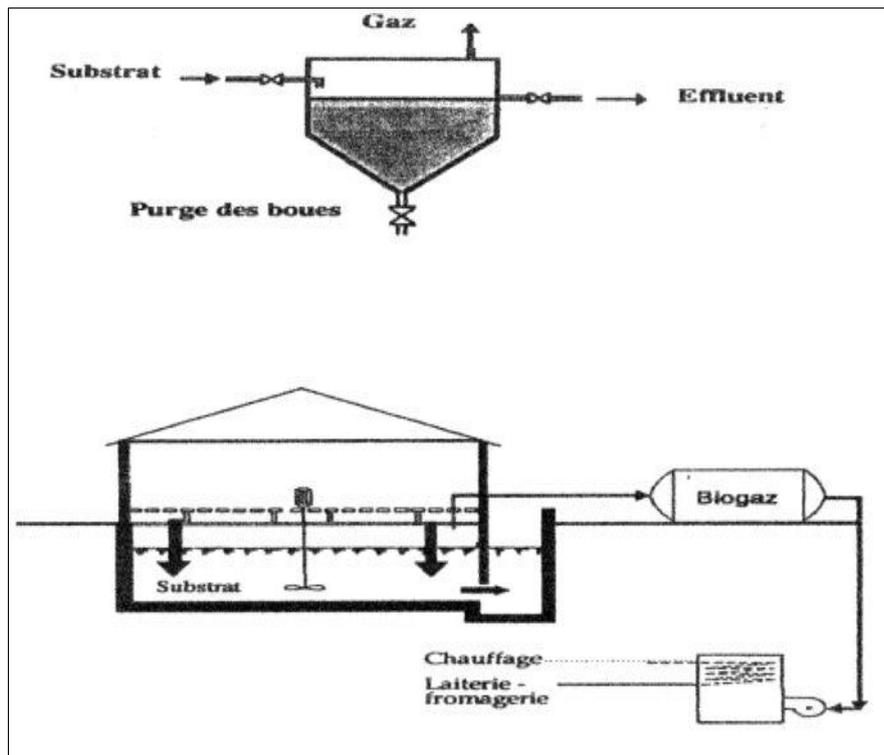


Figure 11 : Principe d'un réacteur homogène et exemple d'une installation [74].

II.6.2.2. Classification selon le type de substrat:

- a. **Solide** : La teneur en matière sèche est supérieure de 15 %.
- b. **Semi solide ou pâteux** : La teneur en matière sèche entre 5 et 15%.
- c. **Liquide** : La teneur de la matière sèche est inférieure de 5%.

II.6.2.3. Classification selon le nombre d'étapes :

Selon les phases méthanogènes et l'acidogénèse se déroulent dans le même réacteur ou dans deux cuves séparées.

a. Le procédé en mono-étape:

C'est une fermentation « solide » qui se réalise à 30- 40 % de matière sèche. Cette stratégie consiste à réaliser des digestions anaérobies en une étape dans des cellules fermées qui reçoivent un lixiviat afin d'activer les réactions biologiques [75].

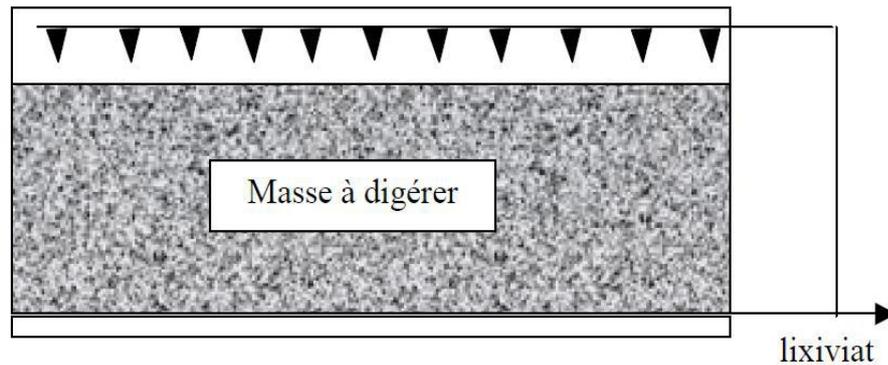
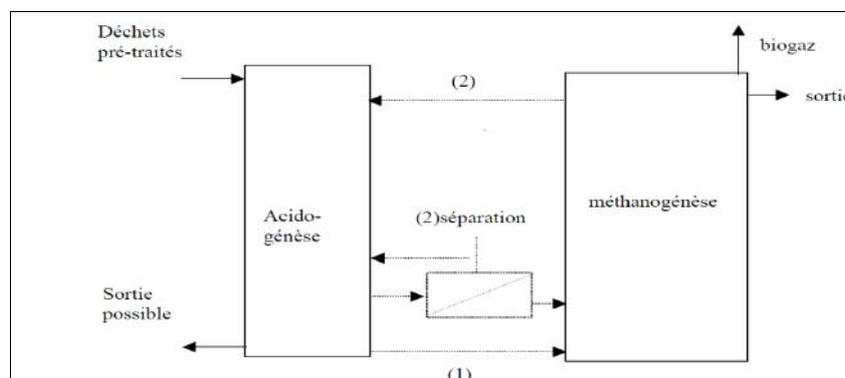


Figure 12: Exemple de schéma de principe du digesteur à cellules (fermentation discontinue) [75].

b. Le procédé en bi-étape:

Ce type de digesteur sépare la phase d'hydrolyse et l'acidogénèse dans une première étape, et la méthanogénèse dans une seconde étape. La recirculation de la phase liquide présente l'avantage de ne pas nécessiter constamment l'ajout d'eau réchauffée. La technologie à deux étapes peut être utilisée aussi pour méthaniser des déchets solides.

Dans le réacteur d'acidogénèse on réalise une hydrolyse et une acidogénèse, ce qui liquéfie la matière organique solide et la transforme en AGV, et dans le second on a la méthanisation de ce lixiviat, donc, L'avantage des procédés bi-étape réside dans le fait que la décomposition de la matière solide est de l'ordre de quelques jours. Cette séparation des phases, réduit le risque d'intoxication des cellules méthanogénèses liée à la présence des acides gras volatils lorsque l'étape d'acidogénèse n'est pas complètement terminée [76].



(1) couplage direct, (2) séparation des liquides et des solides avec recirculation du lixiviat épuré.

Figure 13 : Stratégies de mise en œuvre de la digestion anaérobie en deux étapes [76].

II.7. Avantages et les inconvénients de la digestion anaérobie :

Les avantages de la digestion anaérobie sont :

- la production du biogaz peut être utilisée comme sources d'énergies renouvelables pour générer trois types d'énergie : chaleur, électricité ou biocarburant;
- Un intérêt agronomique, lié à une concentration importante en azote ammoniacal (NH_4^+) et en phosphates (PO_4^{-3}) due à la lyse de la matière organique ;
- Une demande en énergie plus faible que les procédés aérobies et pas d'apport en oxygène ;
- de faibles impacts environnementaux (stabilisation de la matière organique, réduction des nuisances olfactives, réduction des émissions de gaz à effet de serre...);
- La possibilité de traiter des charges organiques élevées : de 2 à plus de 80 kg de DCO par mètre cube de réacteur et par jour avec des taux d'épuration de 80 à 98%.
- Elle génère un compost qui conserve en grande partie le potentiel fertilisant de la matière de départ.

Cependant, elle comporte aussi quelques inconvénients :

- Une forte sensibilité aux variations de charges et aux composés toxiques ;
- Une dégradation plus lente que pour les procédés aérobies ;
- Des coûts d'investissement importants ;
- Du fait de la faible vitesse de croissance bactérienne, la cinétique d'épuration est lente et les périodes de démarrage des réacteurs relativement longues;
- Les populations microbiennes sont sensibles aux perturbations, en particulier à l'oxygène et aux métaux lourds [77].

II.2. Biogaz:

II.2.1. Définition et Composition :

Le biogaz est un gaz produit par fermentation de matière organique végétale ou animale dans un milieu en raréfaction d'air, il est plus léger que l'air, sa densité par rapport à l'air est 0,7. Le biogaz est composé généralement de 60% en CH₄ et de 40% en CO₂. Ces valeurs peuvent varier de ±10% en fonction des conditions de mise en œuvre.

Selon la qualité du substrat, le gaz peut contenir plus ou moins d'hydrogène sulfuré (H₂S). Il existe plusieurs sources possibles d'émission du biogaz avec chacune leurs caractéristiques. On peut également trouver d'autres composés sous forme de traces [78].

Tableau 09 : Principaux composés autres que CH₄ présents dans le biogaz et leurs effets [78].

Composé	Concentrations	Effets
Dioxyde de carbone CO ₂	25 à 50 % en vol	Diminution de la capacité calorifique Augmentation de l'indice de méthane Source de corrosion si le gaz contient de l'eau Dégradation des piles à combustible alcalines
Sulfure d'hydrogène H ₂ S	0 à 1 % en vol	Corrosif pour l'équipement Source de SO ₂ et H ₂ SO ₄ lors de la combustion Poison de catalyseurs
Azote N ₂	0 à 5 % en vol	Diminution de pouvoir calorifique Augmentation de l'effet cliquetis des moteurs
Eau H ₂ O	1 à 5 % en vol	Source indirecte de corrosion Source de condensation dans les parties froides pouvant endommager l'instrumentation
Poussières	-	Diminution de l'efficacité des catalyseurs

II.2.2. Historique :

Le biogaz a été connu depuis il y a eu de la biomasse et les déchets en décomposition d'autres, en décomposition et digérées par les bactéries. On pense qu'il a été découvert dans un marais, mais le vrai potentiel de ce gaz n'a pas été réalisé jusqu'à ce que les années 1890, lorsque le gaz a été utilisé pour l'éclairage en Angleterre [79].

En 1630, Von Helmont a constaté que des gaz inflammables pourraient évoluer de la décomposition de matières organiques et dans les notes de Shirley 1667 ses conclusions sur le biogaz alors le nom de gaz des marais. On dit que Marco Polo a écrit sur la découverte

réservoirs d'eaux usées en Chine, mais on ne sait pas s'ils ont capturé le gaz et l'a utilisé. Certaines sources indiquent également des Assyriens et des Perses d'utiliser ce gaz pour chauffer l'eau du bain dans l'Antiquité.

1808- Sir Humphrey Davy a constaté que le méthane est présent dans les gaz qui sont formés par la digestion anaérobie du fumier.

1884 – Louis Pasteur présente ses étudiants travaillent à l'Académie des sciences et raconte comment ce gaz peut être utilisé pour le chauffage et l'éclairage. Son élève, Ulysse Gayon, effectuée la fermentation anaérobie du fumier et de l'eau à 35°C et a obtenu 100 litres de biogaz par mètre cube de fumier.

1895 – le biogaz est utilisé pour illuminer les rues à Exeter, en Angleterre.

1940 – le développement du biogaz et des applications sommeillent jusqu'à ce que les pénuries d'énergie de la deuxième Guerre mondiale. La guerre oblige les gens à considérer les sources d'énergie alternatives à nouveau.

1957- Un inventeur britannique, Bates, modifie sa voiture fonctionnant au biogaz produit à partir de lisier de porc. En 1974, il explique le processus et les avantages de celui-ci dans le film documentaire 'Doux comme un écrou'. A ce stade, il dirige sa voiture sur le biogaz pendant 17ans.

2005 - Le programme de soutien de production de biogaz au Népal remporte la récompense Ashden pour l'installation de plus de 150.000 installations de biogaz dans les zones rurales. Et un train qui fonctionne avec du biogaz commence son service en Suède [79].

II.2.3. Ressources de biogaz:

Les ressources de biogaz sont variées, les déchets organiques sont la première source, ces déchets regroupent les déchets urbains et industriels, déchets d'agriculture, ainsi que les déjections animales.

Tableau 10 : Ressources mondiale en biogaz [80].

Ressource mondiale en biogaz	Biogaz produit (Mtep/an)	Biogaz valorisable (Mtep/an)
Déchets solides urbains et industriels	750	60 à 100
Eaux usées urbaines et industrielles	50	40 à 50
Sous-produits agricoles	1000	40 à 150

La quantité et la composition chimique du biogaz produit en fermenteur dépendent du substrat, de sa DCO, du débit d'alimentation du digesteur, de la qualité de l'agitation, du temps de séjour dans le réacteur, de la température de fermentation, l'homogénéité et la granulométrie du substrat etc [80].

II.2.4. Valeur énergétique :

Le méthane brûlé avec une flamme bleue, lorsque sa combustion est complète. Celle-ci s'accompagne d'un fort dégagement de chaleur. Dans ces conditions, 1 m³ de méthane peut atteindre en brûlant une température de 1400 °C et dégage une quantité de chaleur de 8500 à 9500 kcal, à titre indicatif, 1 m³ de biogaz, contenant 70% de méthane et de 30% de gaz carbonique, libère par combustion environ 6000 Kcal [81].

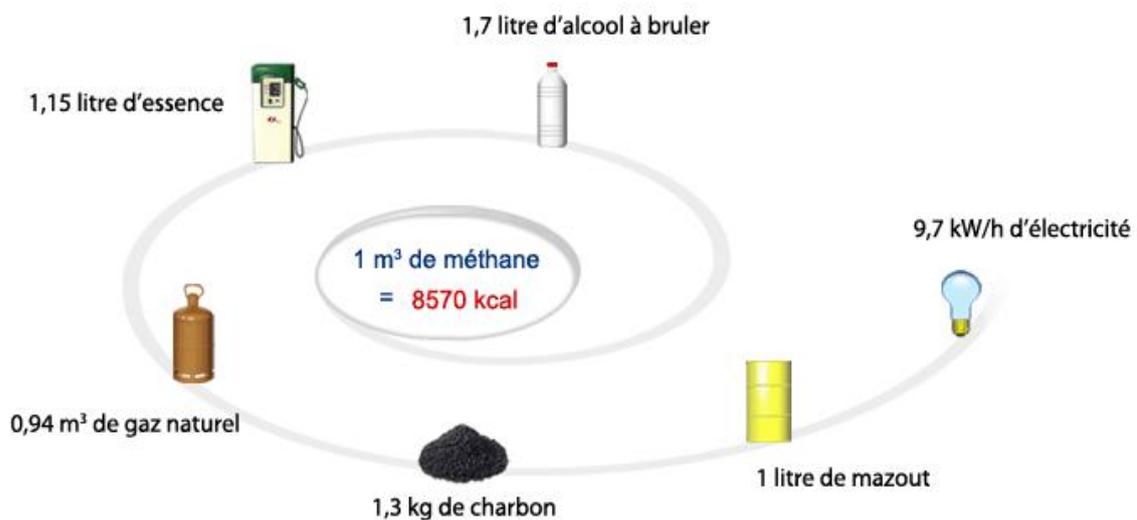


Figure 14 : Equivalences énergétiques de 1 m³ de méthane [81].

La variabilité de la quantité du gaz suivant le substrat fermenté est important : De 55% à 75% de CH₄. Sur une installation donnée, en l'absence d'accident de fermentation, la composition du biogaz est stable.

II.2.5. Purification du biogaz :

On distingue dans l'étape de purification du biogaz, le traitement qui consiste à éliminer les composés toxiques et corrosifs (H₂O, H₂S, CO₂).

Le biogaz produit nécessite en suite une purification. Cette dernière permet :

- D'améliorer le pouvoir calorifique ;
- De diminuer le volume de stockage ;
- De supprimer l'effet corrosif et les mauvaises odeurs dus à la présence de l'H₂S.

Le procédé le plus efficace pour éliminer l' H_2S est le passage du biogaz dans un filtre composé de limailles de fer (oxyde de fer). Le filtre est placé sur la conduite de gaz.

Pour l'élimination de CO_2 , il faut faire barboter le biogaz dans une solution de chaux qui fixera le gaz carbonique.

Pour éliminer l'eau on applique des techniques de condensations pour piéger les gouttelettes ou de séchage la vapeur d'eau (refroidissement et piégeage de l'eau, adsorption sur des produits de type silica-gel, séchage au glycol ...) [82].

Tableau 11 : Les composés et leurs techniques d'élimination [82].

Composés à éliminer	Techniques
Eau	Elimination de la vapeur d'eau à l'aide d'un purgeur (piège à l'eau)
Souffre	Adsorption sur charbon actif, ajout de chlorure de fer, le passage du biogaz dans un filtre d'oxyde de fer
Organohalogénés	Adsorption sur charbon actif
CO_2	Barbotage du biogaz dans une solution de chaux

II.2.6. Valorisation de biogaz :

De nos jours, l'énergie produit par le biogaz qui est généré par fermentation est utilisée uniquement dans les installations de couplage chaleur-énergie. La valeur énergétique moyenne du biogaz est de 5 à 10 kWh /Nm³ (fonction de sa teneur en méthane).

De ce fait, le biogaz se prête bien à différentes valorisations énergétiques. En fonction de sa composition intrinsèque et de l'utilisation que l'on souhaite en faire, il pourra être utilisé brut ou épuré. Chaque kWh utilisé à partir de biogaz permet d'économiser les ressources en énergie fossile. D'où l'intérêt écologique de contrôler et d'organiser de façon industrielle la fabrication de ce biogaz soit par voie de méthanisation en réacteur, soit par récupération du biogaz de décharge.

Le biogaz peut être valorisé pour produire de l'énergie thermique et / ou électrique. Tout comme un combustible fossile, il peut être caractérisé par son pouvoir calorifique inférieur (PCI) [83].

Le PCI d'un combustible est la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète d'une unité de quantité du combustible. En effet, le PCI du CH_4 est de 36.5 MJ/m³ ou 9.94 kWh/Nm³. Le PCI du biogaz est proportionnel à sa teneur en CH_4 :

$$\text{PCI biogaz} = Q \times 35.5 \text{ MJ/m}^3 = Q \times 9.95 \text{ kWh/m}^3$$

Où Q représente le pourcentage de CH₄ dans le biogaz.

A titre de comparaison, le pouvoir calorifique de 1 Nm³ de biogaz comprenant 60% de méthane vaut environ 22 MJ.

Jusqu'à ces dernières années, le biogaz produit dans les décharges publiques et parfois dans les fermenteurs, était le plus souvent considéré comme un sous-produit de la décomposition organique, et ne donnait que rarement lieu à une valorisation. Depuis dix ans, l'amélioration des techniques de mise en décharge ainsi que des performances des fermenteurs anaérobies a conduit à un net avantageux la récupération de l'énergie 'biogaz'.

On distingue quatre types de valorisation :

- Valorisation thermique en chaudière ;
- Valorisation électrique ;
- Valorisation en carburant automobile ;
- Valorisation par injection dans le réseau de gaz de ville [83].

II.2.6.1. Valorisation thermique en chaudière :

Sur chacune de nos installations de valorisation de biogaz, une torchère de sécurité est installée afin notamment de brûler le biogaz en cas d'intervention sur la chaudière ou sur le cogénérateur biogaz. Par ailleurs, lorsque le biogaz est chargé en (H₂S), des systèmes d'épuration par injection d'air sont installés sur les réacteurs.

De plus, dans le cas de la cogénération biogaz, nous pouvons également étudier différentes possibilités de valorisation de la chaleur et notamment des réseaux de chaleur, du séchage de boues, des unités de séchage de fourrage en grange, des serres, ... [84].

II.2.6.2. Valorisation électrique du biogaz :

La méthanisation en tant que technique de production d'énergie renouvelable, bénéficie d'une obligation d'achat d'électricité produite à partir de biogaz et d'une tarification spécifique avec un contrat de 15 ans. Le tarif d'achat comprend :

- Un tarif de base fixé selon la puissance de l'installation de méthanisation ;
- Une prime à l'efficacité énergétique définie selon le pourcentage de valorisation de l'énergie dans le biogaz ;
- Une prime à la méthanisation de 20 €/MWh [85].

II.2.6.3. Valorisation en carburant automobile :

Il est possible techniquement d'utiliser le biogaz comme comburant. Cependant, cette valorisation peut difficilement être envisageable dans des installations de méthanisation à la ferme. En effet, l'utilisation du biogaz comme comburant automobile demande une excellente qualité de pureté du gaz. Il doit contenir un minimum de 96% de méthane. Il ne doit pas contenir d'eau, de soufre, d'organo-halogénés, de carbone et de métaux. Il est nécessaire également de le comprimer, ce qui rend son épuration totale indispensable afin de ne comprimer que le méthane. L'investissement nécessaire est donc très élevé et n'est envisageable que sur des installations de grande dimension [85].

II.2.6.4. Valorisation par injection dans le réseau de gaz de ville :

Il peut aussi être injecté sur le réseau de gaz naturel. C'est la solution qui offre le meilleur rendement énergétique, si le réseau est assez proche du point de production. Le gaz injecté doit être odorisé et subir un certain nombre de prétraitements pour éliminer le CO₂, H₂S, O₂, H₂O et les composés halogènes [86].

II.3. Substrat :

Les substrats qui peuvent faire l'objet d'un traitement par digestion anaérobie sont essentiellement :

- Les effluents d'élevage ;
- Les eaux usées urbaines ;
- Les déchets agro-alimentaires ;
- Les ordures ménagères.

II.3.1. Effluents d'élevage :

L'élevage de trois espèces (bovins, porcins et volailles) émet chaque année près de 300 millions de tonnes de déchets, soit huit fois plus que la production de la population humaine. Les élevages de porcs sont producteurs d'un déchet mixte, mélange d'urines et de fèces : le lisier, qui est produit toute l'année dans des élevages aux forts effectifs d'animaux rassemblés, essentiellement dans des bâtiments de faibles surfaces. Les élevages d'ovins sont moins concernés. Les ovins sont essentiellement des animaux de plein air et leurs passages en bergeries n'ont pas l'intensité des stationnements des porcs ou des vaches laitières dans leurs bâtiments spécialisés [86].

II.3.2. Eaux usées urbains :

Nous avons vu que les différents systèmes d'épuration des eaux usées urbaines par voie aérobie produisent des boues activées, récupérées au niveau des décanteurs ou clarificateurs, et qui alimentent très fréquemment des digesteurs anaérobies. Bien que

ces boues puissent parfois donner lieu à une valorisation intéressante, notamment en agronomie, l'objectif du traitement anaérobie est avant tout l'obtention d'une meilleure stabilisation, en particulier afin de réduire les nuisances olfactives et les volumes c'est ainsi que plusieurs auteurs Mottet et Fffebi ont consacré leurs premières recherches essentiellement sur ce type de substrat pour le procédé de la méthanisation [87].

II.3.3. Les déchets agro-alimentaires :

La charge organique constitutive des eaux résiduaires de l'industrie agro-alimentaire et de certains autres types d'industries rend ces effluents polluants et impose un traitement, avant leur évacuation, satisfaisant aux normes de rejet. La digestion anaérobie peut contribuer pour beaucoup de ces effluents à la réduction de cette charge organique, avec des procédés généralement spécifiques à ce type de substrat, caractérisés par l'existence de dispositifs de rétention des bactéries dans le fermenteur et adaptés à des faibles concentrations de matière sèches [87].

II.3.4. les ordures ménagères :

La production de biogaz à partir de la fraction organique des ordures ménagères dépend, bien entendu, du procédé utilisé et de la qualité de produit mis en fermentation. Compte tenu des teneurs en matière sèche des fractions fermentescibles, les procédés de fermentation méthanique à haute teneur en matière sèche semblent les mieux adaptés, pour des raisons évidentes de réduction des volumes des digesteurs [87].

Introduction :

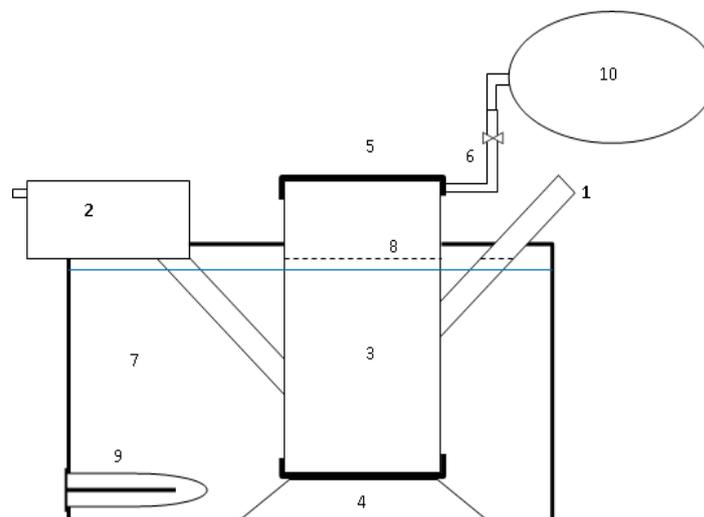
Afin d'optimiser les conditions de la digestion anaérobie et maîtriser le fonctionnement de digesteur continu, nous avons fabriqué un digesteur continu au niveau du laboratoire d'un volume de 12L, et nous avons réalisé deux expériences différentes.

La première pour optimiser le temps de rétention hydraulique et la deuxième pour l'optimisation du taux de charge organique moyenne, puis nous sommes passés à la digestion en continu à l'échelle pilote avec un volume de 4m³ pour la production de biogaz en quantité et l'exploitation de biogaz en produit d'électricité.

III.1. A l'échelle du laboratoire.**III.1.1. Optimisation de temps de rétention hydraulique(TRH):****a)Dispositif expérimental:**

Le digesteur continu est un tube de plastique avec un diamètre de 20 cm et une longueur de 45 cm, hermétiquement fermé, avec un volume réactionnel de 12 L, deux tubes de diamètre de 4 cm ont été installés sur les deux côtés, l'un pour l'introduction de la matière organique et l'autre pour la sortie de substrat digéré. Une sortie de biogaz est installée en haut de digesteur elle menée d'une vanne d'arrêt, à l'extrémité de la sortie nous avons installé un ballon pour stocké le biogaz produit. **Fig.19**

La température de la fermentation est fixée à 37⁰C dans un bain marie thermostaté.



- (1) Entrée du substrat; (2) Sortie du Digestat; (3) Corps de digesteur; (4) Support;
 (5)Couvercle; (6) Sortie du biogaz; (7) Bain-marie; (8) Niveau du substrat; (9) Résistance électrique; (10) Ballon pour la récupération du biogaz.

Figure 15: Dispositif expérimental du digesteur continu à l'échelle du laboratoire.



Photo 01: Digesteur continu à l'échelle du laboratoire.

b) Substrat:

Le substrat étudié est constitué de déchets ménagers qui ont été générés par plusieurs maisons et restaurants de la ville d'Adrar. Après triage, le substrat sélectionné est composé de déchets organiques tels que les épluchures d'oignon, de pomme de terre, de carotte, de betterave, de salade et artichauts. Ces déchets sont découpés en petits morceaux afin d'assurer une homogénéisation de l'échantillon. **Photo 02**



Photo 02: Echantillon du substrat étudié.

c) L'inoculum:

L'inoculum utilisé est récupéré d'un digesteur en fonction qu'est traité la bouse de vache.

d) Méthodes utilisées:

Afin d'optimiser le temps de rétention hydraulique, nous avons lancé une expérience de la digestion anaérobique des déchets ménagers dans le digesteur de 12L, le rapport substrat/inoculum utilisé pour cette réaction est de 1/2 [88], [89].

Les temps des rétentions choisis sont 7;14;21;28 et 35 jours successivement, pour chaque temps des rétentions nous avons suivis l'évolution des paramètres suivant: le pH, les AGV,

TAC, et les volumes de biogaz produits et la teneur du méthane, et les résultats sont la moyenne des trois essais.

III.1.2.L'optimisation du taux de la charge organique moyenne(COM):

Afin d'optimiser le taux de la charge organique moyenne, nous avons lancé une expérience de la digestion anaérobique des déchets ménagère dans le digesteur de 12L, le rapport substrat/ inoculum utiliser pour cette réaction est de 1/2.

Les taux de la charge organique moyenne choisir sont 1;1,5;2;3 et 4 g ms/L successivement pendant 28 jour [90], [91].

Pour chaque charge organique moyenne nous avons suivre les paramètres suivant: le pH, les AGV et TAC, et les volumes de biogaz et de méthane, et les résultats sont la moyenne des trois essais.

III. 2. A l'échelle pilote(Le digesteur enterré) :

L'expérience a été réalisée dans un digesteur enterré d'une capacité de 4m³ au niveau de L'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien (URER/MS) [92].

III. 2.1. Les étapes de construction:

Tableau 12 : Les étapes de construction d'un digesteur enterré d'une capacité de 4m³.

Etape	Caractérisation	Photo
Réalisation de la fosse du digesteur pilote	3 mètres de profondeur ; 5 mètres de largeur ; 4 mètre de longueur.	
Construction du fond de la cuve du digesteur	Poser sur le fond de la pierre sur une épaisseur de 10 cm. Déposer une couche de béton sur une épaisseur de 5 cm.	

<p>Construction de la paroi de la cuve de digestion.</p>	<p>Les briques sont posées à l'horizontale sur le côté d'épaisseur 15 cm.</p> <p>Les joints sont bien remplis avec du mortier de ciment</p>	
<p>Construction du bac d'évacuation du digestat</p>	<p>L'inclinaison du tuyau et de 50° par rapport à l'horizontal</p>	
<p>Construction du bac d'alimentation du substrat</p>	<p>l'angle formé avec l'horizontal soit 53°.</p> <p>une surface de 110 x125 cm</p>	
<p>Construction du dôme et trou dôme</p>	<p>A partir de la deuxième rangée au-dessus du tuyau d'alimentation les briques déposés sont inclinés de telle sorte à avoir à la quatrième rangée un diamètre de 50 cm</p>	
<p>Remplissage de la fosse.</p>	<p>la fosse est remplie par du sable</p>	

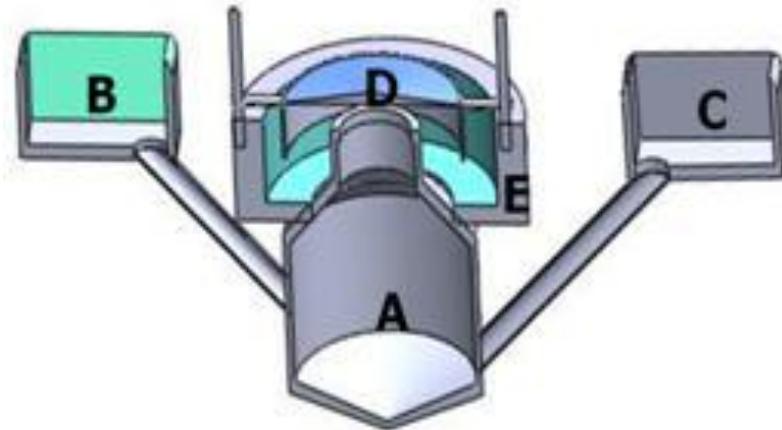
<p>Construction du bac du gazomètre</p>	<p>le diamètre du premier cercle est de 300 cm, le deuxième ayant un diamètre de 250 cm.</p>	
<p>Cloche gazométrique</p>	<p>La tôle utilisée pour la fabrication de la cloche est en acier galvanisé (réf. 15) Le sommet de la cloche est menu d'un trou auquel est soudé un mamelon en acier galvanisé (ref.15/21)</p>	

III. 2.2. Etas finale de l'installation pilote de production de biogaz:

La photo 03 et la figure 16 représente les différents composants du digesteur enterré.



Photo 03: Digesteur enterré a l'URER/MS ADRAR.



A: Cuve de digestion; B: Bac d'alimentation; C: Bac d'évacuation du digesta;
D: Cloche gazométrique; E: Bassin du gazomètre.

Figure 16: Les différents composants du digesteur enterré.

III. 2.3. Le substrat:

Nous avons alimenté le digesteur par 320 kg de déchets d'abattoirs de la ville d'Adrar (sud-ouest de l'Algérie) (photo dans annexe 04). Caractéristique du substrats ou tableau No16.

III. 2.4. Méthodes utilisées.

Lancement d'une expérience de la digestion anaérobie des déchets d'abattoirs dans le digesteur enterré de 4m³.

Pendant les 60 jours de la digestion nous avons suivi l'évolution des paramètres suivant: le pH, le DCO, les AGV et TAC, et les volumes de biogaz et de méthane, et l'évolution de la fluor microbienne. Les résultats sont la moyenne des trios essais.

III.3. Traitement de biogaz produit.

III.3.1. Filtre de dioxyde de carbone (CO₂)

Pour l'élimination de dioxyde de carbone nous avons utilisé l'eau de chaux qu'est une solution saturée d'hydroxyde de calcium Ca(OH)₂, produite en mélangeant de la chaux aérienne à de l'eau.

La chaux aérienne se dissout (faiblement) dans l'eau et la solution obtenue constitue d'eau de chaux d'une concentration de 10%.

Elle se trouble en présence de dioxyde de carbone CO₂.

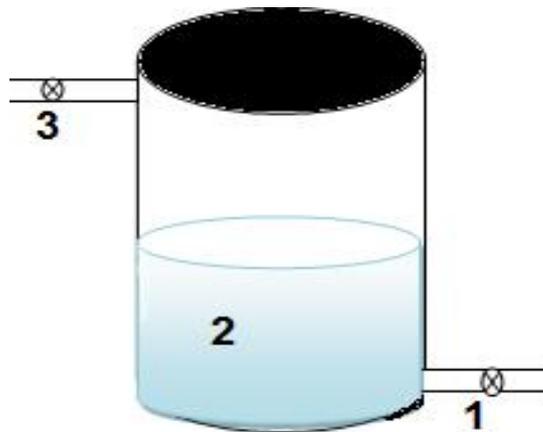
Le précipité blanc ainsi formé est du carbonate de calcium CaCO₃.

La réaction est la suivante: $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ (25)

Ou, en écrivant les espèces sous forme ionique :

$\text{Ca}^{2+} + 2 \text{HO}^- + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ (26)

Notre filtre de dioxyde de carbone est un baril de 150L de volume fermé hermétiquement, avec deux vannes d'arrêt en haut et en bas, nous remplissons l' un tiers du baril avec l'eau de chaux et nous passons le biogaz qui vient de digesteur par le bas, le biogaz barbote dans la solution de l'eau de chaux en haut., figure 17, (photo dans annexe 04)



(1) Arrivée de biogaz ; (2) eau de chaux ; (3) Sortir de biogaz

Figure 17: Schéma descriptif Filtre de dioxyde de carbone CO₂.

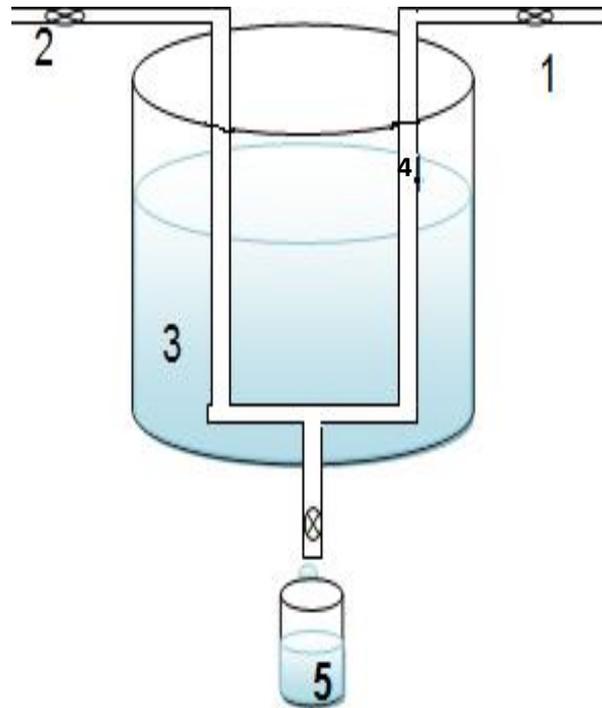
III.3.2. Déshydratation du biogaz (Piège à eau):

La déshydratation est un procédé d'élimination des molécules d'eau liquide ou vapeur contenues dans le gaz, par utilisation des moyens physiques ou chimiques afin d'éviter les problèmes suivants :

- Risque de corrosion des pipes (surtout en présence des gaz acides tels que CO₂ et H₂S).
- Risque de formation des hydrates causant le bouchage des conduites et des installations de production et de transport.
- Écoulement diphasique et augmentation de la perte de charge.
- Risque de solidification dans les procédés cryogéniques.
- Diminution du pouvoir calorifique du gaz.

Nous avons utilisé un piège à eau (moyen physique) afin de liquéfier la vapeur d'eau dans le biogaz, ce piège est une bonbonne en plastique ouverte du haut, à la partie inférieure nous avons réalisé un trou au centre de la partie basse, un tube en cuivre en U avec une vanne

passer du trou est installer dans la bonbonne qui est rempli d'eau glacée, le biogaz entré hydraté entré d' un côté et sortir déshydraté de l'autre côté, l'ouverture de la vanne permet de récupérer l'eau de déshydratation. Figure 18, (photo dans annexe 04)



(1) Arrivée de biogaz hydraté ; (2) Sortir de biogaz déshydraté; (3) Eau glacé; (4) Tube en cuivre de forme U; (5) Récupération de l'eau.

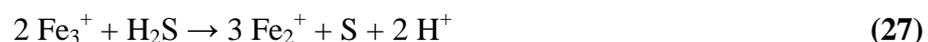
Figure 18: Schéma descriptif de piège à eau.

III.3.3. Désulfuration de biogaz (filtrage de H₂S):

L'H₂S (sulfure d'hydrogène, acide sulphydrique, hydrogène sulfuré) est un gaz toxique et inflammable avec une odeur typique d'oeuf pourri.

A cause de la toxicité de cette substance, même le fait d'inhaler des basses concentrations de sulfure d'hydrogène pendant une longue période va s'avérer dangereux, d'où l'importance d'une élimination efficace de cette substance, si présente dans le biogaz produit.

Nous avons monté un filtre de H₂S basé sur l'oxydation de H₂S par le fer selon la réaction:



Le filtre c'est un tube en plastique de 80cm de diamètre fermé des deux côtés avec deux vannes, au milieu du tube nous mettons deux couches de limaille de fer en utilisant un filet métallique, le biogaz entrer du haut sulfuré et sortir désulfurer en bas. Figure 19, (photo dans annexe 04)



(1) Sortir de biogaz désulfuré; (2) Limailles de fer; (3) Arrivée de biogaz sulfuré

Figure 19: Schéma descriptif Filtre de sulfure d'hydrogène (H₂S).

III.4. Mesure de biogaz:

III.4.1. Le compresseur à air:

Nous avons utilisé un compresseur de type RHINO 50L, a fin de compresser le biogaz produit, (photo dans annexe 04).

III.4.2. Régulateur gaz (détendeur):

Nous avons utilisé un régulateur avec sécurité à haute et basse pression type 1893 B, (photo dans annexe 04)

III.4.3. Le Compteur à gaz:

Nous avons utilisé un compteur gaz à membrane type SN G16 – G25 – G40 qu'est utilisé pour les applications nécessitant une grande précision et une dynamique étendue à basse pression (inférieure à 1bar), (photo dans annexe 04).

III.5. Production d'électricité:

III.5.1. Générateur de gaz:

Le générateur de gaz de type GROUPE ELECTROGENE GAZ SEMI-CAPOTE 3600 TR/MN 50 ou 60HZ 4,6KW - CC5000LPG/NG, (photo dans annexe 04).

III.5.2.Méthodes utilisées:

Après traitement et mesure de biogaz nous avons utilisé le méthane pur pour démarrer le générateur en deux essais avec une charge de 155wat, qui représente la consommation moyenne pour l'individu Algérien en électricité par heure selon la banque mondiale de l'énergie [93].

Pour matérialiser cette puissance dans notre expérience nous avons choisi l'utilisation de deux lampes de 50wat plus une lampe de 55wat.

- Dans le premier essai: le démarrage de générateur avec gaz de ville et avec une charge de 155wat, et nous avons suivis la puissance du courant par une acquisition des données pendant une demi-heure de temps.

- Dans le deuxième essai: le démarrage de générateur avec une charge de 155wat. Mais cette fois, la source d'énergie est notre biogaz qui est produit par le digesteur enterré, et aussi nous avons suivis la puissance du courant pendant une demi-heure de temps. L'installation finale présentée dans la photo 04.



- (1) Digesteur; (2) Filtre de CO₂; (3) Piège à eau; (4) Filtre de H₂S; (5) Compresseur à air;
(6) Détendeur; (7) Compteur à gaz; (8) Générateur de gaz; (9) Tableau de charge;
(10) Acquisition des données.

Photo 04: Installation finale.

III.6. Méthodes analytiques: Les analyses effectuées dans toutes les expériences sont représentées dans le tableau 13.

Tableau 13 : Les analyses effectuées.

Analyse	Méthode	Référence
Détermination de la matière sèche	APHA	[94]
Détermination de la teneur en matière organique	APHA	[94]
Dosage des protéines	KJELDAHL	[97]
Dosage des fibres (cellulose)	Standard méthode	[98]
Dosage des sucres	Standard méthode	[99]
pH	APHA	[94]
Dosage du titre alcalimétrique complet (TAC)	APHA	[94]
Dosage des acides gras volatils (AGV)	APHA	[94]
Détermination de la demande chimique en oxygène DCO	APHA	[94]
Mesure de la demande Biologique en Oxygène (DBO)	APHA	[94]
Dénombrement du fluor microbien	OMS	[95]
Identification de la composition de biogaz	CPG	[96]

III.6.11. Quantification de volume de biogaz et de CH₄ produit :

La production du biogaz est le but principal de la digestion anaérobie. Durant le déroulement du processus de digestion anaérobie le volume du biogaz et le méthane produit sont mesurés de façon régulière par la méthode de Test de Potentiel Méthanogène (BMP).

a) Matériels

- Éprouvette graduée;
- Flacon ;
- Support ;
- Des tuyaux;
- Pompe à vide;
- deux ballons

b) Solutions

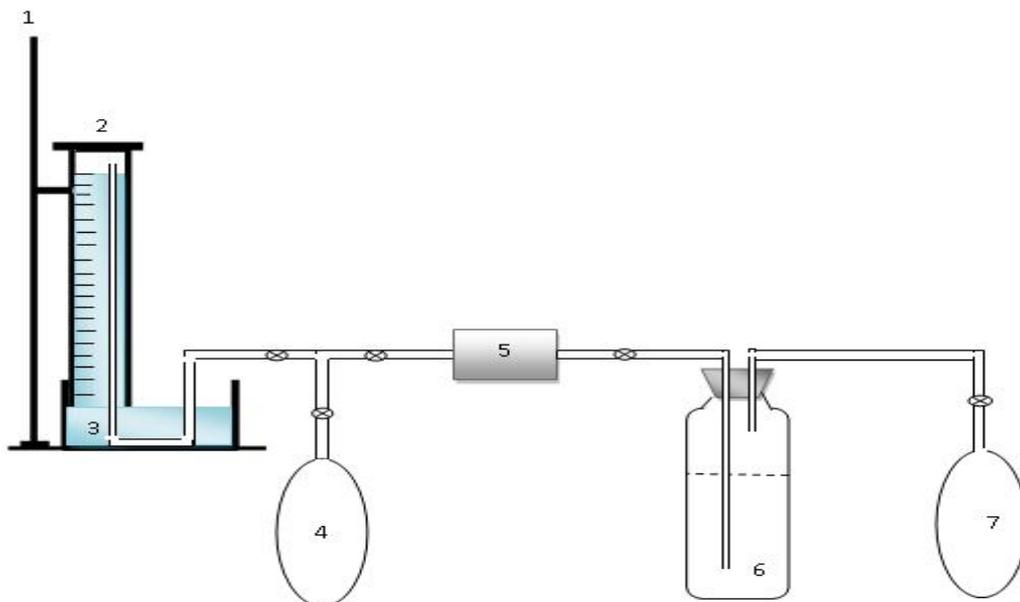
- NaCl (10g/l) pH=2.
- NaOH (3M/l) .

c) Méthode:

Le volume des biogaz produits (4) est mesurer par la méthode du liquide déplacé [100] dans l'éprouvette inversé (2) avec une solution saturée (NaCl 10g/l pH=2)(3) afin de réduire au maximum la dissolution de CO₂; après la quantification le biogaz est pomper(5) dans une solution de NaOH (3M/l) (6) pour l'élimination de CO₂, en fin on obtiens un méthane pure(7), on le quantifie par la même méthode. Photo 05. Fige20.



Photo 05: Système de mesure du volume du biogaz et de CH_4 (BMP).



(1) Statif - (2) Éprouvette graduée inversé - (3) Solution saturé (NaCl 10g/l pH=2) - (4) Biogaz non filtré (5) Pompe à vide - (6) Filtration de CO_2 (solution de NaOH (3M/l)) –

(7) Biogaz filtré.

Figure 20: Schéma représentatif de système de mesure du volume du biogaz et de CH_4 produit. (Test de potentiel méthanogène ou BMP).

III.7. Analyse statistiques:

Les données ont été analysées à l'aide de la méthode d'analyse de variance (ANOVA) et les différences entre les traitements ont été comparées à l'aide du système TRUKEY de IBM SPSS statistics version 23 à $p < 0,05$ (voir l'annexe 05).

Introduction :

L'objectif de ce chapitre est de présenter les résultats obtenus dans le présent travail et de les interpréter tout en faisant une comparaison avec les résultats d'autres chercheurs dans le domaine. Commenant par l'optimiser le temps de rétention hydraulique et l'optimisation du taux de charge organique moyenne, puis la digestion en continu à l'échelle pilote avec un volume de 4m³ et la production de biogaz en quantité et produit d'électricité.

VI.1.Optimisation de temps de rétention hydraulique:

L'objectif de ce travail est d'adopter un meilleur temps de séjour TRH (temps de rétention hydraulique) pour la digestion anaérobie des déchets ménagers de la ville d'Adrar, cela a pour but d'exploité ces résultats à l'échelle pilote pour la valorisation énergétique de ces déchets par la production d'électricité.

VI.1.1.Caractéristiques initiales du substrat:

Le tableau suivant représente les caractéristiques initiales du substrat et de l'inoculum utilisé.

Tableau 14: Caractéristiques du substrat et de L'inoculum avant le lancement d'expérience :

Paramètre	Unités	Substrat	Inoculum
pH		6,92	5,81
Taux d'humidité	%	88,31	78,25
Taux de Matière sèche	%	11,7	21,75
Taux de Matière organique	%	96,06	94,01
Taux de Matière minérale	%	3,94	5,99
Demande chimique en oxygène soluble (DCOs)	mg/l	9796,44	21744,79

A la lumière de ces résultats, il apparaît clairement que notre substrat est composé principalement de matière organique avec un taux de 96%. Les résultats ont aussi mis en évidence des valeurs de la DCO de 13227.51 mg/L signifiant la charge organique oxydable de notre substrat.

VI.1.2 Le pH:

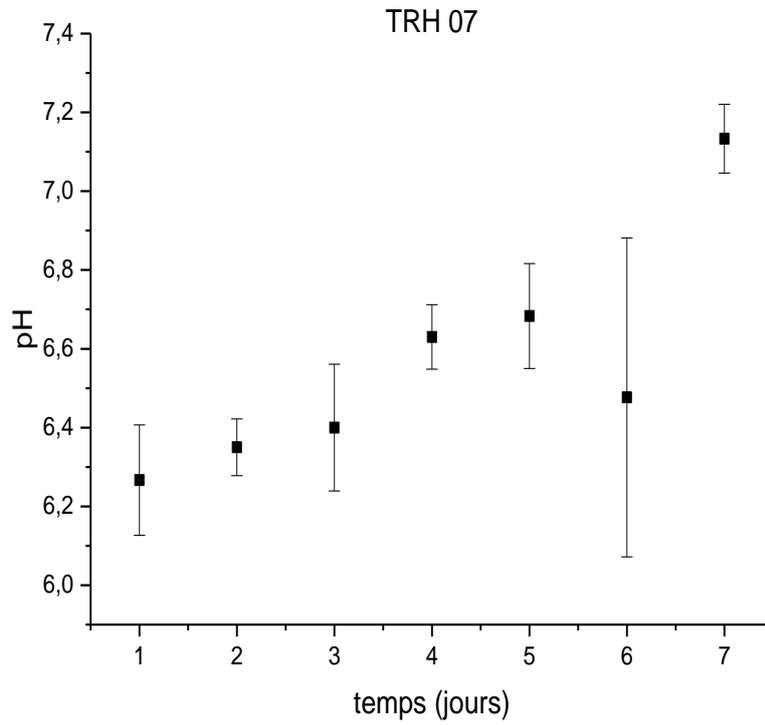


Figure 21: Evolution de pH pour le TRH 07.

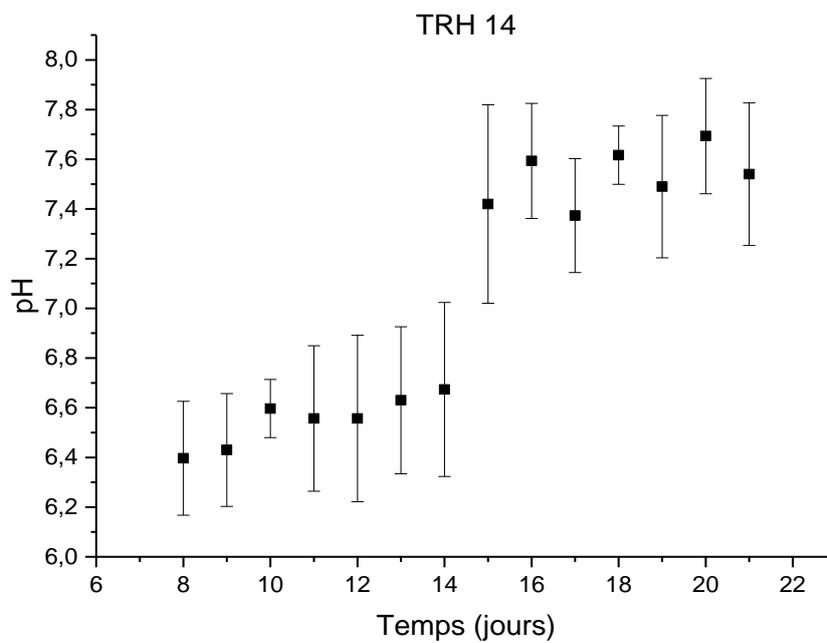


Figure 22: Evolution de pH pour le TRH 14.

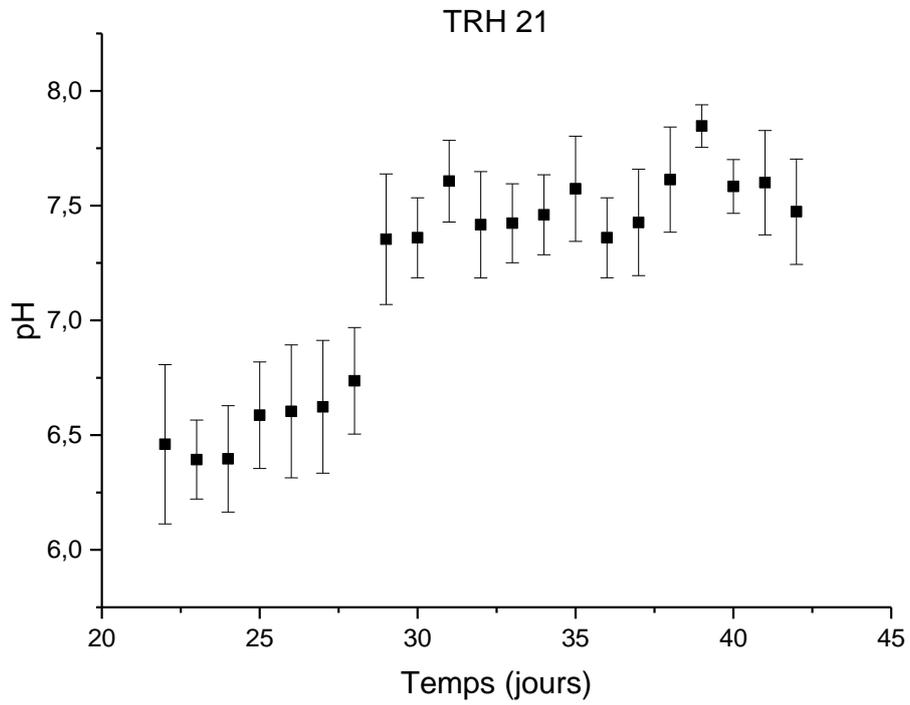


Figure 23: Evolution de pH pour le TRH 21.

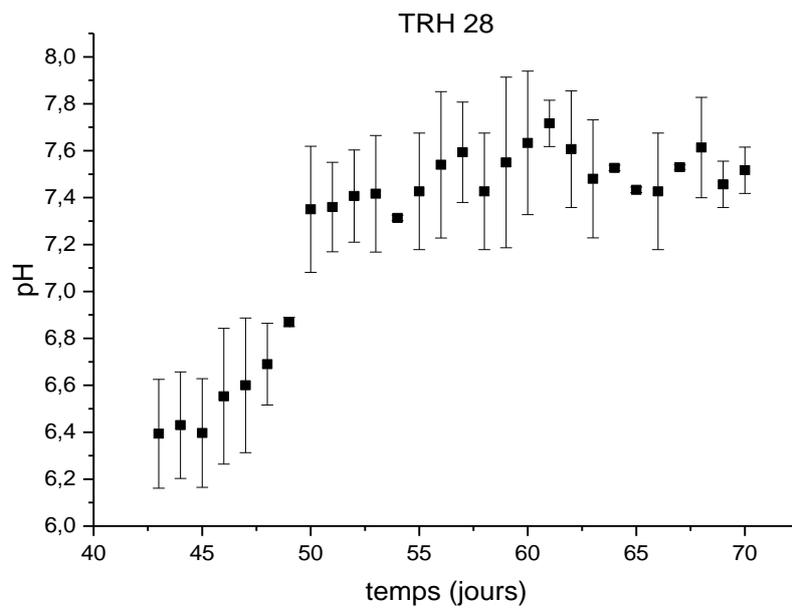


Figure 24: Evolution de pH pour le TRH 28.

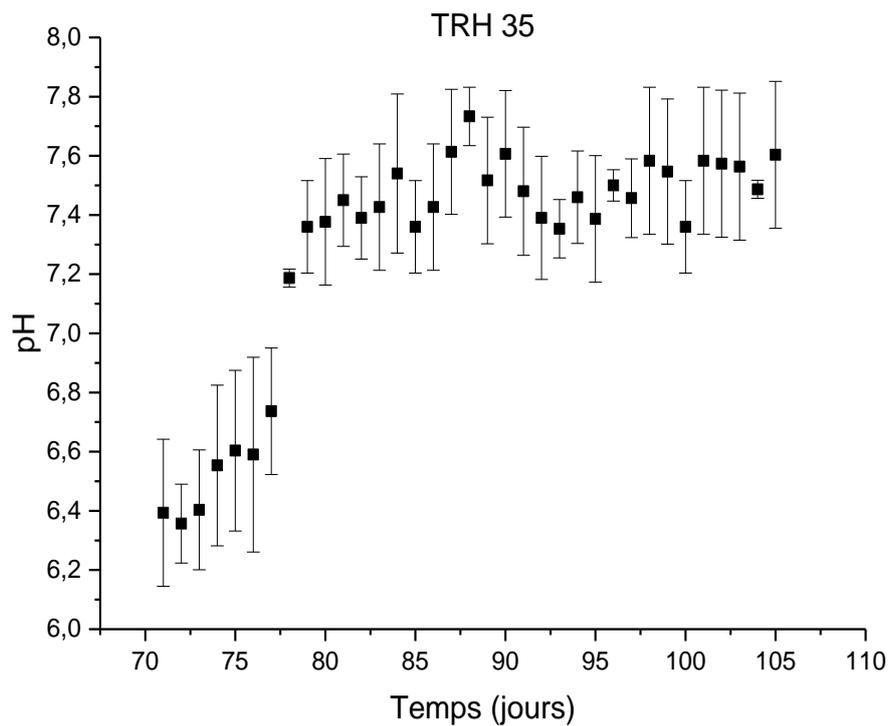


Figure 25: Evolution de pH pour le TRH 35.

La valeur optimale de pH pour un bon déroulement de la digestion anaérobie est au voisinage de la neutralité avec un pH entre 6,5 et 7,5 [101].

Les figures 21, 22, 23, 24, 25 ont montré que l'évolution des valeurs du pH pour le TRH 07 a varié entre 6,26 (en premier jour) et 7,02 (en septième jour). L'acidité de milieu ou les premiers jours expliquent la décomposition du substrat et la formation des acides gras et leurs accumulations dans le milieu, puis le pH commence à augmenter vers la neutralité, ce qui est expliqué par la production de l'éthanol dans le milieu. Pour les autres TRH 14, 21, 28 et 35, la même allure de courbe de pH, commençant avec une valeur de 6 et augmentant durant les dix premiers jours, puis se stabilisant entre 7 et 7,5 (valeur optimale pour la digestion anaérobie), cette stabilité est expliquée par la consommation des acides gras volatils et l'épuisement de la matière organique, ces observations ont été rapportées par (N. M. S. Sunyoto. et al.) [102].

VI.1.3 Rapport AGV/TAC:

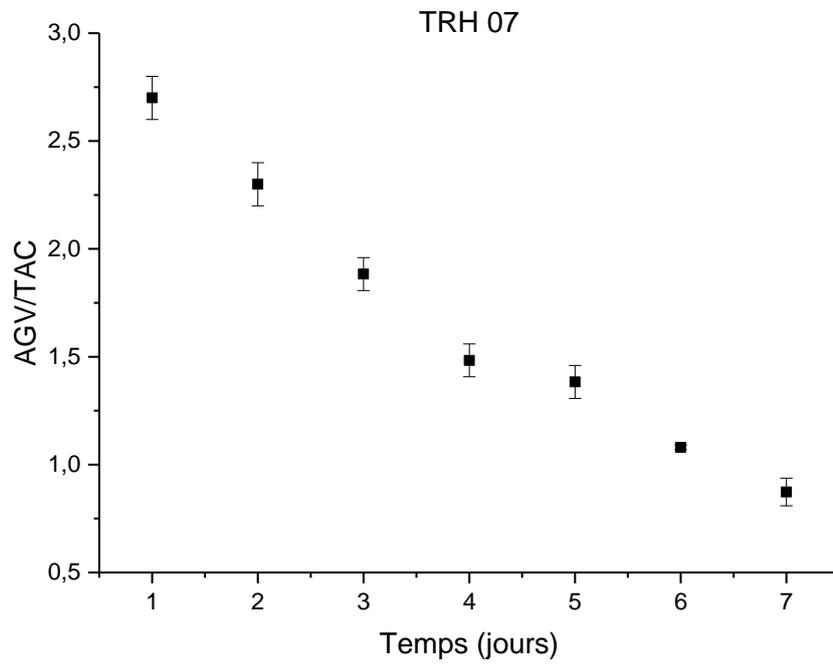


Figure 26: Evolution de rapports AGV/TAC avec TRH 07.

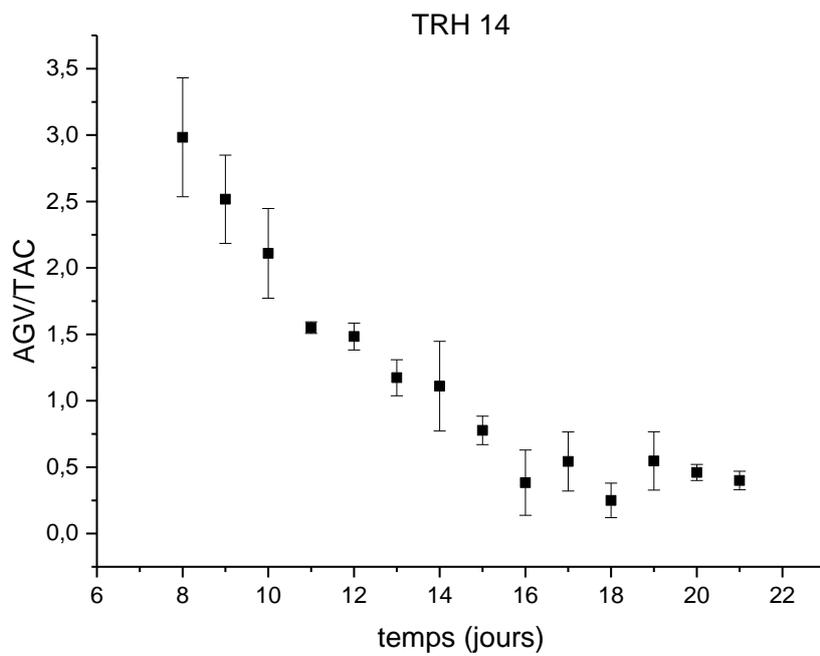


Figure 27: Evolution de rapports AGV/TAC avec TRH 14.

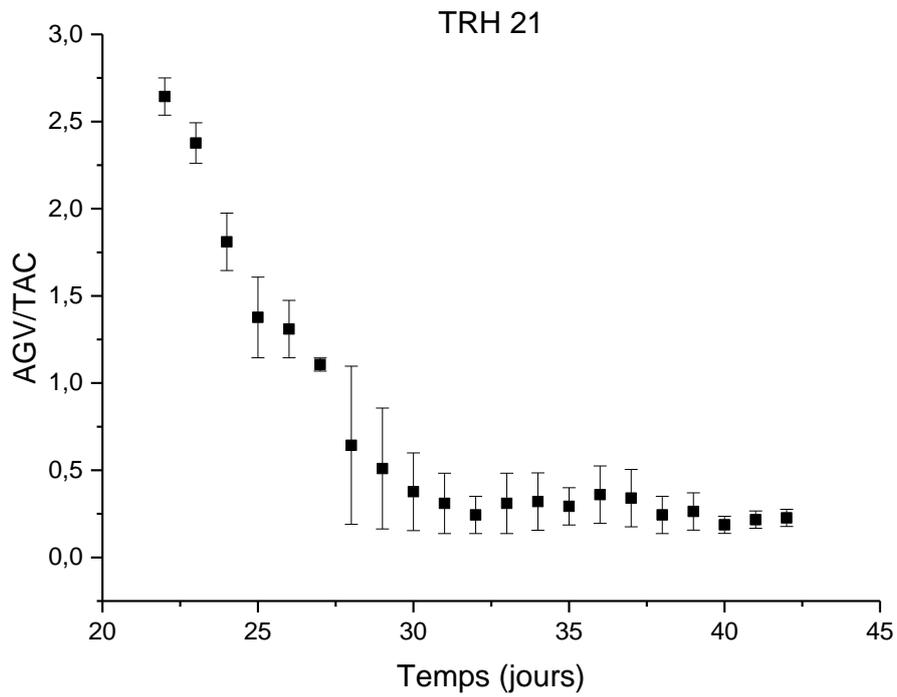


Figure 28: Evolution de rapports AGV/TAC avec TRH 21.

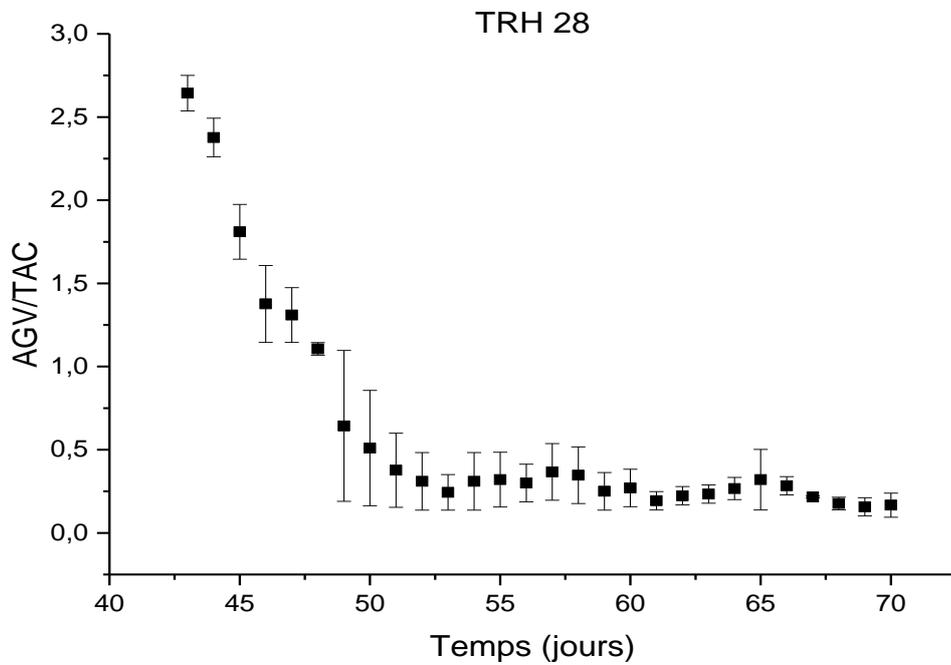


Figure 29: Evolution de rapports AGV/TAC avec TRH 28.

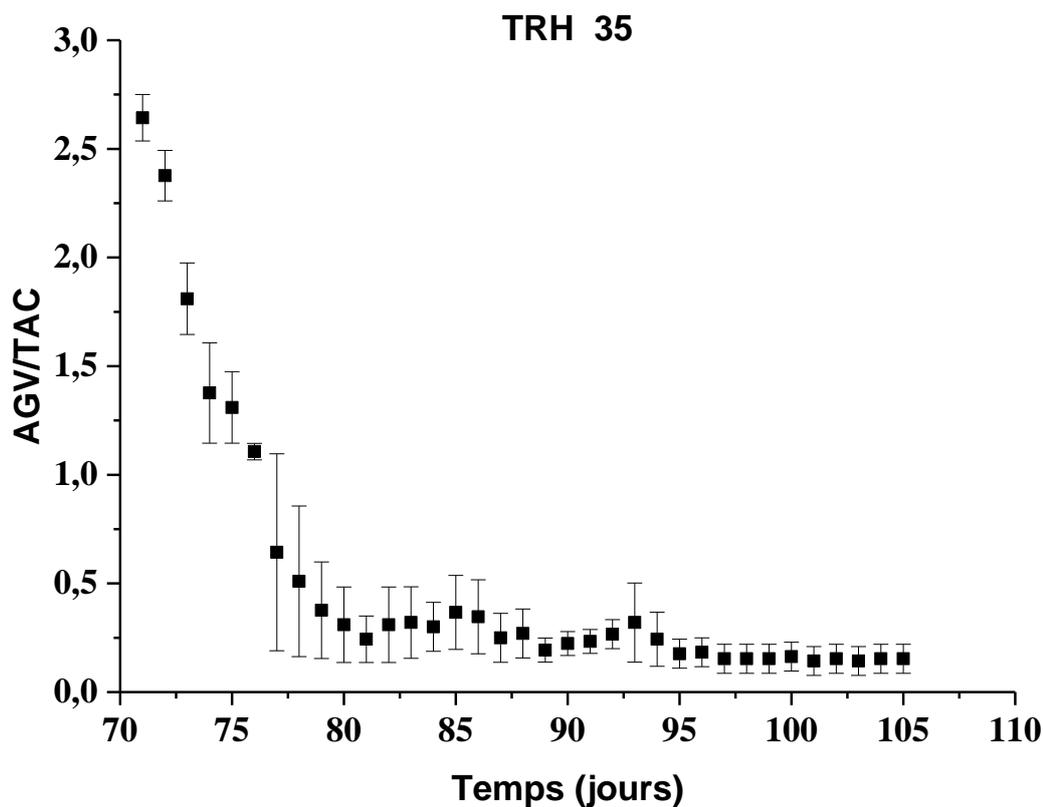


Figure 30: Evolution de rapports AGV/TAC avec TRH 35.

Les figures 26, 27, 28, 29, 30 montrés que avec le TRH 07 le rapport AGV/TAC variés entre 2,7 et 0,9 ce que expliqué par la présentation des quantités importantes d'AGV accumulés, leurs accumulation influe négativement sur le déroulement de la méthanisation, les mêmes observations sont valables pour le TRH 14;21;28;35 (une diminution de rapport AGV/TAC après le dixième jour ou sous de 0,5) mais spécifiquement avec des avalués varier entre 0,5 et 0,1 jusqu'à la fin de l'expérience, ces mêmes observations ont été signalés par S. Begum et al. [103], expliqué par le bon déroulement du processus de méthanisation.

VI.1.4. Volume de biogaz:

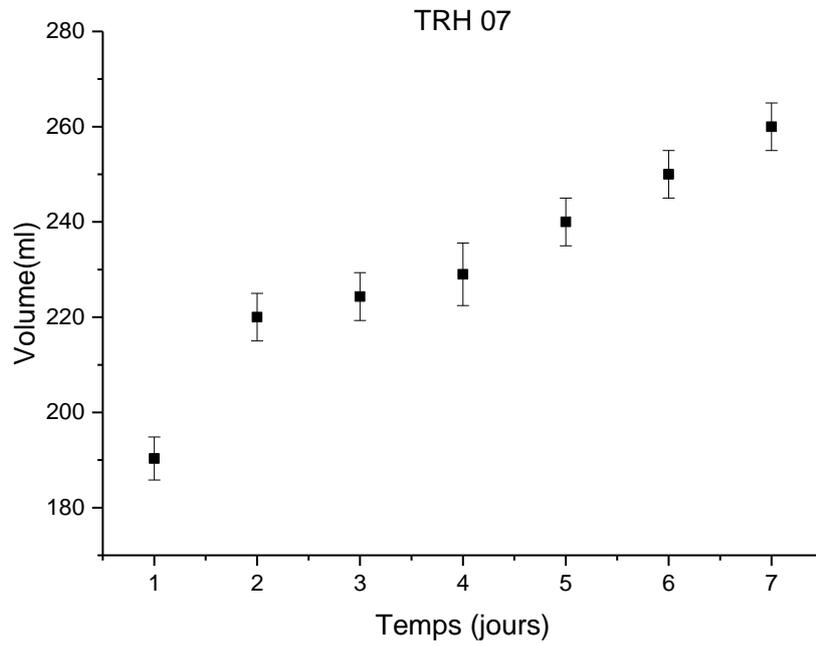


Figure 31: Evolution des volumes de biogaz avec le TRH 07.

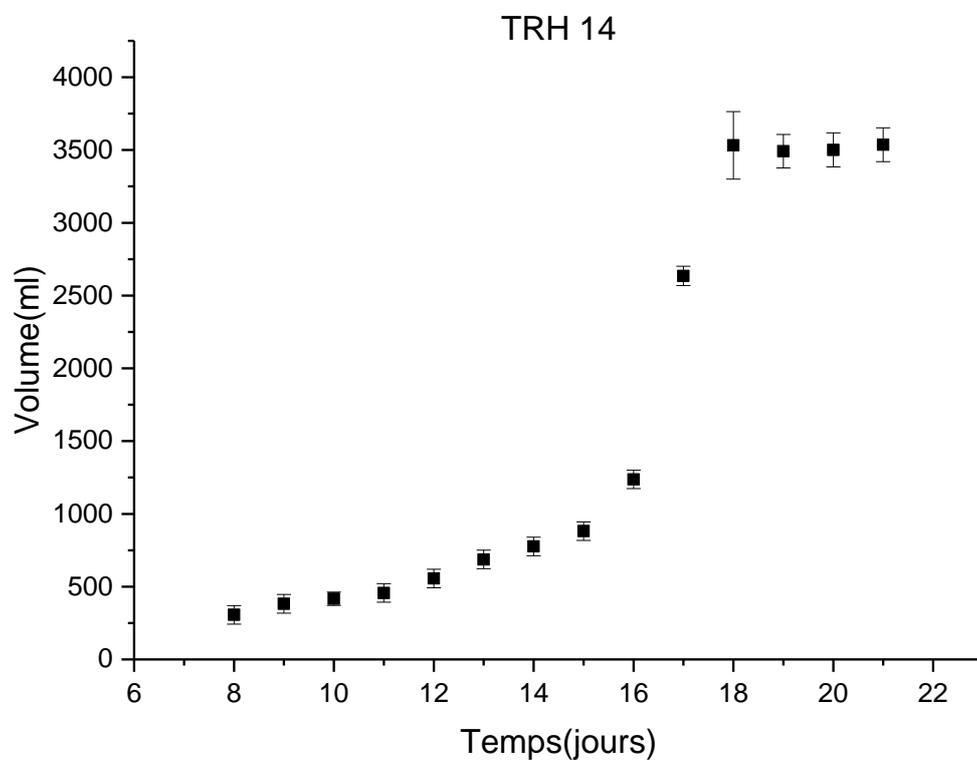


Figure 32: Evolution des volumes de biogaz avec le TRH 14.

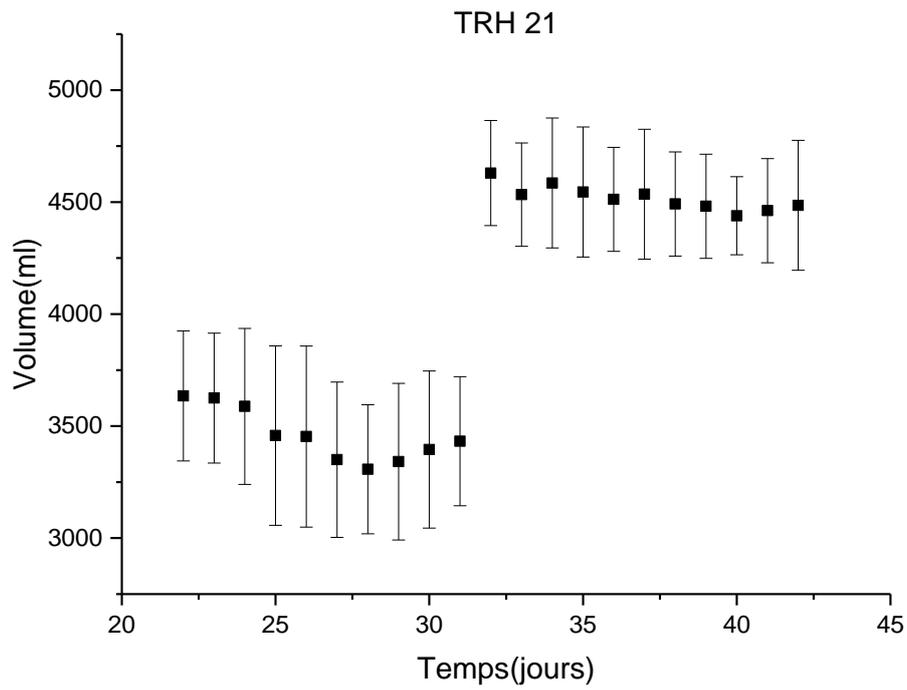


Figure 33: Evolution des volumes de biogaz avec le TRH 21.

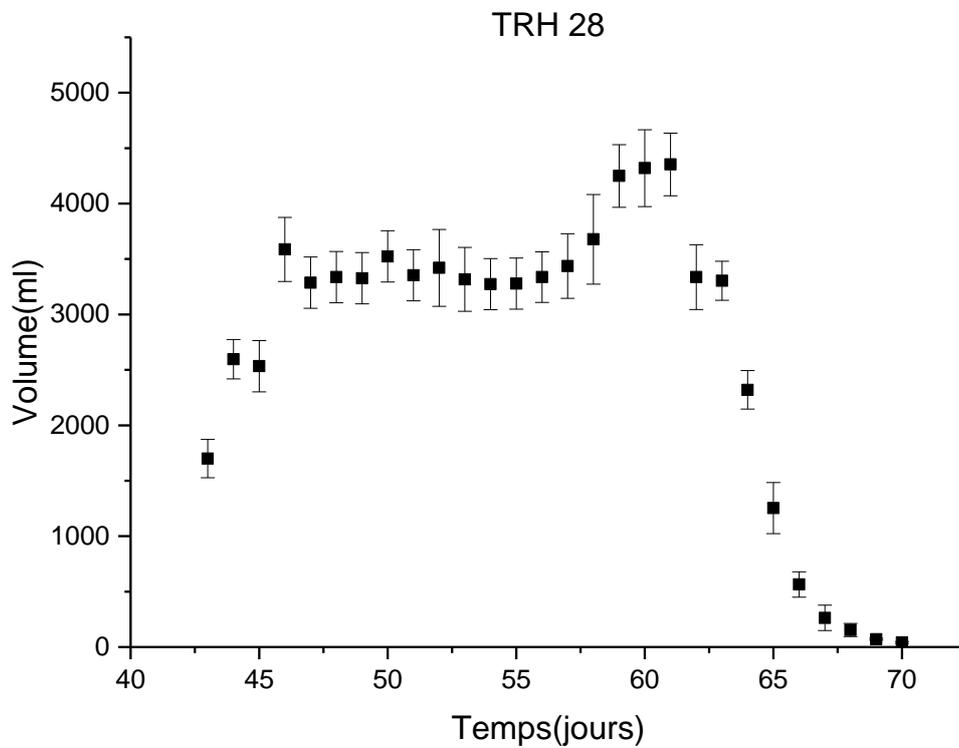


Figure 34: Evolution des volumes de biogaz avec le TRH 28.

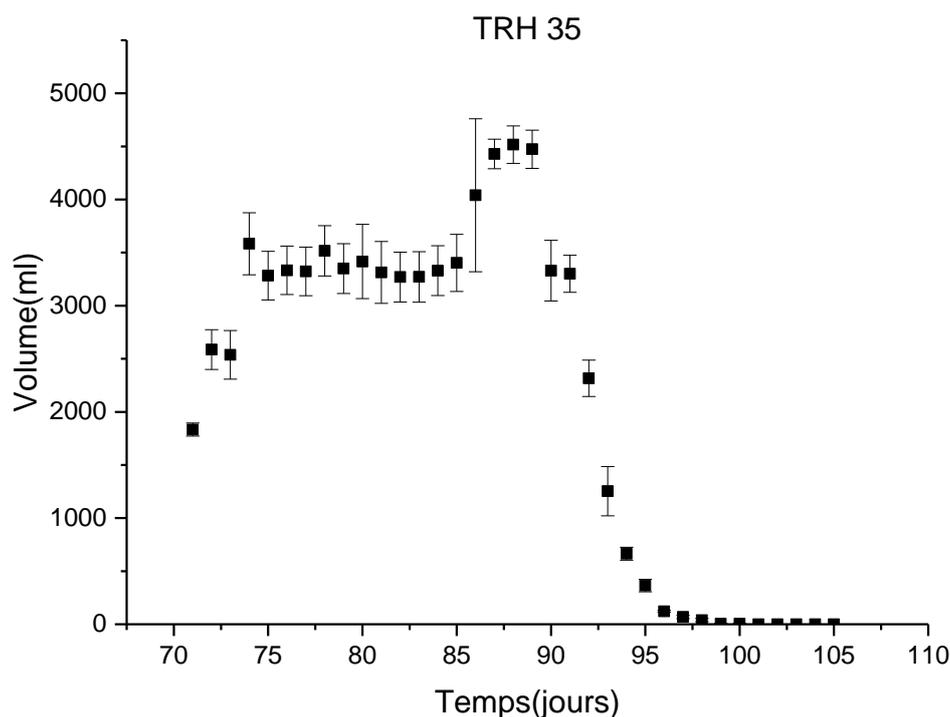


Figure 35: Evolution des volumes de biogaz avec le TRH 35.

D'après les figures 31, 32, 33, 34, 35 pour le TRH 07 le volume de biogaz est de 260ml au maximum pour le septième jour, mais pour le TRH 14 le volume a atteint le 3450ml de biogaz après dix jours de méthanisation, et stabiliser à ces valeurs, presque les même valeurs maximales pour les TRH 21,28 et 35 avec un enregistrement des valeurs de 4500ml de par jour pour le TRH 21 et stabilisation à ces valeurs pendant les dix dernier jours(très bon condition de la méthanisation). Une diminution des volumes de biogaz et CH_4 enregistré avec le TRH 28 et TRH 35 après vingt jours, et devenu nul au vingt-sixième jour pour le TRH 28 et au vingt-cinquième pour le TRH 35 cela est expliqué par l'épuisement de la matière organique et (absence des nutriments), ce rendement est assimilé a qui été signalé par H. Ejhed et all. [104].

VI.1.5. Volume de méthane:

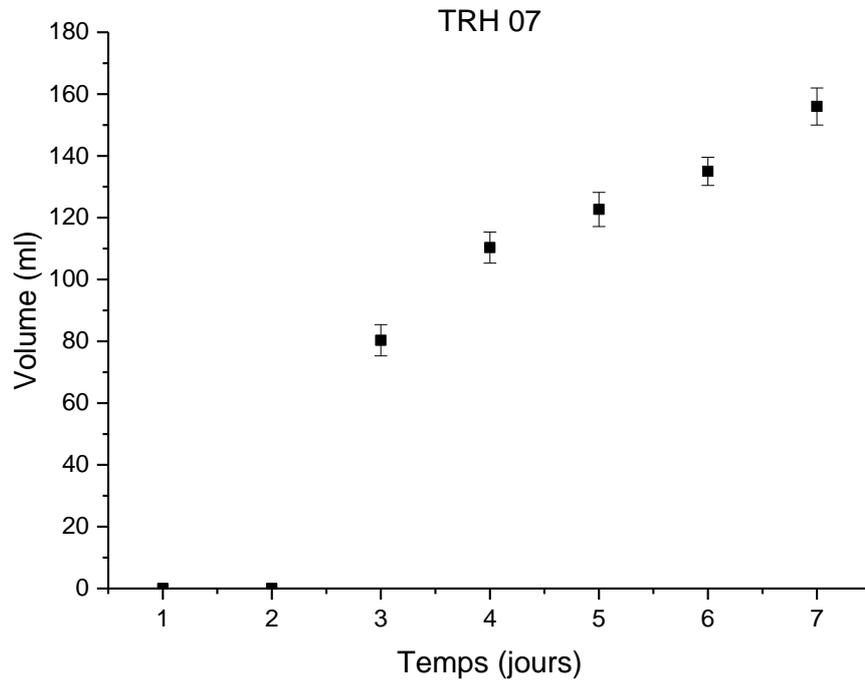


Figure 36: Evolution des volumes de méthane avec le TRH 07.

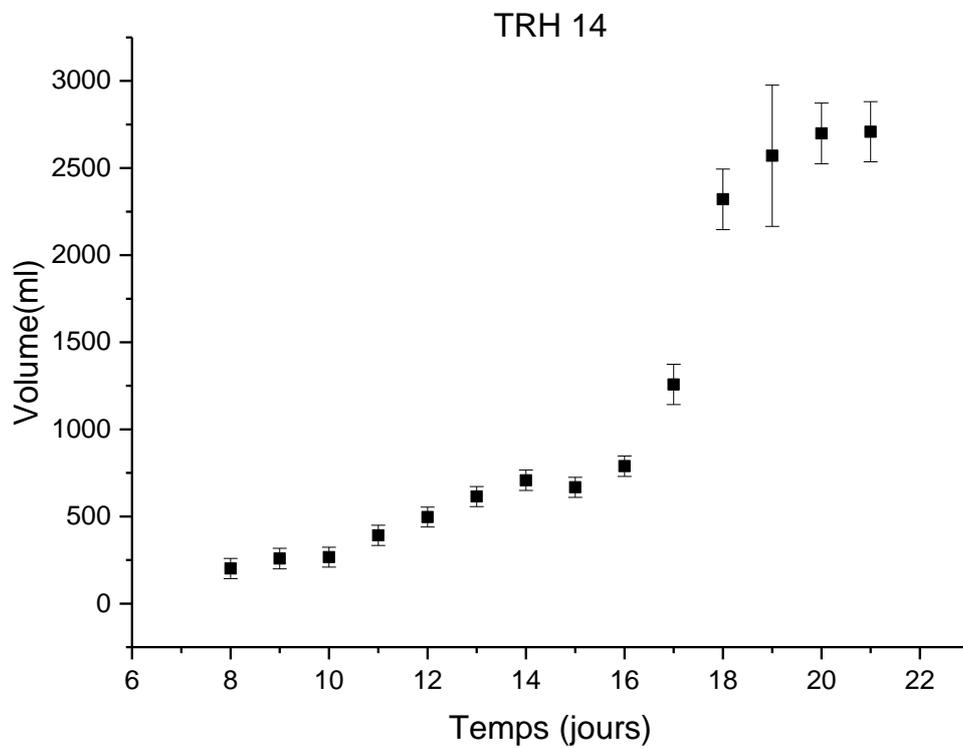


Figure 37: Evolution des volumes de méthane avec le TRH 14.

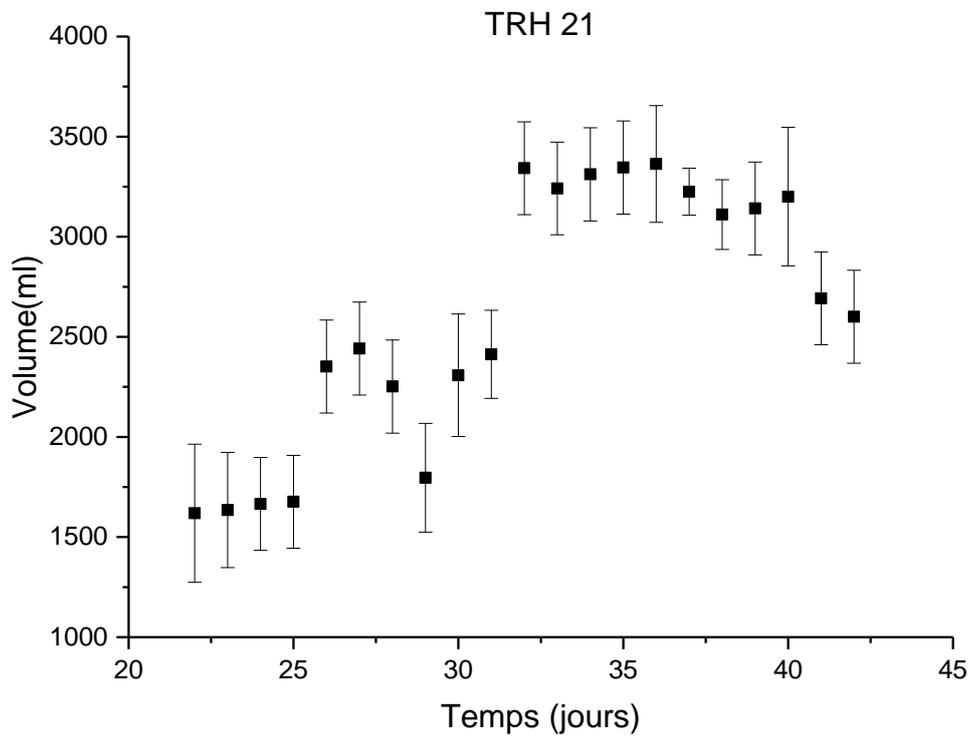


Figure 38: Evolution des volumes de méthane avec le TRH 21.

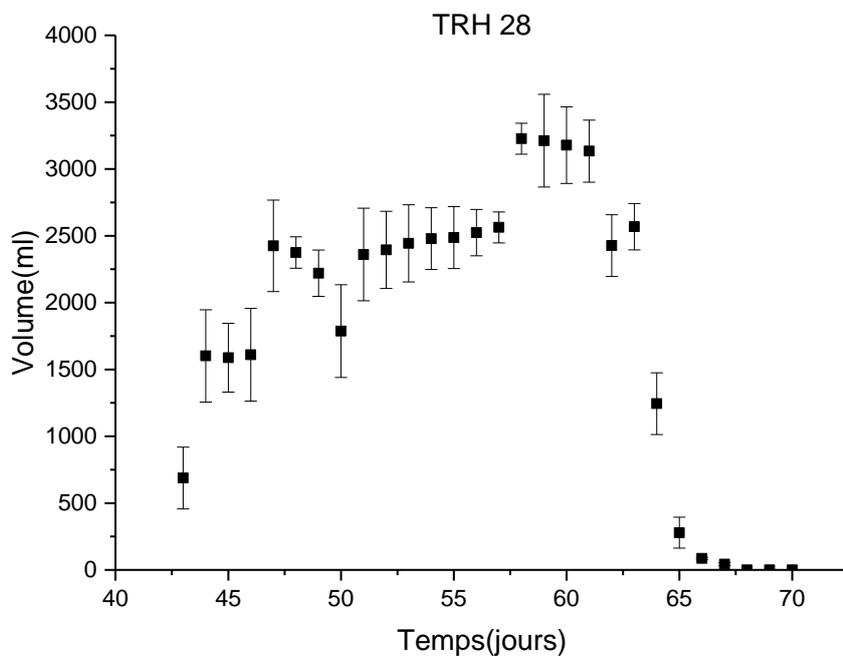


Figure 39: Evolution des volumes de méthane avec le TRH 28.

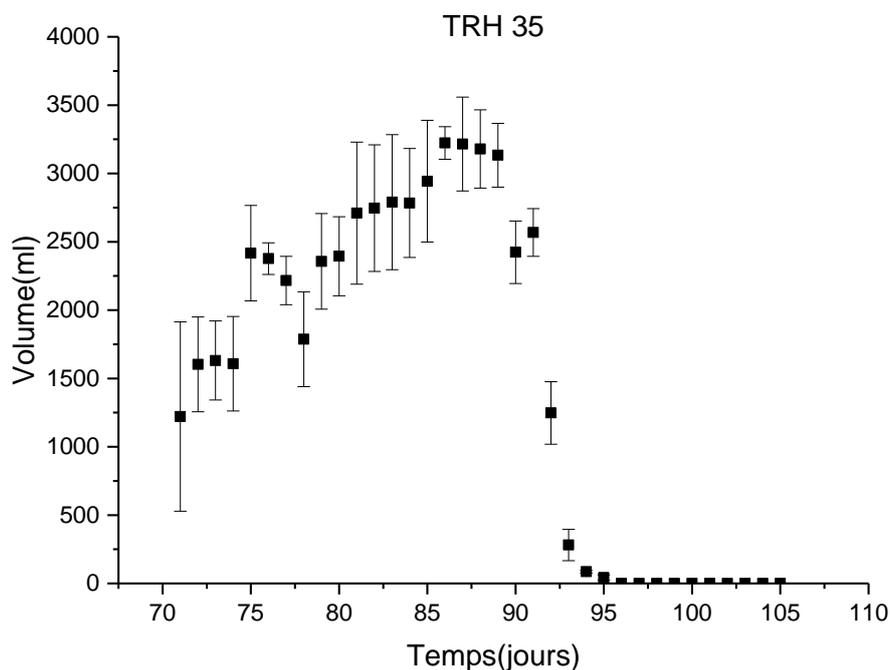


Figure 40: Evolution des volumes de méthane avec le TRH 35.

D'après les figures 36, 37, 38, 39, 40 pour le TRH 07 le volume de CH_4 est de 156 ml au maximum, mais pour le TRH 14 le volume a atteint le 2200ml de CH_4 après dix jours de méthanisation, et stabiliser à ces valeurs, presque les même valeurs maximales pour les TRH 21,28 et 35 avec un enregistrement de valeur de 3210ml de CH_4 par jour pour le TRH 21 et stabilisation à ces valeurs pendant les dix dernier jours(très bon condition de la méthanisation).

VI.1.6. Cumulation des volumes :

Pour connaître la quantité de biogaz et de méthane produite dans le digesteur durant chaque temps de séjour nous cumulons les volumes produits dans chaque expérience.

Le plus grand volume de biogaz et de méthane cumulé avec le TRH 21 et de 37322ml et 29863ml respectivement, ces valeurs reste presque constantes avec les TRH 28 et le TRH 35.Fig.45.

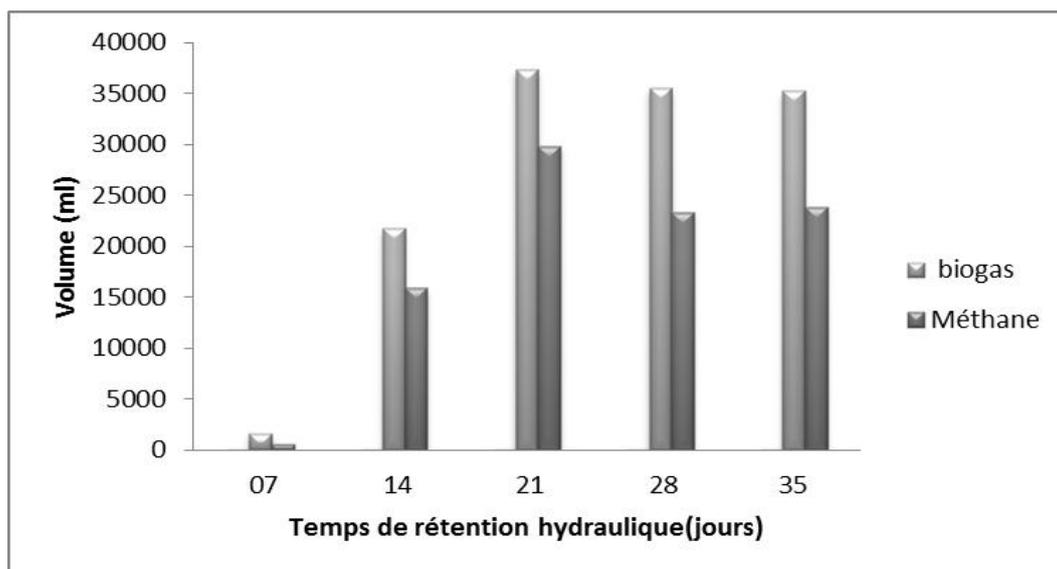


Figure 41: Les cumule des volumes (biogaz et méthane) avec les différents temps des rétentions hydrauliques.

VI.1.7. Caractérisation du substrat après la digestion:

Tableau 15: Caractéristiques du substrat après chaque temps de séjour :

Désignation	pH	Taux de Matière sèche(%)	Taux de Matière organique(%)	DCO final (mgO ₂ /l)
TRH 07	7,06	04,11	88,98	13227,51
TRH 14	7,71	10,49	71,69	16071,43
TRH 21	7,61	7,94	46,09	16927,08
TRH 28	7,45	7,78	45,11	6361,32
TRH 35	7.32	8,14	45,02	4866,18

D'après le tableau 13 la DCOs finale de TRH 07(13227,51 mg/l) est plus importante que la DCOs de premier jour de la digestion anaérobie (9796.44 mg/l) cette augmentation dû au début de la dégradation de substrat qui est constitué majoritairement par des macromolécules (phase d'hydrolyse et acidogénèse) [105].

Même remarque de la DCOs finale Pour le TRH 14 et TRH 21, est atteint son maximum (16927,08mg/l) à la fine de TRH 21 celle-ci est expliquée par la dégradation de la majorité de substrat qui est bien évident par le volume de biogaz produit pendant cette période. Après le TRH 28 la DCOs commence à diminuer est atteint sa valeur minimale à la fin de TRH 35 qui est de l'ordre de 4866,18 mg/l, avec un taux de dégradation de la charge organique de 51,04%.

VI.1.8 Conclusion:

L'étude des différents temps des rétentions hydrauliques sur un digesteur continu de volume réactionnelle de 12L montre que pour une meilleure consommation de matière organique et un rendement maximal de biogaz et également en méthane, il faut un temps de rétention hydraulique pas moins de 21 jours qui a donné le plus grand volume en biogaz (35L) et donné aussi le volume le plus important en CH₄ (23L), et une maximum consommation de matière organique de l'ordre de 51,4%.

Sur cette base, et pour gagner de temps nous vous recommandons d'une alimentation de digesteur continuer à l'échelle pilote ou semi-pilote, après un temps de séjour entre 21 et 28 jours, pour une exploitation énergétique optimum à ce type de déchets.

VI.2.Optimisation du taux de charge organique moyenne:

L'objectif de ce travail est l'optimisation du taux de charge organique moyenne des déchets ménagé par la digestion anaérobie, et de connaître l'effet des différentes charges organiques moyennes (COM) sur la production de biogaz, cela pour but d'exploiter ces résultats à l'échelle pilote.

VI.2.1.Caractéristiques initiales du substrat:

Les caractéristiques initiales du substrat avant chaque expérience sont présentées dans le tableau 14.

Tableau 16: Caractéristiques initiale du l'inoculum et du substrat avant chaque 'expérience

Charge organique (g ms/ L/J)	pH	Taux d'humidité (%)	Taux de Matière sèche (%)	Taux de Matière organique (%)	Demande chimique en oxygène soluble (DCOs) (g/l)	Taux de protéine (%)	Taux de sucre (%)	Taux de fibre (%)
Inoculum	5,81	78,25	21,75	94,01	21,74	11.66	14.56	11,09
1	6,92	88,31	11,7	94,06	13,2	16,61	13,35	5,33
1,5	6,61	86,96	13,4	94,21	15,07	16.66	13,51	8,76
2	6,32	86,04	15,8	96,31	14,5	17,83	15,42	10,05
3	6,12	79,56	16,23	97,2	15,23	19,33	15,66	12,23
4	5,88	81,89	17,02	97,4	15,63	20,66	17,02	14,74

VI.2.2.Le pH

Pour les courbes de suivi de pH (figs 42, 43, 44, 45, 46) nous constatons pour les cinq COMs une acidification du milieu dans la première semaine, cela est dû à la décomposition de la matière organique et la production des AGV. Après cette période le pH commence à augmenter ver la neutralité, ce qui expliqué la consommation des AGV et la production des produits intermédiaires pour la digestion anaérobie. [106]

Après le dixième jour il y a une stabilisation de pH entre 7 et 7,5(valeur optimale pour la digestion anaérobie) cette stabilité est expliquée par l'épuisement du substrat.

Pour COM 3 et 4, le pH n'a pas dépassé le 7 et 6 respectivement pendant les deux essais, expliqué par l'accumulation des acides gras dans la plupart du temps.

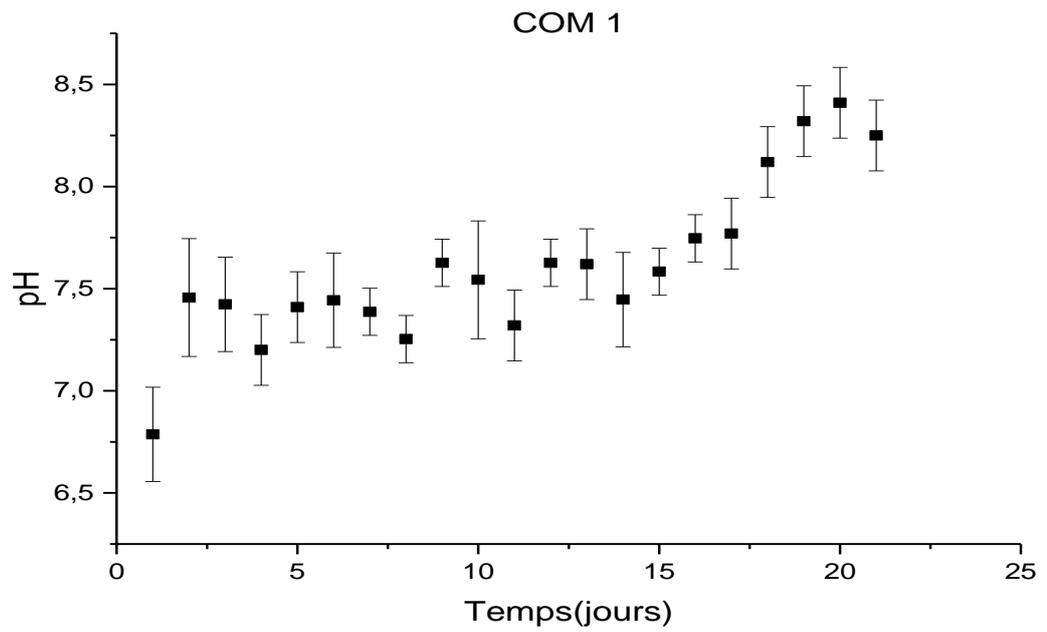


Figure 42: Evolution du pH en fonction de temps avec COM 1.

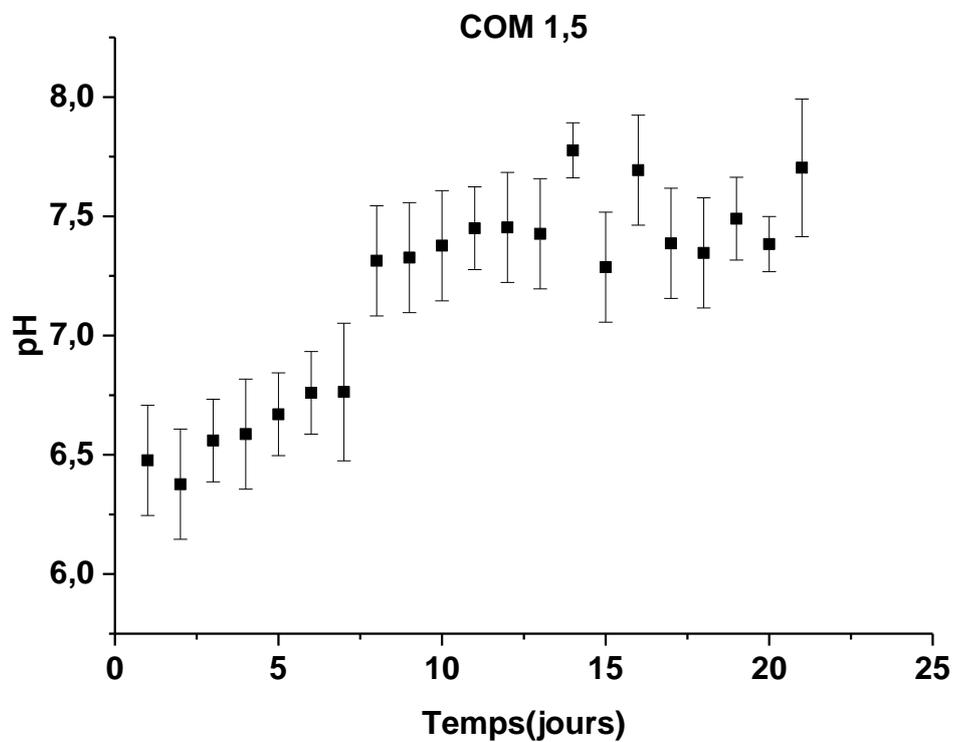


Figure 43: Evolution du pH en fonction de temps avec COM 1,5.

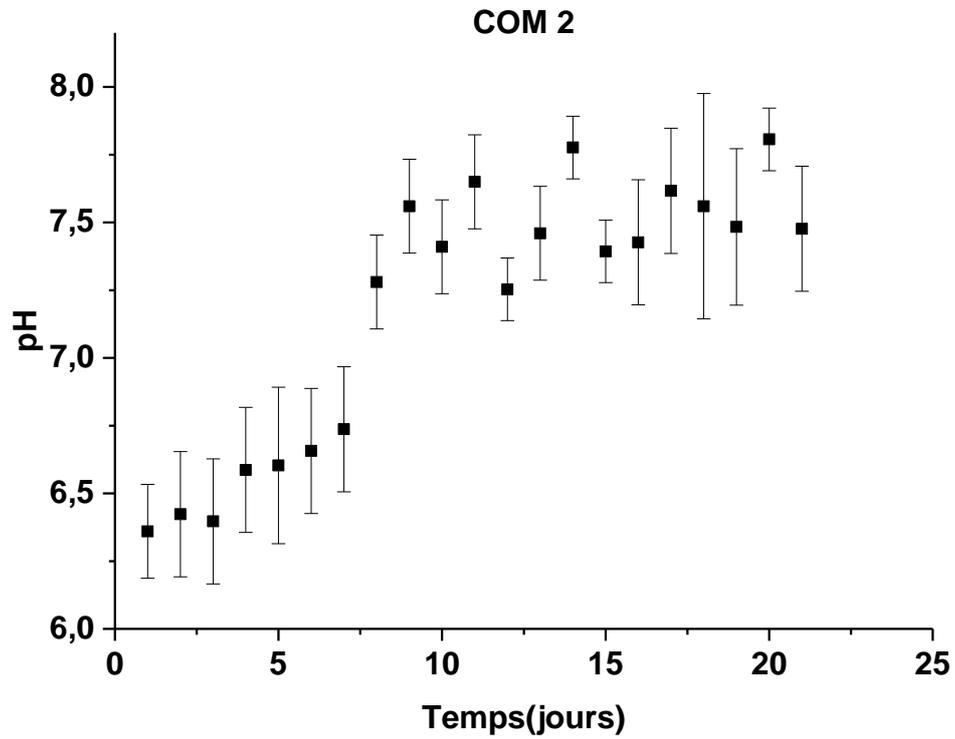


Figure 44: Evolution du pH en fonction de temps avec COM 2.

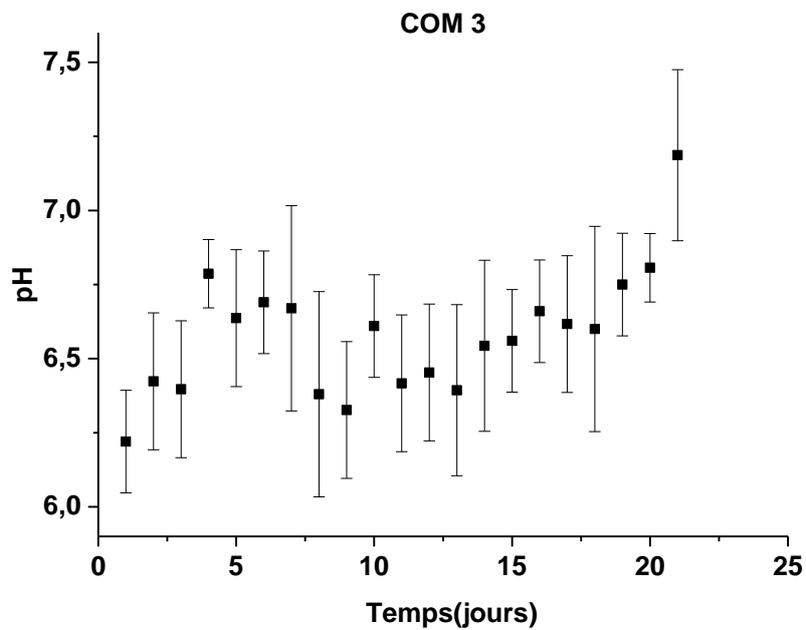


Figure 45: Evolution du pH en fonction de temps avec COM 3.

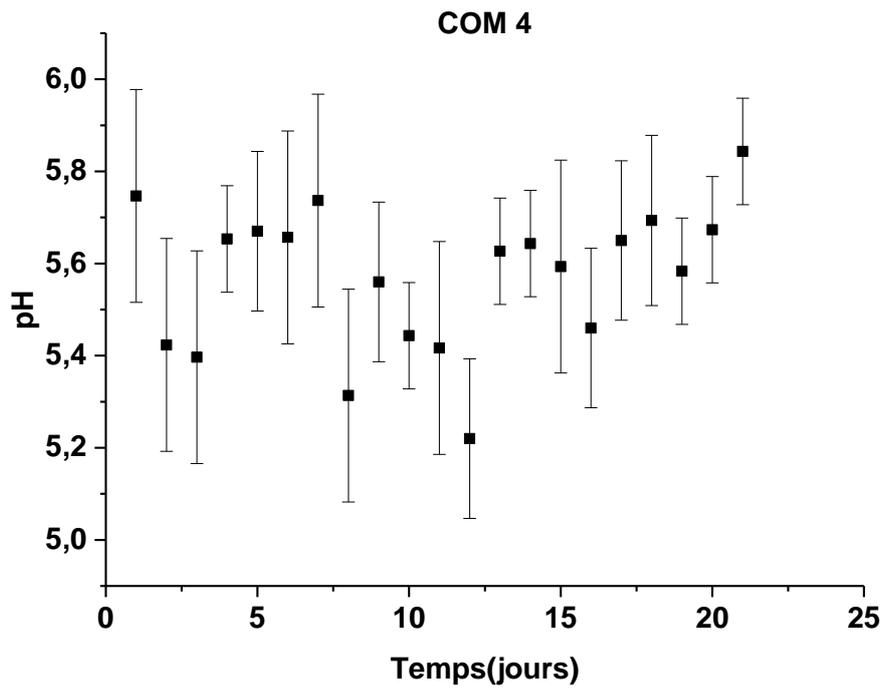


Figure 46: Evolution du pH en fonction de temps avec COM 4.

VI.2.3.Rapport AGV/TAC

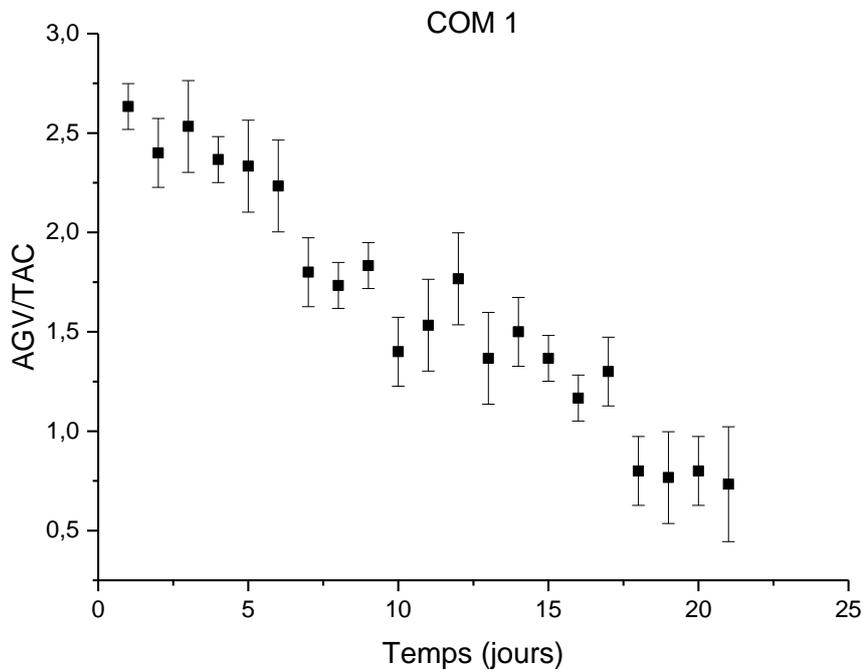


Figure 47: Evolution du rapport AGV/TAC en fonction de temps avec COM 1.

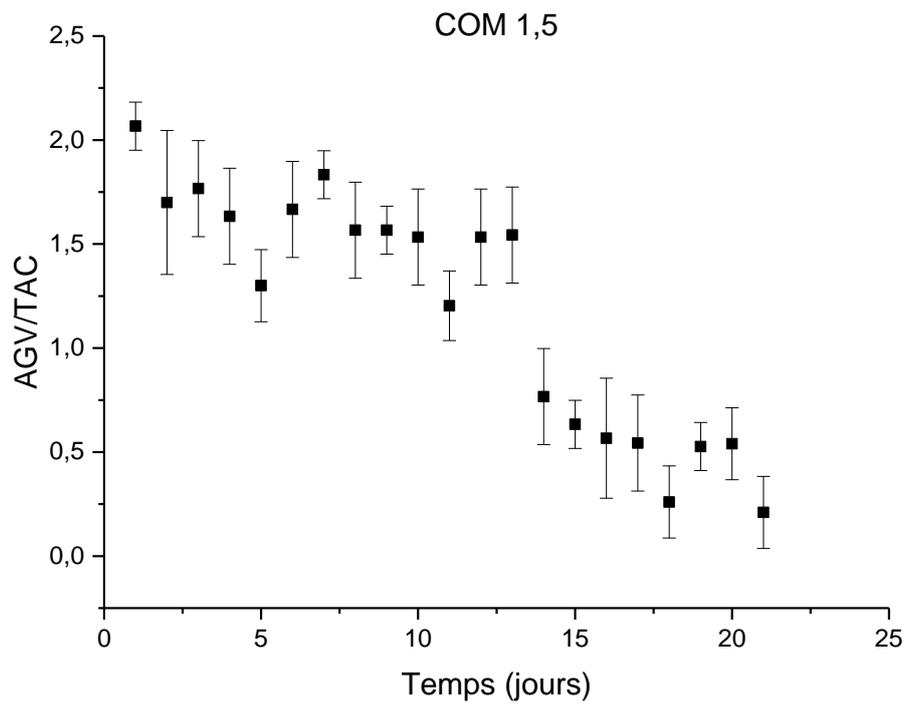


Figure 48: Evolution du rapport AGV/TAC en fonction de temps avec COM 1,5.

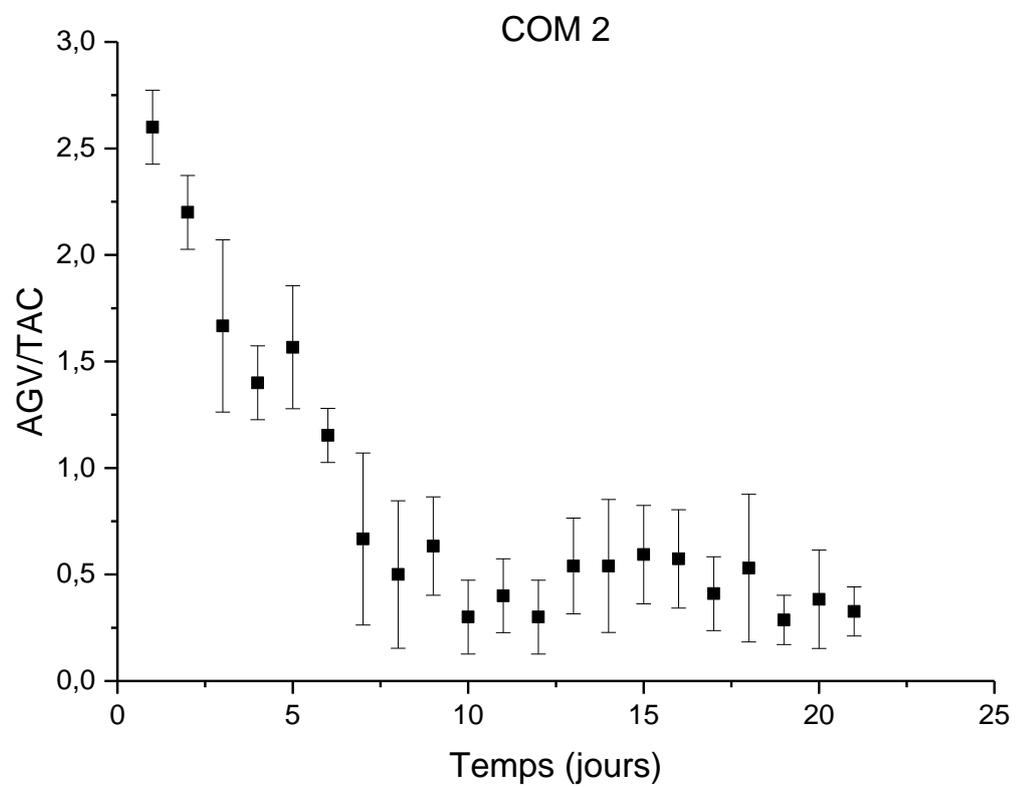


Figure 49: Evolution du rapport AGV/TAC en fonction de temps avec COM 2.

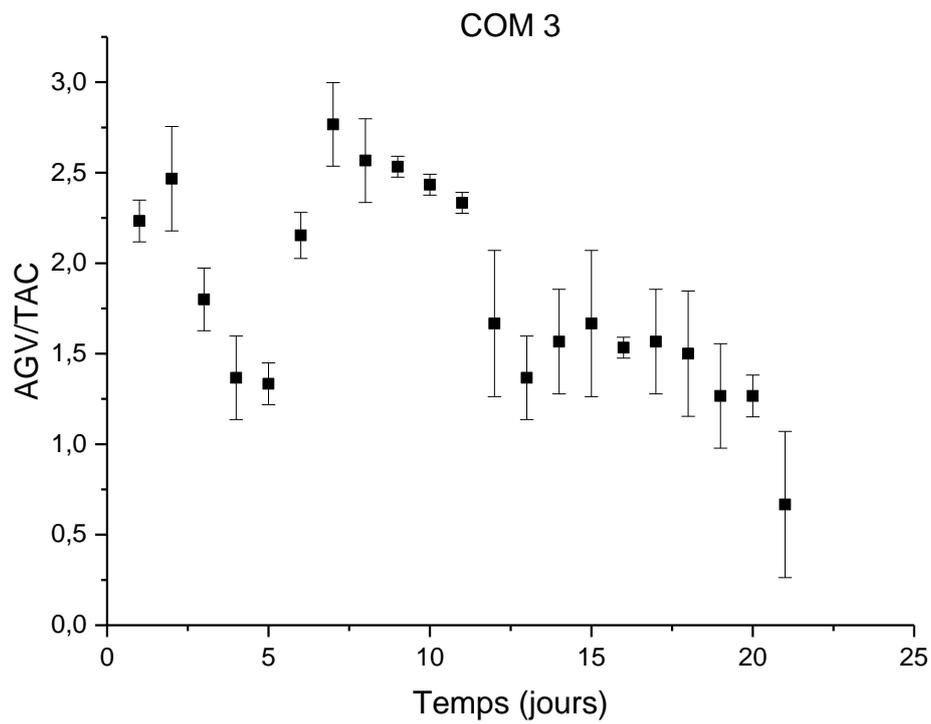


Figure 50: Evolution du rapport AGV/TAC en fonction de temps avec COM 3.

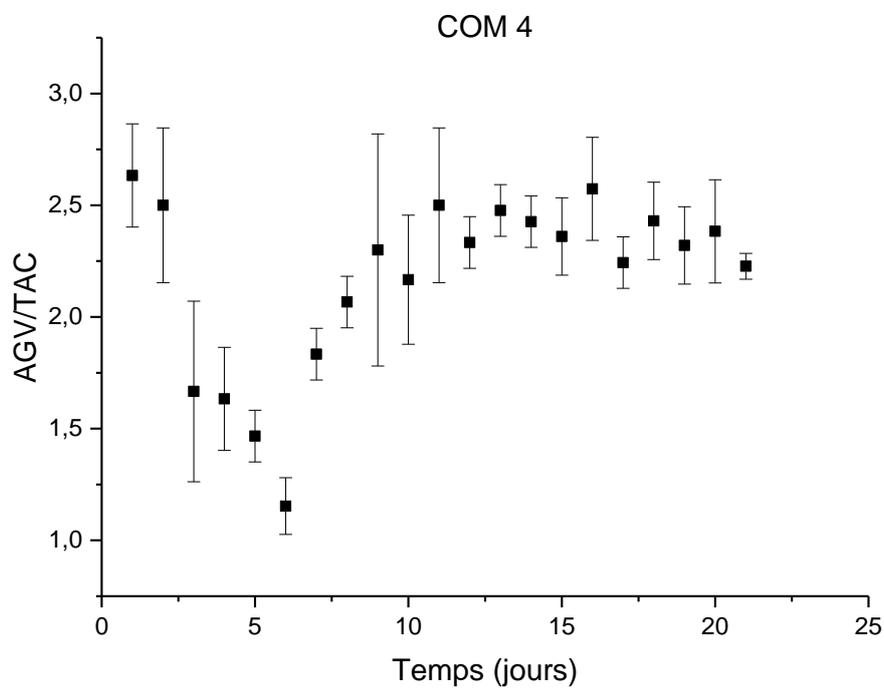


Figure 51: Evolution du rapport AGV/TAC en fonction de temps avec COM 4.

Les figures 47, 48, 49, 50, 51 montre que avec les COMs 1;3;4 le rapport AGV/TAC varié entre 2,7 et 0,9 ce que expliqué par la présentation des quantités importantes d'AGV accumulé, leurs accumulation influe négativement sur le déroulement de la méthanisation, même commencement de rapport AGV/TAC pour le COMs 1; 1,5 mais dans ce cas avec des valeurs moins de 0.5 après le dixième jour pour le COM 2 et le quinzième jour pour l'COM 1,5 expliqué par le bon déroulement du processus de méthanisation.

VI.2.4. Volume de biogaz:

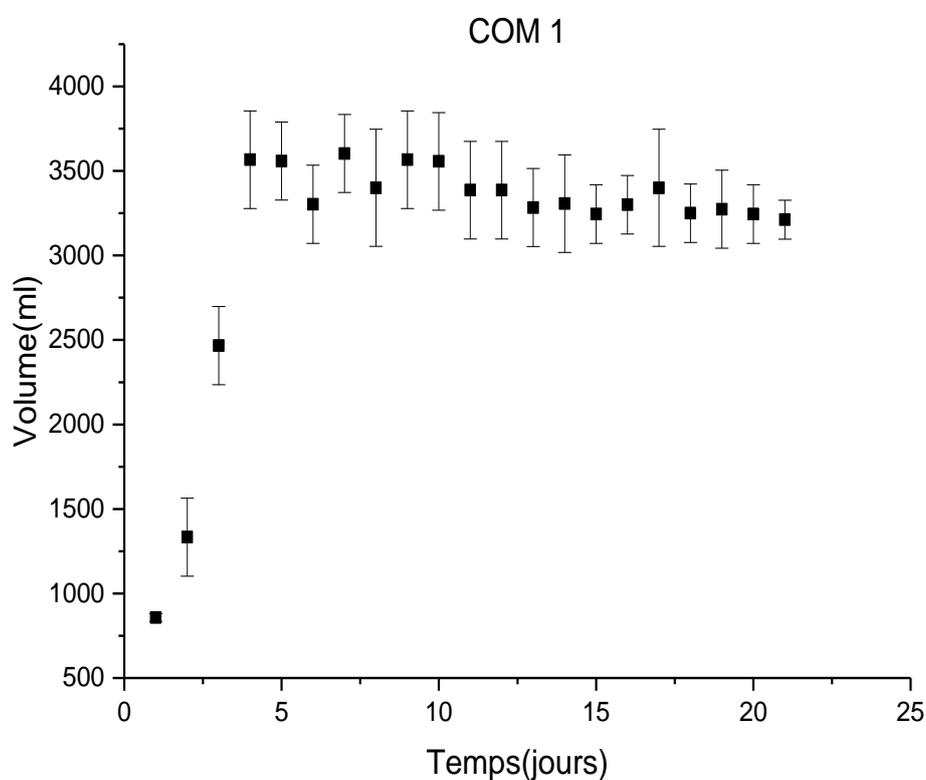


Figure 52: Production des volumes de biogaz en fonction de temps avec COM 1.

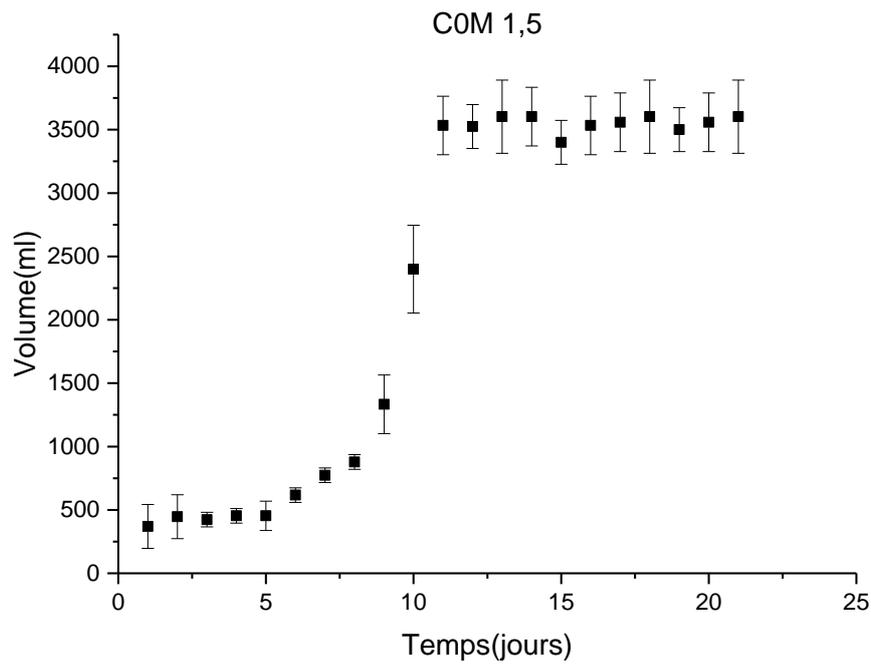


Figure 53: Production des volumes de biogaz en fonction de temps avec COM 1,5.

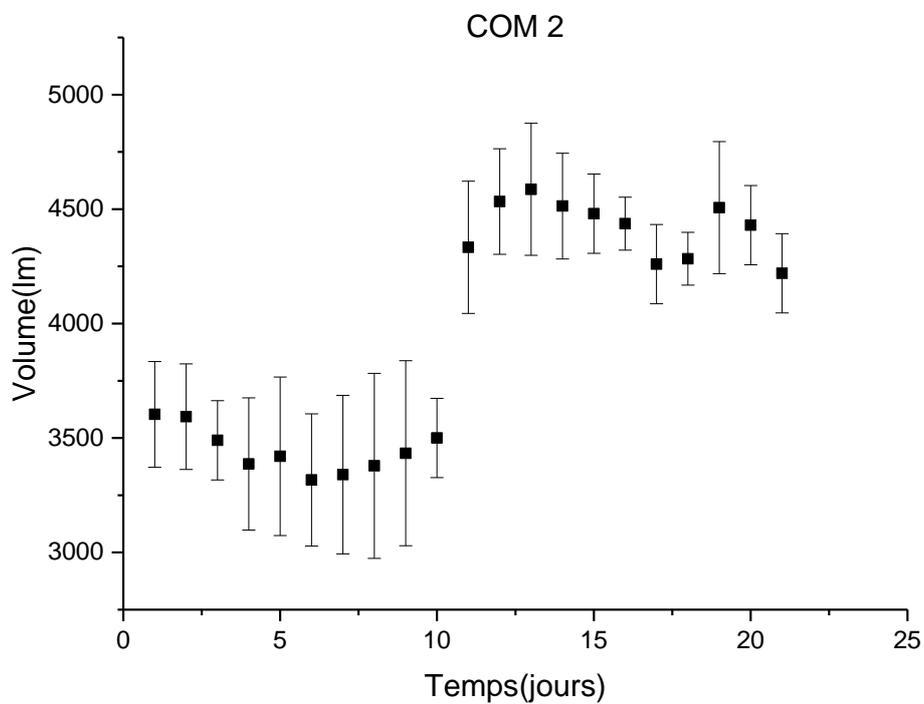


Figure 54: Production des volumes de biogaz en fonction de temps avec COM 2.

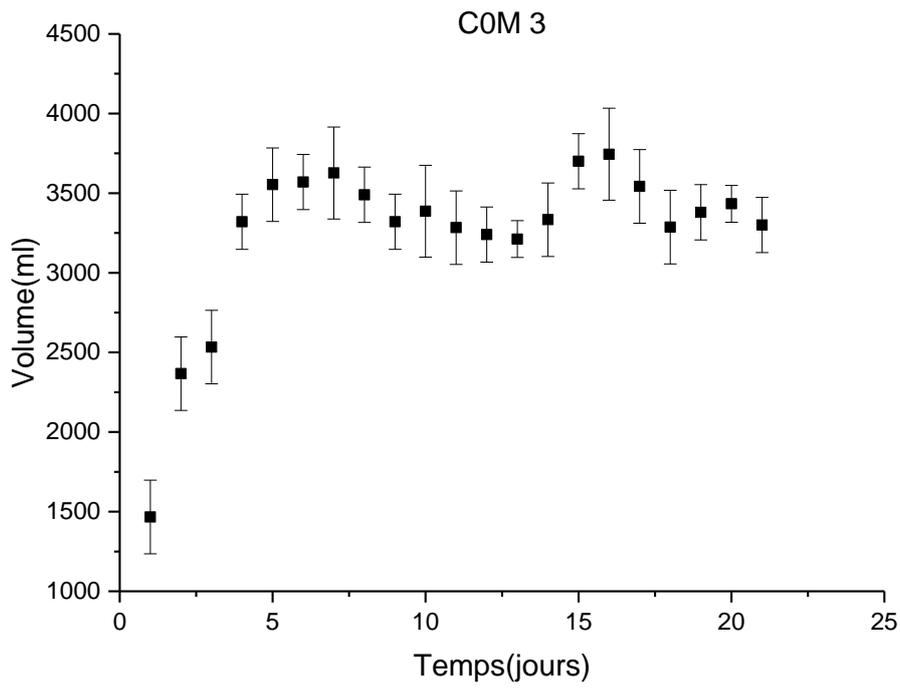


Figure 55: Production des volumes de biogaz en fonction de temps avec COM 3.

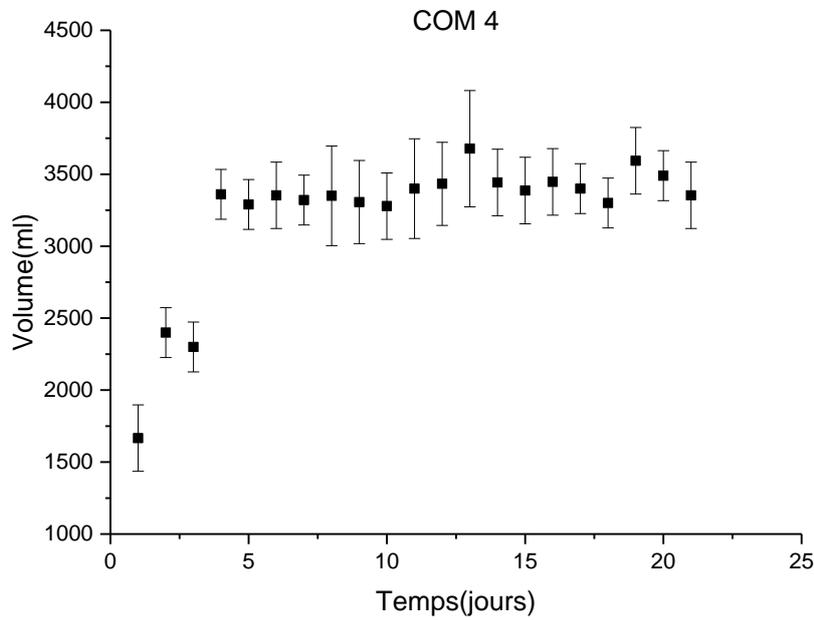


Figure 56: Production des volumes de biogaz en fonction de temps avec COM 4.

D'après les figures 52, 53, 54, 55, 56 et pour COM 1 le volume de biogaz est de 3500ml au maximum pour le septième jour, même remarque pour COM 1,5 mais après le dixième jour de l'expérience, pour COM 2 le volume a atteint le 4500ml de biogaz après dix jours de méthanisation, et stabiliser à ce valeur jusqu'à la fin de l'expérience, cela est expliqué par l'épuisement de la matière organique.

Et pour les COMs 3 et 4 le volume de biogaz est atteint le 4250ml au maximum et 2125ml de CH₄ au maximum après 16jours pour COM 4, et après 20jours pour COM 3.

La diminution des volumes de biogaz avec les COMs 1 et 1,5 est expliqué par la charge organique est insuffisante pour une bonne fermentation, au contraire pour les COMs 3 et 4 où la charge organique est en excès.

VI.2.5. Volume de méthane(CH₄):

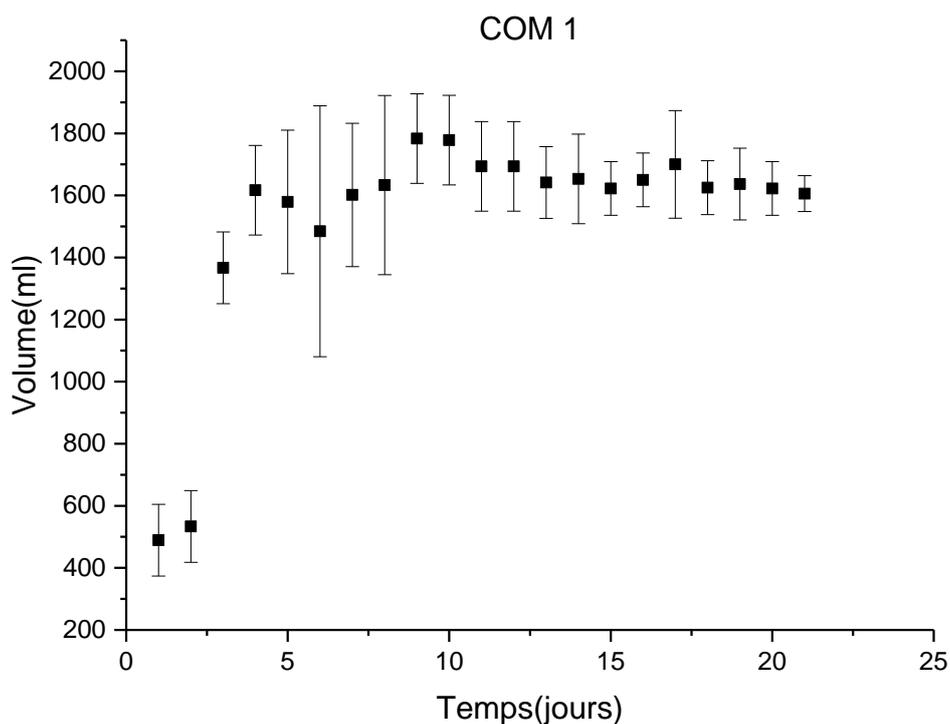


Figure 57: Production des volumes de méthane en fonction de temps avec COM 1.

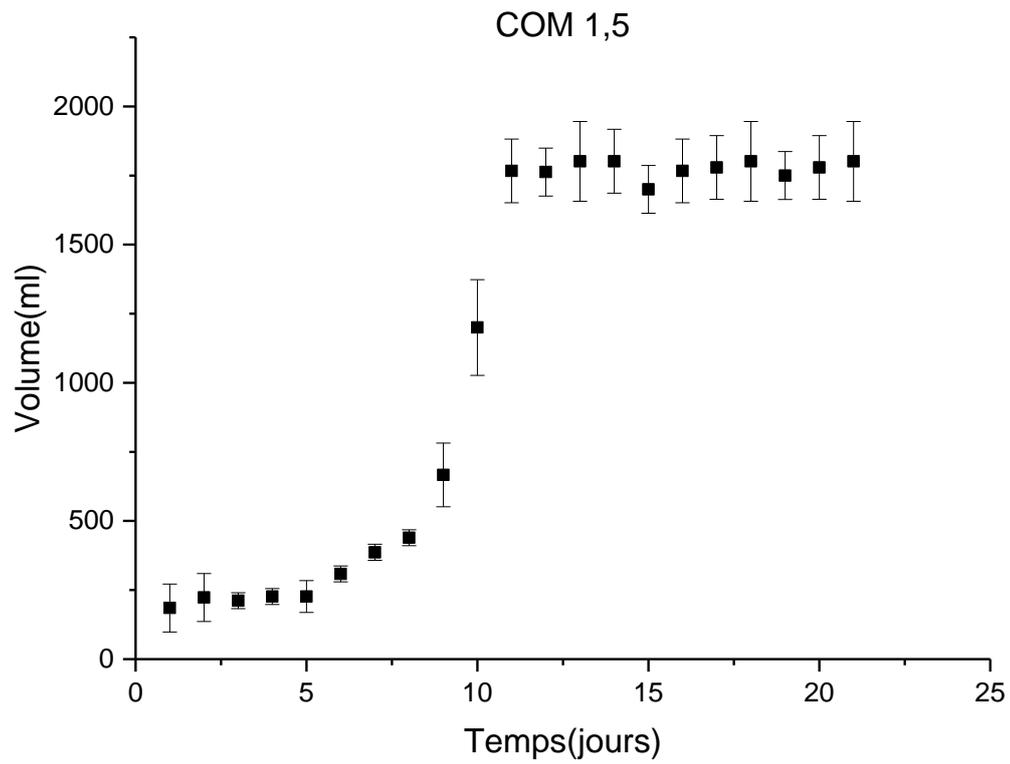


Figure 58: Production des volumes de méthane en fonction de temps avec COM 1,5.

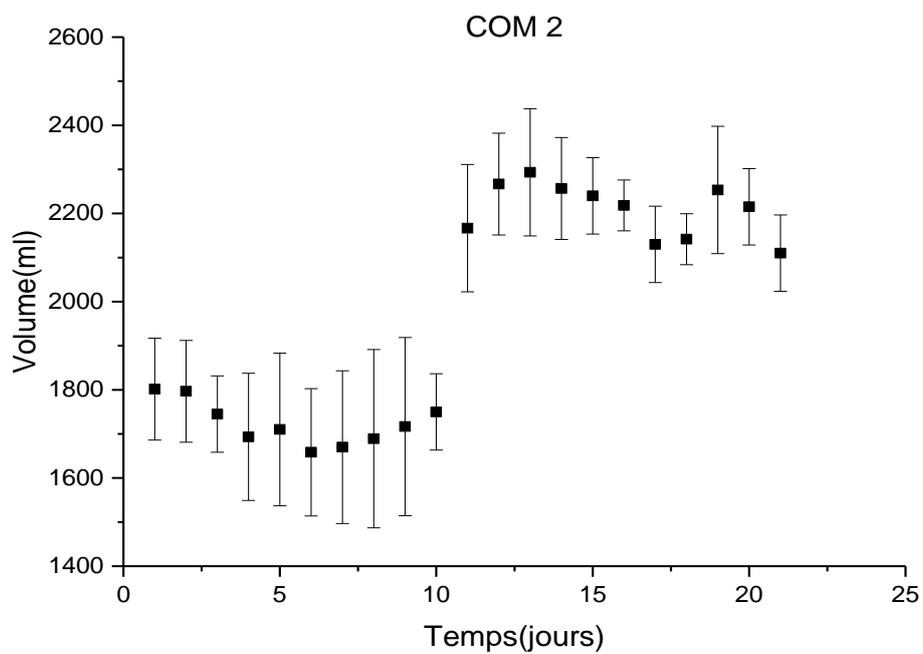


Figure 59: Production des volumes de méthane en fonction de temps avec COM 2.

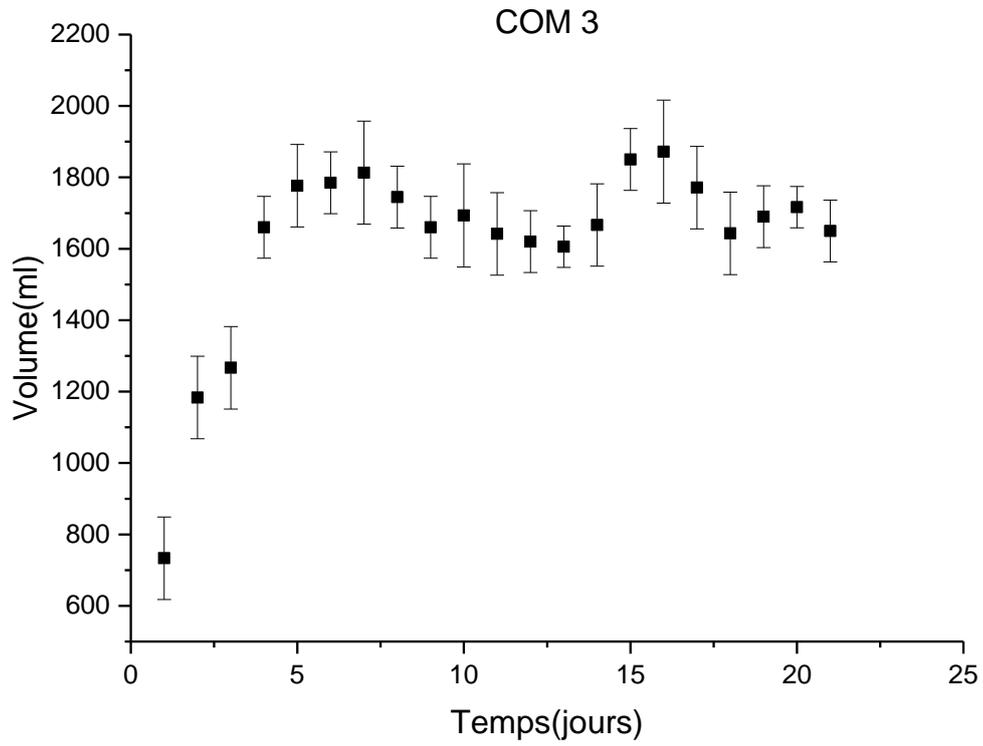


Figure 60: Production des volumes de méthane en fonction de temps avec COM 3.

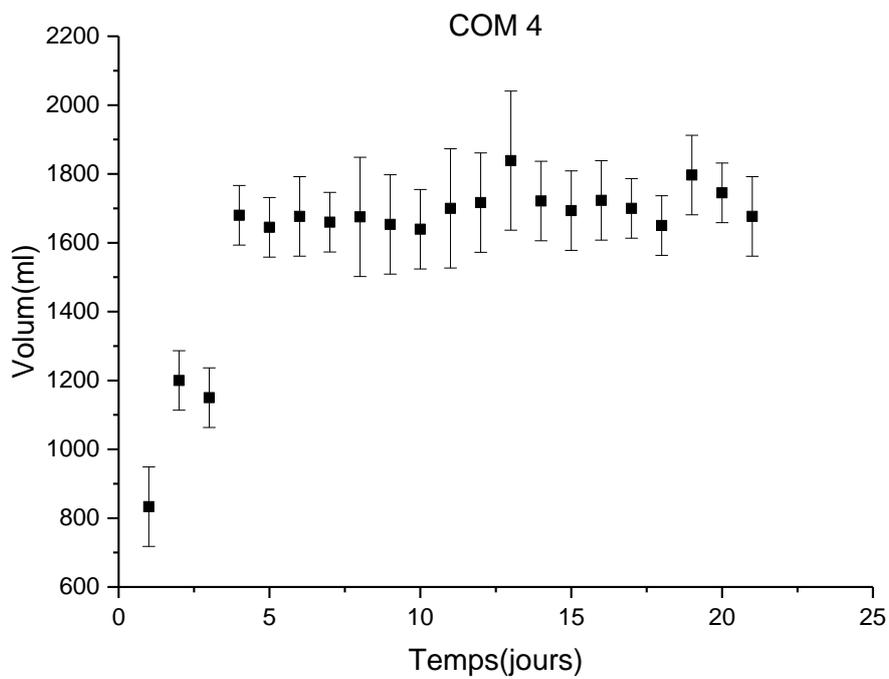


Figure 61: Production des volumes de méthane en fonction de temps avec COM 4.

D'après les figures 57, 58, 59, 60, 61 et pour COM 1 le volume CH₄ est de 1550 ml au maximum, même remarque pour COM 1,5 mais après le dixième jour de l'expérience, pour COM 2 le volume a atteint le 2550ml de CH₄ après dix jours de méthanisation, et stabiliser à ces valeurs jusqu'à la fin de l'expérience, cela est expliqué par l'épuisement de la matière organique.

Et pour les COMs 3 et 4 le volume est 2125ml de CH₄ au maximum après 16jours pour COM 4, et après 20jours pour COM 3.

La diminution des volumes de méthane avec les COMs 1 et 1,5 est expliqué par la charge organique est insuffisante pour une bonne fermentation, au contraire pour les COMs 3 et 4 où la charge organique est en excès (fibre en excès).

VI.2.6.Cumulation des volumes:

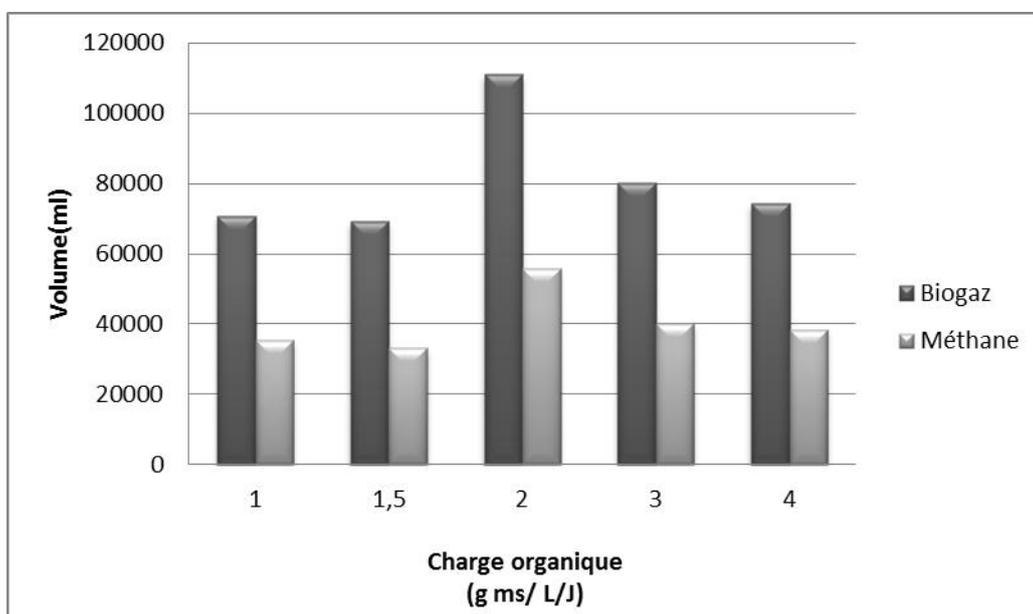


Figure 62: Volumes de biogaz et de méthane produit cumuler après chaque expérience.

Pour connaître la quantité de biogaz et de méthane produite dans le digesteur durant chaque pour les cinq COMs, nous accumulons les volumes produits dans chaque expériences.

Le plus grand volume de biogaz et de méthane cumulé avec l'COM 2, est 111060ml et 55680ml successivement.

VI.2.7. Caractérisation du substrat après la digestion:

Tableau 17: Caractéristiques finale du substrat après chaque expérience

Charge organique (g ms/ L/J)	pH	Taux d'humidité (%)	Taux de Matière sèche (%)	Taux de Matière organique (%)	Demande chimique en oxygène soluble (DCOs) (g/l)	Taux de protéine (%)	Taux de sucre (%)	Taux de fibre (%)
1	8,35	89,56	10,02	62,66	16,29	10,01	7,44	4,89
1,5	7,87	91,83	09,04	59,53	17,22	11,33	7,56	7,32
2	7,61	92,06	7,94	41,09	20,12	11,56	7,40	7,78
3	7,02	87,59	11,66	71,31	5,52	19,15	15,41	12,11
4	5,91	88,98	12,31	72,22	4,91	20,21	17,56	14,08

D'après le Tableau 15 la DCOs finale de COM 1 (16.29 g/l) est plus importante que la DCOs de premier jour de la digestion anaérobie (13,2 g/l) cette augmentation dû au début de la dégradation de substrat qui est constitué majoritairement par des macromolécules (phase d'hydrolyse et acidogénèse).

Même remarque de la DCOs finale Pour COM 1,5 et COM 2, et atteint son maximum (20,12mg/l) à la fine de COM 2 et la diminution des taux de protéine de sucre et de fibre, celle-ci est expliquée par la dégradation de la majorité de substrat qui est bien évident par le volume de biogaz produit.

Après l' COM 3 la DCOs commence à diminuer et atteint sa valeur minimale à la fine de COM 4 qui est de l'ordre de 4,91 g/l, avec un taux de dégradation de la charge organique très faible.

Et même les valeurs de la composition chimique de substrat (taux de protéine, taux de sucre, taux de fibre) ne sont pas changer après la digestion pour les COM 3 et COM 4 qui est indiqué l'inefficacité de la digestion anaérobie.

VI.2.8. Conclusion:

L'étude des différent charge organique moyennes de substrat pour l'alimentation d' un digesteur continu de volume réactionnelle de 12L montre que, pour une meilleur consommation de matière organique et un rendement maximale de biogaz et également en méthane, il faut une charge organique moyenne de 2 g ms/ L/J qu' est a donné le plus

grande volume en biogaz (111L) et donné aussi le volume le plus importante en CH_4 (55,7L), et une maximum consommation de matière organique de l'ordre de 55,22%. Le taux élevé de COM d'ordre de 3et 4 provoquer diminution de pH et l'accumulation de fibre qu'est empêché la digestion anaérobique et la production de biogaz.

Sur cette base, nous vous recommandons d'une alimentation de digesteur continuer à l'échelle pilote ou semi-pilote, avec une charge organique moyenne de 2 g ms/L/J, pour une exploitation énergétique optimum à ce type de déchets.

VI.3. Démarrage de digesteur pilote:

A l'échelle pilote on exploitant les résultats trouvés dans les expériences précédentes, il s'agit d'un digesteur d'un volume de 4m³ le substrat utilisé est les déchets d'abattoirs de la ville d'Adrar.

VI.3.1 Caractérisation du substrat utilisé :

Nous avons alimenté le digesteur par 320 kg de déchets d'abattoirs de la ville d'Adrar (sud-ouest de l'Algérie), les caractéristiques de ces déchets sont notées dans le tableau suivant :

Tableau18: Caractéristiques du substrat avant le lancement d'expérience.

Paramètre	Unites	Valeur
pH		6,92
Taux d'humidité	%	77
Taux de Matière sèche	%	23
Taux de Matière organique	%	98
Demande chimique en oxygène(DCO)	Mg d'O ₂ /l	1523
Germes totaux	Germes / ml	2 × 10 ⁶
Coliformes fécaux	Germes / ml	520
Streptocoques fécaux	Germes / ml	265
Staphylocoques	Germes/ ml	400

VI.3.2 Le pH:

Comme le montre la figure 63, le pH dans la digestion était compris entre 6,3 et 7,8, après le 15^{em} jour de la digestion les valeurs de pH rester dans la plage de 7- 7,8 qu'une plage idéale pour la digestion anaérobie avec une bonne activité microbienne et toutes les phases de digestion anaérobie ont été attendues.

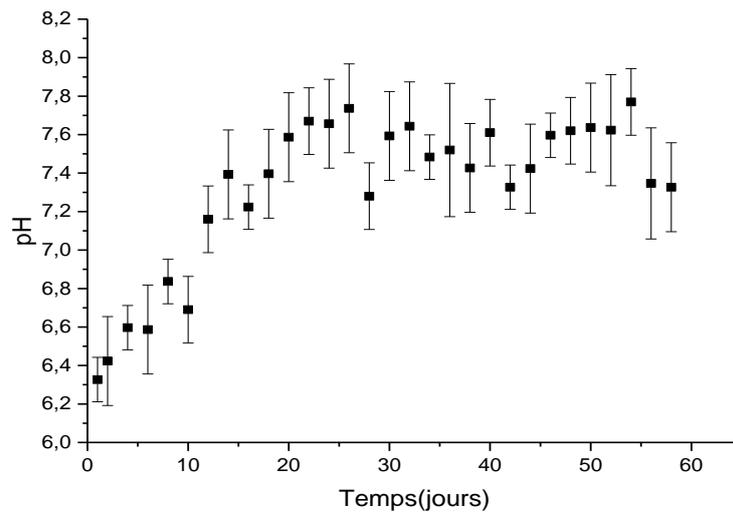


Figure 63: Evolution de pH en fonction du temps.

VI.3.3 La Demande chimique en oxygène(DCO):

La figure 64 montre les concentrations de DCO. Les valeurs de la DCO ont été élevées dans les 20 premiers jours, ce qui a été expliqué par la dégradation de la matière organique par les bactéries dans la phase d'acidification de l'hydrolyse et l'acétogénèse [106].

Après 20 jours, la date du début de la phase anaérobie, nous avons constaté une diminution progressive de la concentration de DCO qui était due à la transformation des produits de dernière étape en biogaz.

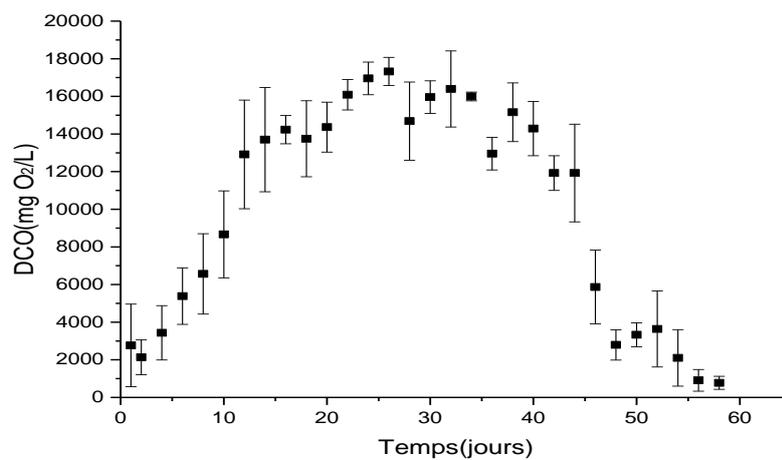


Figure 64: Evolution de la DCO en fonction du temps.

VI.3.4 Le volume de biogaz et de méthane:

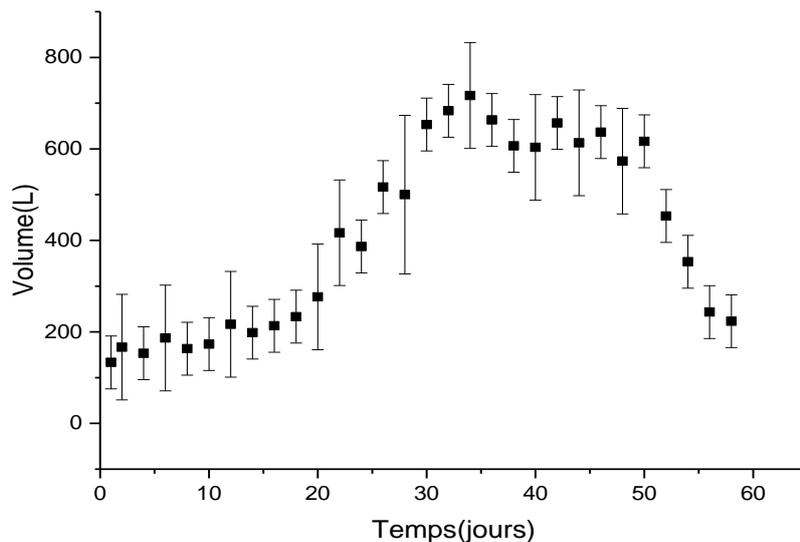


Figure 65: Variation de volume de biogaz.

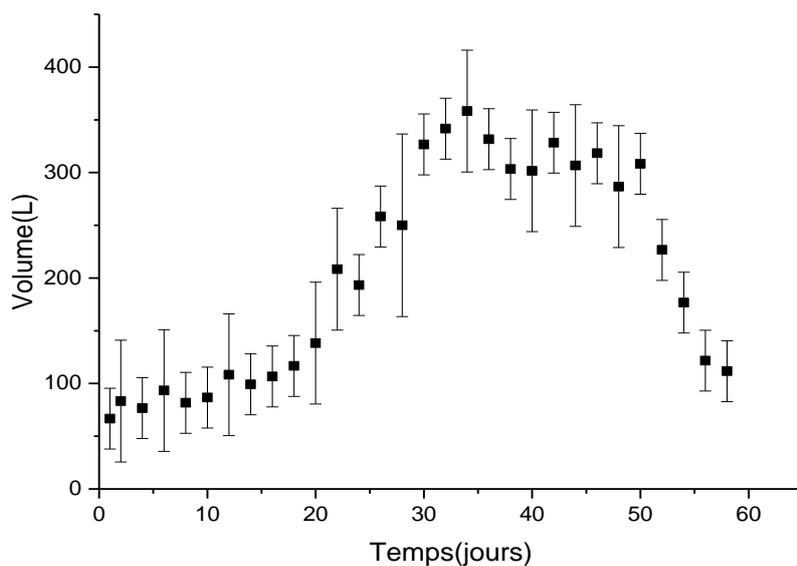


Figure 66: Variation de volume de méthane.

La variation de volume du biogaz et de méthane a été illustrée dans les figure 65 et 66, une augmentation initiale de la production de biogaz, suivie d'une diminution, est typiquement observée dans le procédé de la digestion anaérobique (une augmentation significative de la pression a été enregistrée au-delà du 17^eme jour), le biogaz produit devient combustible à

partir du 15^{ème} jour (pourcentage de méthane supérieur à 45%) à partir du 50^{ème} jour, le volume diminué en raison d'une consommation totale de substrat.

VI.3.5 Variation du Titre Alcalimétrique Complet (TAC) :

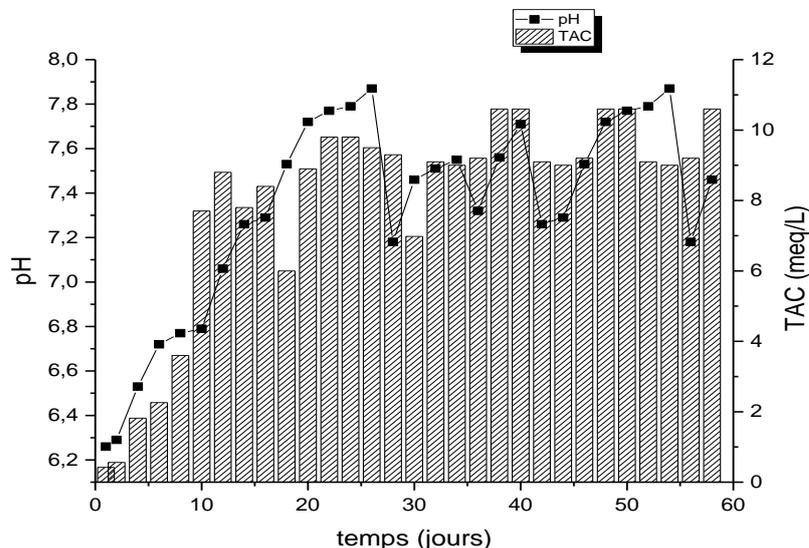


Figure 67: Variation de pH et TAC pendant la digestion.

La figure 67 représente la variation du pH et TAC pendant la digestion anaérobie. Constatant que les valeurs du TAC durant toute l'expérience ont été élevées, ce qui a contribué au maintien des valeurs de pH dans la plage favorable pour le développement des bactéries méthanogènes. Ce qui a conduit au bon déroulement de la digestion anaérobie et la production du biogaz [107].

VI.3.6 Inflammabilité du biogaz:

La production du gaz étant mise en évidence, nous avons eu le souci de déterminer la qualité de ce biogaz. Nous sommes basés sur la littérature qui indique qu'un taux de 45% de méthane est suffisant pour une combustion du biogaz produit lors du processus d'une digestion anaérobie, Nous avons arrivé à une production journalière en biogaz de 197,75L/J.

Les tentatives, de brûler le biogaz produit, n'ont été satisfaisantes qu'à partir des onzièmes jours de digestion, ce qui veut dire, et selon la littérature, que la composition de notre biogaz est telle qu'il est possible de le valoriser.



Photo 06: Test d'inflammabilité du biogaz.

VI.3.7 Evolution des fluors microbiens:

VI.3.7.1. Les germes totaux:

Le taux des germes dans la flore totale est passé de 2×10^6 avant la digestion à 1110 germes/ml après 60 jours de séjour dans le digesteur (fig.68) photo 07. Cela montre clairement qu'une hygiénisation accompagne tous les changements qui s'opèrent au sein du réacteur.

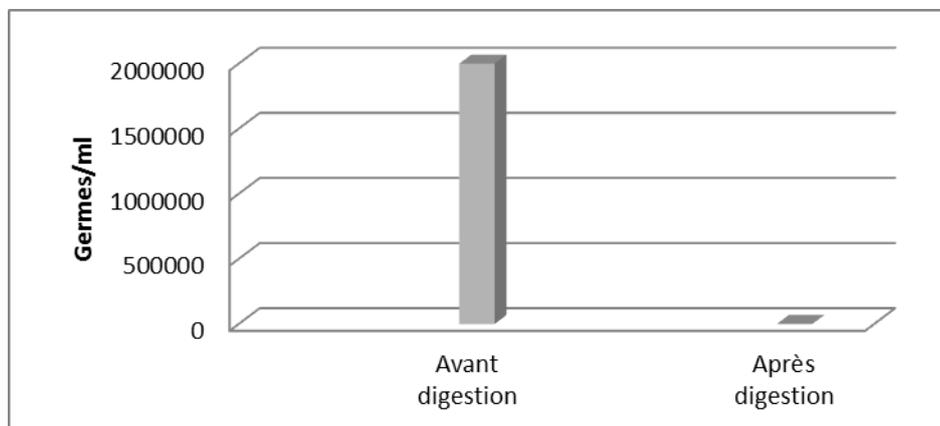


Figure 68: Evolution des germes totaux avant et après la digestion

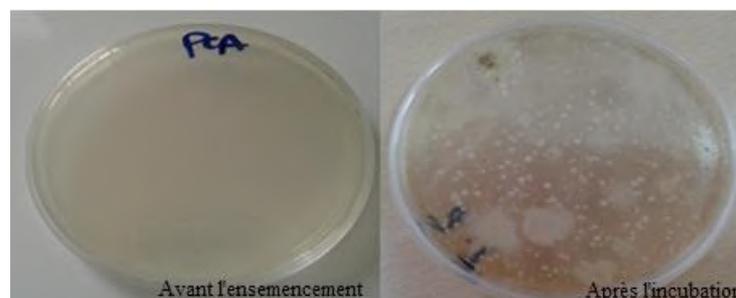


Photo07: Observation macroscopique des germes totaux sur le milieu PCA.

VI.3.7.2 Les coliformes fécaux:

La contamination fécale est bien présentée par les coliformes dont la population est toujours présente à la fin de la digestion, mais avec un nombre moins important (fig. 69), photo 08.

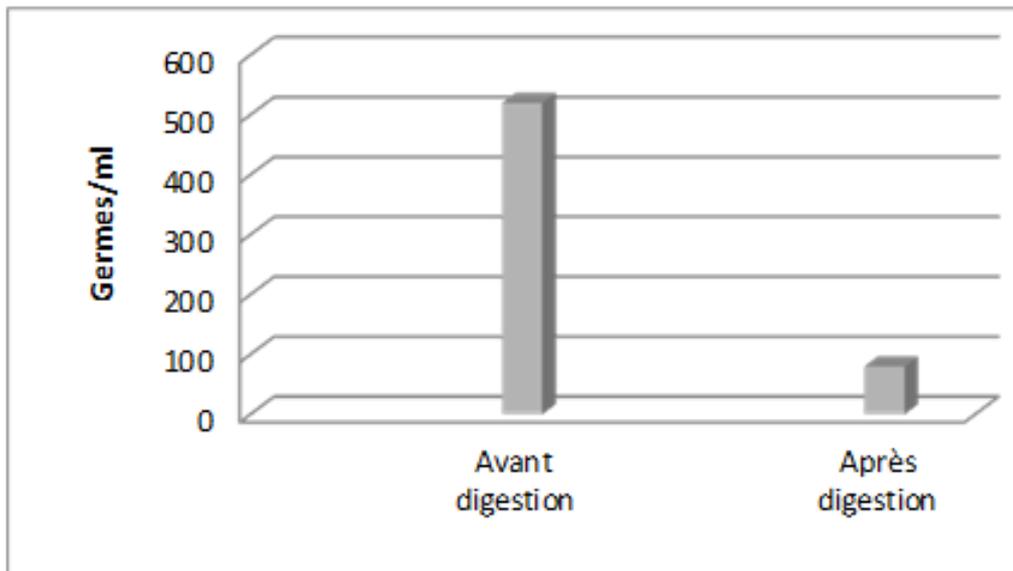


Figure 69: Evolution des coliformes fécaux avant et après la digestion

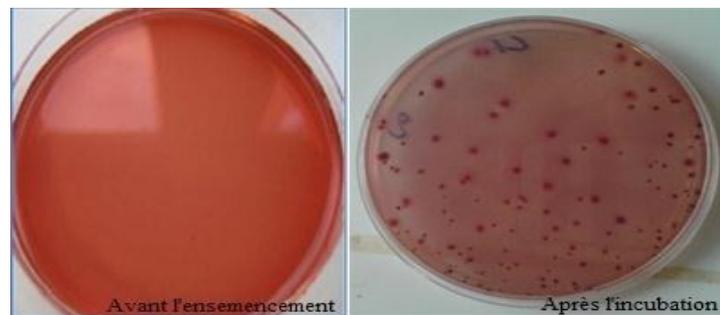


Photo 08: Observation macroscopique des coliformes fécaux sur le milieu VRBL.

VI.3.7.3 Les staphylocoques:

Le nombre des bactéries staphylocoques significativement diminué de 400 germes/ml avant la digestion à 110 germes/ml après la digestion ce qui explique l'acte d'hygiénisation de la digestion anaérobie. (fig.70), photo 09.

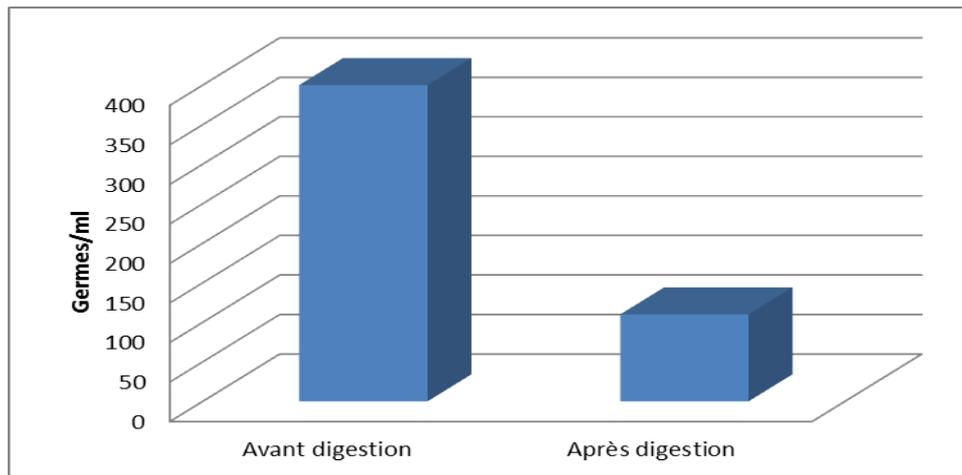


Figure 70: Evolution des staphylocoques avant et après la digestion



Photo 09 : Observation macroscopique des staphylocoques sur le milieu de Baird-Parker.

VI.3.7.4 Les streptocoques fécaux:

La disparition de certaines espèces dont la présence peut être nuisible, en particulier si l'on pense à valoriser le digestat produit à la fin de la digestion ; C'est le cas de l'espèce Streptocoques fécaux qui ont complètement disparu à la fin de la réaction (Fig.71).

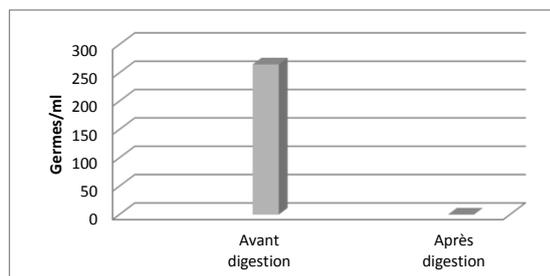


Figure 71: Evolution des streptocoques fécaux avant et après la digestion.



Photo 10: Résultat pour les streptocoques.

VI.3.8. Conclusion:

Les déchets d'abattoir sont très riches en matière organique et sont rejetés dans la nature sans traitement ce qui peut conduire à une pollution considérable de l'environnement. En utilisant la technique de la digestion anaérobie nous avons pu valoriser ces déchets par la production de 197,75 L/j de biogaz, ce gaz peut être utilisé pour la cuisson ou pour produire de l'électricité.

VI.4 Production d'électricités:**VI.4.1 Identification qualitative du biogaz par la chromatographie en phase gazeuse (CPG) :**

Les spectres donnés par la chromatographie permettent d'identifier les différents composants de biogaz et sa quantité produits par notre digesteur.

Nous avons analysé notre biogaz avant et après le passage dans les filtres, les résultats représentés dans le tableau suivant:

Tableau 19: Identification et pourcentage des différentes composantes de notre biogaz avant et après filtration :

Le Composant	Temps d'apparition (min)	Pourcentage Avant filtration (%)	Pourcentage après filtration (%)
Bioxyde de carbone(CO ₂)	01,982	49,74	17,49
Nitrogène(N ₂)	09,925	01.82	01,82
Hydrogène(H ₂)	07,533	03.96	02,74
Hydrogènesulfuré (H ₂ S)	07.636	00.67	00,01
Méthane (CH ₄)	11,203	41.89	71.81

D'après le tableau 17, qui représente les résultats des analyses du biogaz on observe des différents gaz (CH₄, H₂, N₂, O₂, CO₂, H₂S) avec des concentrations différentes.

Le pourcentage de méthane (CH₄) est compris entre 50-75 % ce qui permet de le valoriser, une réduction très importante de taux de dioxyde de carbone (CO₂) qui prouve l'efficacité de la filtration, la faible quantité de hydrogènesulfuré (H₂S) permet de préserver le générateur contre la corrosion.

La composition de biogaz en qualité de méthane est de l'ordre de 73% cette valeur est assimilable à celle de gaz naturel de HassiR'mel, avec un faible pourcentage en bioxyde de

carbone, ce qu'est expliqué l'efficacité de la filtration qu'est appliqué sur le biogaz. (Figure 72).

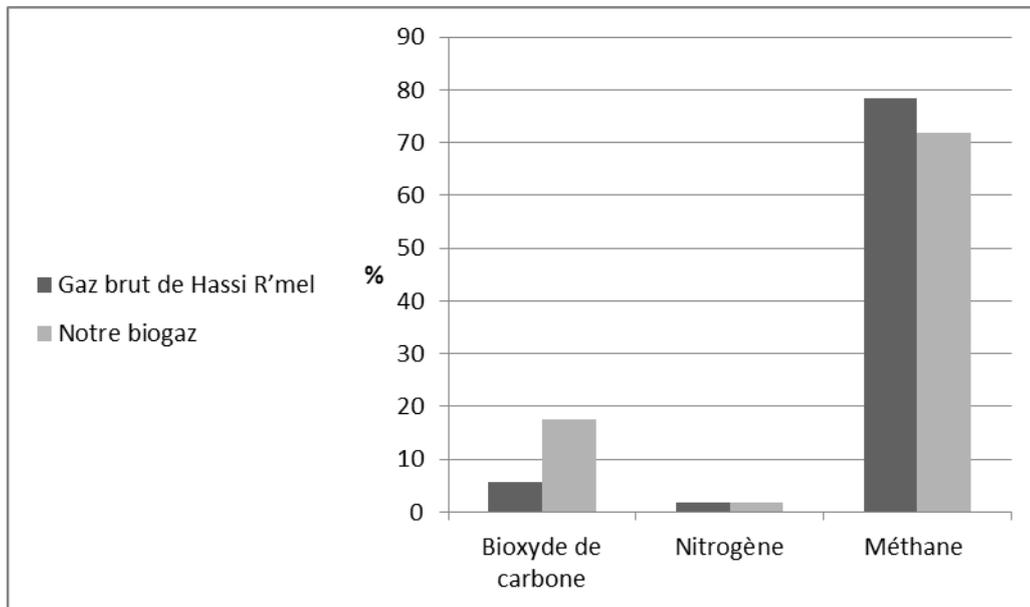


Figure 72: Comparaison entre notre biogaz et le gaz naturel de HassiR'mel

VI.4.2. Suivi de la tension du courant électrique :

Le résultat de suivi d'enregistrement de la tension du courant électrique dans les deux essais est représenté dans la figure suivante.

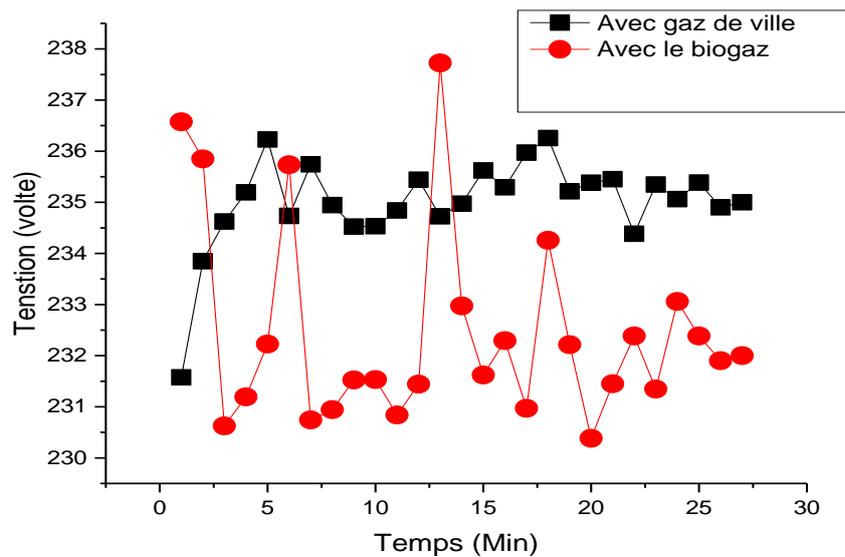


Figure 73: Enregistrement de la tension du courant électrique avec le gaz de ville et notre biogaz.

Soit avec le gaz de ville ou avec le biogaz le générateur donne une tension varier entre 230 et 238 volt, et plus stable avec le gaz de ville par rapport à ce qui est produit par le biogaz.

Dans les deux cas la tension du courant électrique reste dans les normes internationales ou la tension varie entre 220 et 240V dans la majorité des pays.

VI.4.3. Suivi de l'intensité du courant électrique :

Enregistrement de l'intensité du courant électrique dans les deux essais est représenté dans la figure suivante.

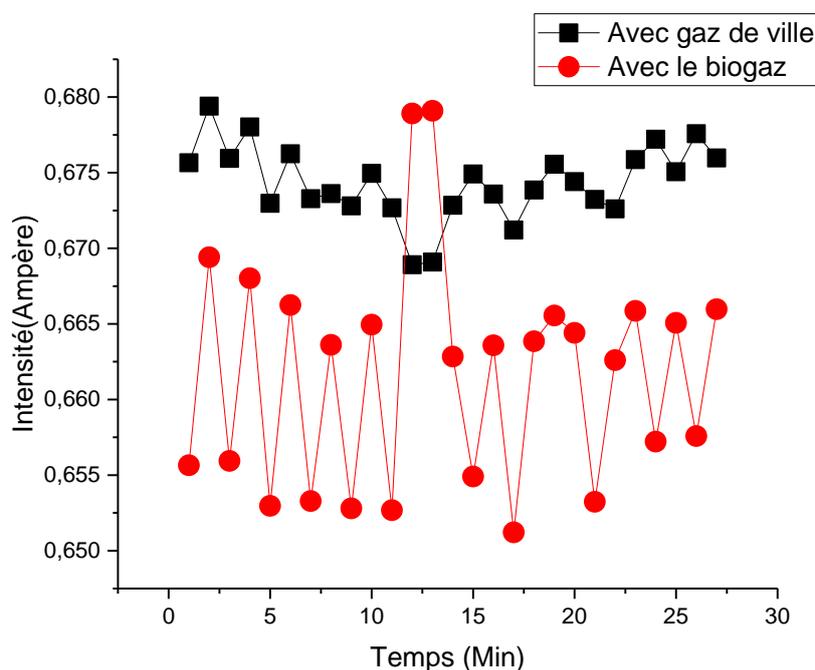


Figure 74: Enregistrement de l'Intensité du courant électrique avec le gaz de ville et notre biogaz.

Soit avec le gaz de ville ou avec le biogaz le générateur donne une intensité du courant varié entre 0,650 et 0,680 Ampère, et plus stable avec le gaz de ville par rapport à ce qui est produit par le biogaz.

VI.4.4. La puissance du courant électrique :

D'après les deux enregistrements de la tension et l'intensité, la puissance du courant électrique dans les deux essais est représenté dans la figure 75.

Avec le gaz de ville l'enregistrement de la puissance du courant électrique est varié entre 153 et 159 Wat, même remarque pour le biogaz.

Ce qui expliquer, que le générateur assurer la puissance demander par la charge appliquer qu'est de 155 Wat.

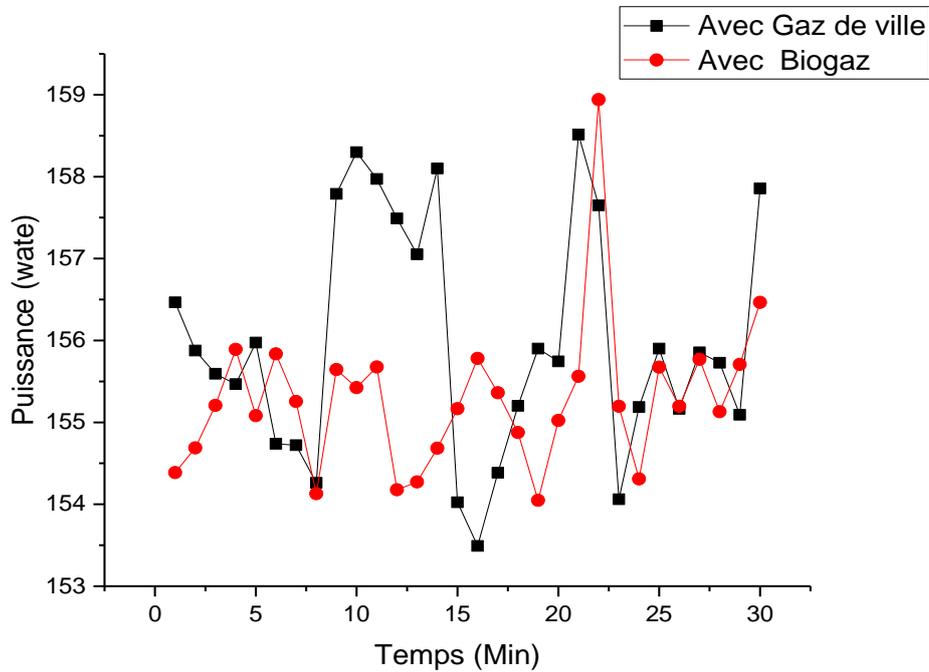


Figure 75: Puissance du courant électrique avec le gaz de ville et notre biogaz.

Le tableau suivant montre la comparaison entre les volumes de gaz de ville et du biogaz nécessaire pour produire la même puissance, et ainsi que leur coût.

Tableau 20: Volumes de gaz consommé par le générateur pondant l'expérience.

	Volume pour 1h	Volume pour 24h	Coût DA/jour
Gaz de ville (L)	26	624	3.33
Biogaz (L)	42	1008	00(2kg de déchet organique)
Équivalent en électricité (Wat)	155	3720	42.89

VI.4.5. Conclusion:

Le biogaz produit par notre digesteur a produit un courant électrique de tension dans les normes et une intensité assimilable à celle qui est produite par le gaz de ville, et aussi le biogaz assure une puissance suffisante pour la charge électrique appliquée.

Le coût d'électricité produit avec le biogaz est négligeable avec l'électricité qui est produite par le gaz de ville.

CONCLUSION GENERALE

Le monde entier accorde une grande importance au sujet de l'énergie et de la conservation et comment la produire sans endommager l'environnement, et aussi Comment alimenter les zones éloignées avec de l'énergie au coût le plus bas possible.

Ce travail, est venu pour donner une solution appropriée à tous ces problèmes ensemble avec un processus naturelle et qui est la digestion anaérobique.

Après l'étude théorique de différentes méthodes de traitement des déchets et surtout la méthode de digestion anaérobie avec toutes les conditions favorable pour ce phénomène afin de donner le meilleur rendement, nous avons divisé ce travail en deux parties.

Dans la première partie et à l'échelle de laboratoire, nous avons conçu un digesteur continu semi pilote d'une capacité de 12 litre, et étudier les paramètres de fonctionnement et l'amélioration de sa production en méthane(CH_4) par l'optimisation de le temps de rétention hydraulique. Pour cela nous avons rempli notre digesteur continu avec le déchets ménagers de la ville d'Adrar avec cinq temps des séjours de 7;14;21;28 et 35 jours successivement, et suivre des paramètres de fonctionnement telle que le pH, les AGV et TAC, et les volumes de biogaz et de méthane, les résultats ont montré que il faut un temps de rétention hydraulique pas moins de 21 jours qui a donné le plus grande volume en biogaz (35L) et donné aussi le volume le plus importante en CH_4 (23L), et une maximum consommation de matière organique de l'ordre de 51.4%, Sur cette base, et pour gagner de temps nous vous recommandons d'une alimentation de digesteur continuer à l'échelle pilote ou semi-pilote, après un temps de séjour entre 21et 28 jours, pour une exploitation énergétique optimum à ce type de déchets.

Dans la deuxième partie qui a été mise en œuvre à l'échelle pilote par le démarrage d'un digesteur continu pilote d'une capacité de 4 m³, et exploitation du méthane produit en électricité avec l'utilisation de déchet organique. Les résultats obtenus ont montré que en utilisant la technique de la digestion anaérobie nous avons pu valoriser ces déchets par la production de 197,75 L/j de biogaz, ce gaz peut être utilisé pour la

cuisson ou pour produire de l'électricité, les analyses microbiologiques prouvé l'effet d'hygiénisation contre la contamination fécale et la dépollution des déchets organiques par la digestion anaérobie. Les analyses de la chromatographie en phase gazeuse (CPG) montre qu'il y'a un grand degré de similitude entre notre biogaz et le gaz naturel de HassiR'mel après pétrification. La production de l'électricité par notre générateur montré qu'afin de couvrir les besoins quotidiens de l'individu Algériens en électricité il faut un volume de 1008L de notre biogaz, ce volume nous pouvons le produire par la digestion anaérobie de 2kg de déchets organique dans notre digesteur.

A la fin de ce travail, nous pouvons dire que le biogaz peut être une option viable en tant que carburant alternatif pour les générateurs électriques, en particulier dans les régions rurales (saharienne), où la relation avec le réseau électrique est difficile et coûteuse, et nous appelons à des méthodes de purification de biogaz améliorées pour une meilleure rentabilité en électricité.

Références bibliographiques

- [1] L'Institut de l'économie circulaire, "Economie circulaire et lutte contre le dérèglement climatique," 2015.
- [2] World energy council "Scénarios Mondiaux de l'Énergie à l'horizon 2050," 2013.
- [3] Q. Daniel, "Se loger, se déplacer: peut-on se libérer de l'addiction aux énergies fossiles," 2015.
- [4] G. L. R. Ducellier and M. A. Isman, System for producing a pulsating circulation in apparatus contains gas-evolving products, Algeria. Filed 03 March 1938. United States Patent Office n°2.174.203 Patented 26 September 1939.
- [5] E. ADLER, "What is the methanization? historical, theoretical and technical backgrounds", School of Engineers of the city of Paris [Technical days ASTEE-EIVP, "Co-digestion of muds and other waste"] p. 41, 12 November 2015.
- [6] M.A. Tabet, Types de traitement des déchets solides urbains: evaluation des coûts et impacts sur l'environnement. Revue des Energies renouvelables. Special number Production and Valorization, Biomass, pp. 97–102, 2001.
- [7] H. Zemmouri, l'eau usée vers le biogaz, CDER, bulletin 020, pp. 04–05, 2011.
- [8] M. Gharfalkar, R. Court, C. Campbell, Z. Ali, and G. Hillier, "Analysis of waste hierarchy in the European waste directive 2008 / 98 / EC," *Waste Manag.*, vol. 39, pp. 305–313, 2015.
- [9] M. Bendig, F. Maréchal, and D. Favrat, "De fi ning ' Waste Heat ' for industrial processes," *Applied Thermal Engineering journal*, vol. 61, pp. 134–142, 2013.
- [10] M. Feszterová, "Dangerous substances and processes : consideration of the subject within the educational process," *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 116, pp. 1176–1180, 2014.
- [11] Agence Nationale des Déchets, "Caractérisation des déchets ménagers et assimilés dans les zones nord, semi-aride et aride d'Algérie," 2014.
- [12] P. Elargi and M. M. Millward, "Cadre de coopération stratégique (cdcs) algérie," 2016.
- [13] A. Nahman, W. De Lange, S. Oelofse, and L. Godfrey, "The costs of household food waste in South Africa," *Waste Manag.*, vol. 32, no. 11, pp. 2147–2153, 2012.

- [14] L. Secondi, L. Principato, and T. Laureti, "Household food waste behaviour in EU-27 countries : A multilevel analysis," *J. FOOD POLICY*, vol. 56, pp. 25–40, 2015.
- [15] *Stratégie de Coopération de l'OMS avec l'Algérie*, Bureau rég. NLM Classification: WA 540 HA4, 2016.
- [16] Agence Nationale des Déchets, "Caractérisation des déchets ménagers et assimilés dans les zones nord, semi-aride et aride d'Algérie," 2014.
- [17] J. P. Bound, K. Kitsou, and N. Voulvoulis, "Household disposal of pharmaceuticals and perception of risk to the environment," *Environmental Toxicology and Pharmacology.*, vol. 21, pp. 301–307, 2006.
- [18] Z. Xin-gang, J. Gui-wu, L. Ang, and L. Yun, "Technology , cost , a performance of waste-to-energy incineration industry in China," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 55, pp. 115–130, 2016.
- [19] D. C. Ashworth, P. Elliott, and M. B. Toledano, "Waste incineration and adverse birth and neonatal outcomes : a systematic review," *Environ. Int.*, vol. 69, pp. 120–132, 2014.
- [20] L. Biganzoli, L. Gorla, S. Nessi, and M. Grosso, "Volatilisation and oxidation of aluminium scraps fed into incineration furnaces," *Waste Manag.*, vol. 32, no. 12, pp. 2266–2272, 2012.
- [21] T. Rouanet, F. Gougeon, J. Fayard, F. Rémy, H. Migaud, and G. Pasquier, "Trochléoplastie de creusement dans l'instabilité fémoropatellaire : une série de 34 cas à 15 ans de recul Sulcus deepening trochleoplasty for patellofemoral instability : A series of 34 cases," *Rev. Chir. Orthop. Traumatol.*, vol. 101, no. 4, pp. 282–286, 2015.
- [22] M. Kasina, M. Kasina, and G. Sciences, "Metallic Elements Occurrences in The Municipal Waste Metallic Elements Occurrences Municipal Waste Incineration Bottom Ash Incineration Bottom Ash Assessing the feasibility of using the , heat temperature function for a district heat demand forecast," *Energy Procedia*, vol. 125, pp. 56–62, 2017.
- [23] C. J. L. Be, R. K. D. Obe, and G. S. Ghataora, "Municipal incinerated bottom ash characteristics and potential for use as aggregate in concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 127, pp. 504–517, 2016.
- [24] F. Yan, F. Zhu, Q. Wang, and Y. Xiong, "Preliminary study of PM2.5 formation during municipal solid waste incineration," *Procedia Environ. Sci.*, vol. 31, pp. 475–481, 2016.
- [25] P. Roy and G. Dias, "Prospects for pyrolysis technologies in the bioenergy sector : A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 77, no. March, pp. 59–69, 2017.

- [26] T. Duan, C. Lu, S. Xiong, Z. Fu, and Y. Chen, "Pyrolysis and gasification modelling of underground coal gasification and the optimisation of CO₂ as a gasification agent," *Fuel*, vol. 183, pp. 557–567, 2016.
- [27] X. Ku, H. Jin, and J. Lin, "Comparison of gasification performances between raw and torrefied biomasses in an air-blown fluidized-bed gasifier," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 168, pp. 235–249, 2017.
- [28] F. Pinto, R. André, M. Miranda, D. Neves, F. Varela, and J. Santos, "Effect of gasification agent on co-gasification of rice production wastes mixtures," *Fuel*, vol. 180, pp. 407–416, 2016.
- [29] S. Huang, S. Wu, Y. Wu, and J. Gao, "Structure characteristics and gasification activity of residual carbon from updraft fixed-bed biomass gasification ash," *Energy Convers. Manag.*, vol. 136, pp. 108–118, 2017.
- [30] S. Vigneswaran, J. Kandasamy, and M. A. H. Johir, "Sustainable Operation of Composting in Solid Waste Management," *Procedia Environ. Sci.*, vol. 35, pp. 408–415, 2016.
- [31] D. Juchelková, A. Corsaro, A. Hlavsová, and H. Raclavská, "Effect of composting on the production of syngas during pyrolysis of perennial grasses," *Fuel*, vol. 154, pp. 380–390, 2015.
- [32] F. Yan, F. Zhu, Q. Wang, and Y. Xiong, "Preliminary study of PM_{2.5} formation during municipal solid waste incineration," *Procedia Environ. Sci.*, vol. 31, pp. 475–481, 2016.
- [33] S. You, W. Wang, Y. Dai, Y. Wah, and C. Wang, "Comparison of the co-gasification of sewage sludge and food wastes and cost-benefit analysis of gasification- and incineration-based waste treatment schemes," *Bioresour. Technol.*, vol. 218, pp. 595–605, 2016.
- [34] Z. Jing, W. Hao, X. He, J. Fan, Y. Zhang, and J. Miao, "A novel hydrothermal method to convert incineration ash into pollucite for the immobilization of a simulant radioactive cesium," *J. Hazard. Mater.*, vol. 306, pp. 220–229, 2016.
- [35] F. Mercl, I. Perná, and P. Tlusto, "Investigation of polycyclic aromatic hydrocarbon content in fly ash and bottom ash of biomass incineration plants in relation to the operating temperature and unburned carbon content," *Science of the Total Environment*, vol. 564, pp. 53–61, 2016.
- [36] M. Mohon, A. Dutta, K. Corscadden, P. Havard, and L. Dickie, "Review of biosolids management options and co-incineration of a biosolid-derived fuel," *Waste Manag.*, vol. 31, no. 11, pp. 2228–2235, 2011.
- [37] M. Smol, J. Kulczycka, and Z. Kowalski, "Sewage sludge ash (SSA) from large and small incineration plants as a potential source of phosphorus e Polish case study," *J. Environ. Manage.*, vol. 184, pp. 617–628, 2016.

- [38] J. Song, D. Song, X. Zhang, and Y. Sun, "Risk identification for PPP waste-to-energy incineration projects in China," *Energy Policy*, vol. 61, pp. 953–962, 2013.
- [39] Y. Wang, L. Huang, and R. Lau, "Conversion of municipal solid waste incineration bottom ash to sorbent material: Effect of ash particle size," *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, vol. 68, pp. 351–359, 2016.
- [40] Y. Lei *et al.*, "Stimulation of methanogenesis in anaerobic digesters treating leachate from a municipal solid waste incineration plant with carbon cloth," *Bioresour. Technol.*, vol. 222, pp. 270–276, 2016.
- [41] L. Jing-yong *et al.*, "Effects of sulfur on lead partitioning during sludge incineration based on experiments and thermodynamic calculations," *Waste Manag.*, vol. 38, pp. 336–348, 2015.
- [42] P. Roy and G. Dias, "Prospects for pyrolysis technologies in the bioenergy sector: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 77, no. March, pp. 59–69, 2017.
- [43] T. Duan, C. Lu, S. Xiong, Z. Fu, and Y. Chen, "Pyrolysis and gasification modelling of underground coal gasification and the optimisation of CO₂ as a gasification agent," *Fuel*, vol. 183, pp. 557–567, 2016.
- [44] X. Ku, H. Jin, and J. Lin, "Comparison of gasification performances between raw and torrefied biomasses in an air-blown fluidized-bed gasifier," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 168, pp. 235–249, 2017.
- [45] F. Pinto, R. André, M. Miranda, D. Neves, F. Varela, and J. Santos, "Effect of gasification agent on co-gasification of rice production wastes mixtures," *Fuel*, vol. 180, pp. 407–416, 2016.
- [46] S. Huang, S. Wu, Y. Wu, and J. Gao, "Structure characteristics and gasification activity of residual carbon from updraft fixed-bed biomass gasification ash," *Energy Convers. Manag.*, vol. 136, pp. 108–118, 2017.
- [47] C. Sánchez, E. Arenas, F. Chejne, C. A. Londoño, S. Cisneros, and J. C. Quintana, "A new model for coal gasification on pressurized bubbling fluidized bed gasifiers," *Energy Conversion and Management.*, vol. 126, pp. 717–723, 2016.
- [48] H. Zhang, E. McGill, C. Ohep Gomez, S. Carson, K. Neufeld, I. Hawthorne, S.M. Smukler, "Disintegration of compostable foodware and packaging and its effect on microbial activity and community composition in municipal composting," *International Biodeterioration & Biodegradation.*, Vol. 125, PP. 157-165, 2017.
- [49] A.B.Morales, M.A.Bustamante, F.C.Marhuenda-Egea, "Agri-food sludge management using different co-composting strategies: study of the added value of the composts obtained," *Journal of Cleaner Production.*, Vol. 121, PP.

- 186-197, 2016.
- [50] J.Jara-Samaniegoa, M.D.Pérez-Murciab, M.A.Bustamante, “Composting as sustainable strategy for municipal solid waste management in the Chimborazo Region, Ecuador: Suitability of the obtained composts for seedling production, ” *Journal of Cleaner Production*, Vol.141, PP. 1349-135810, 2017.
- [51] D.Malamisa, A.Bourkab, E.Stamatopoulouc, K.Moustakasa, O.Skiadic, M.Loizidoua, “Study and assessment of segregated biowaste composting: The case study of Attica municipalities, ” *Journal of Environmental Management.*,Vol. 203, PP. 664-6691, 2017.
- [52] A.Selvam, J.W.C.Wong, “Degradation of Antibiotics in Livestock Manure During Composting” *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering Solid Waste Management*, PP. 267-292,2017.
- [53] C.-G.Dussap,L.Poughon, “Microbiology of Alcoholic Fermentation” *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering Food and Beverages Industry* , PP. 263-279,2017.
- [54] M.Perini, R.Guzzon, M.Simoni, M.Malacarne, R.Larcher, F.Camin, “The effect of stopping alcoholic fermentation on the variability of H, C and O stable isotope ratios of ethanol” *Food Control*, Vol. 40,PP 368-373,2014.
- [55] M.J.R.Nout,“Food Technologies: Fermentation” *Reference Module in Food Science Encyclopedia of Food Safety* ,Vol. 3, PP168-177,2014.
- [56] M.Ciani, F.Comitini, I.Mannazzu, “ Fermentation” *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences Encyclopedia of Ecology (Second Edition)*,Vol.2, PP 310-321,2013.
- [57] E. Caceres and J. J. Alca, “Potential For Energy Recovery From A Wastewater Treatment Plant,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 7, pp. 3316–3321, 2016.
- [58] A. Chuanchai and R. Ramaraj, “Sustainability assessment of biogas production from buffalo grass and dung : biogas purification and bio - fertilizer,” *3 Biotech*, vol. 8, no. 3, pp. 150–161, 2018.
- [59] V. K. Vijay, R. Kapoor, A. Trivedi, and P. Narale, “Biogas Upgrading and Bottling Technology for Vehicular and Cooking Applications,” *Manag. Nat. Resour. a Chang. Environ.*, vol. 10, pp. 135–153, 2015.
- [60] K. Gaj, “Applicability of selected methods and sorbents to simultaneous removal of siloxanes and other impurities from biogas,” *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 19, no. 9, pp. 2181–2189, 2017.
- [61] M. S. Romero-güiza, J. M. Chimenos, J. Formosa, R. Valle-zerme, J. Matalvarez, and S. Astals, “Biogas upgrading using MSWI bottom ash: An integrated municipal solid waste management,” *Renew. Energy*, vol. 80, pp. 184–189, 2015.

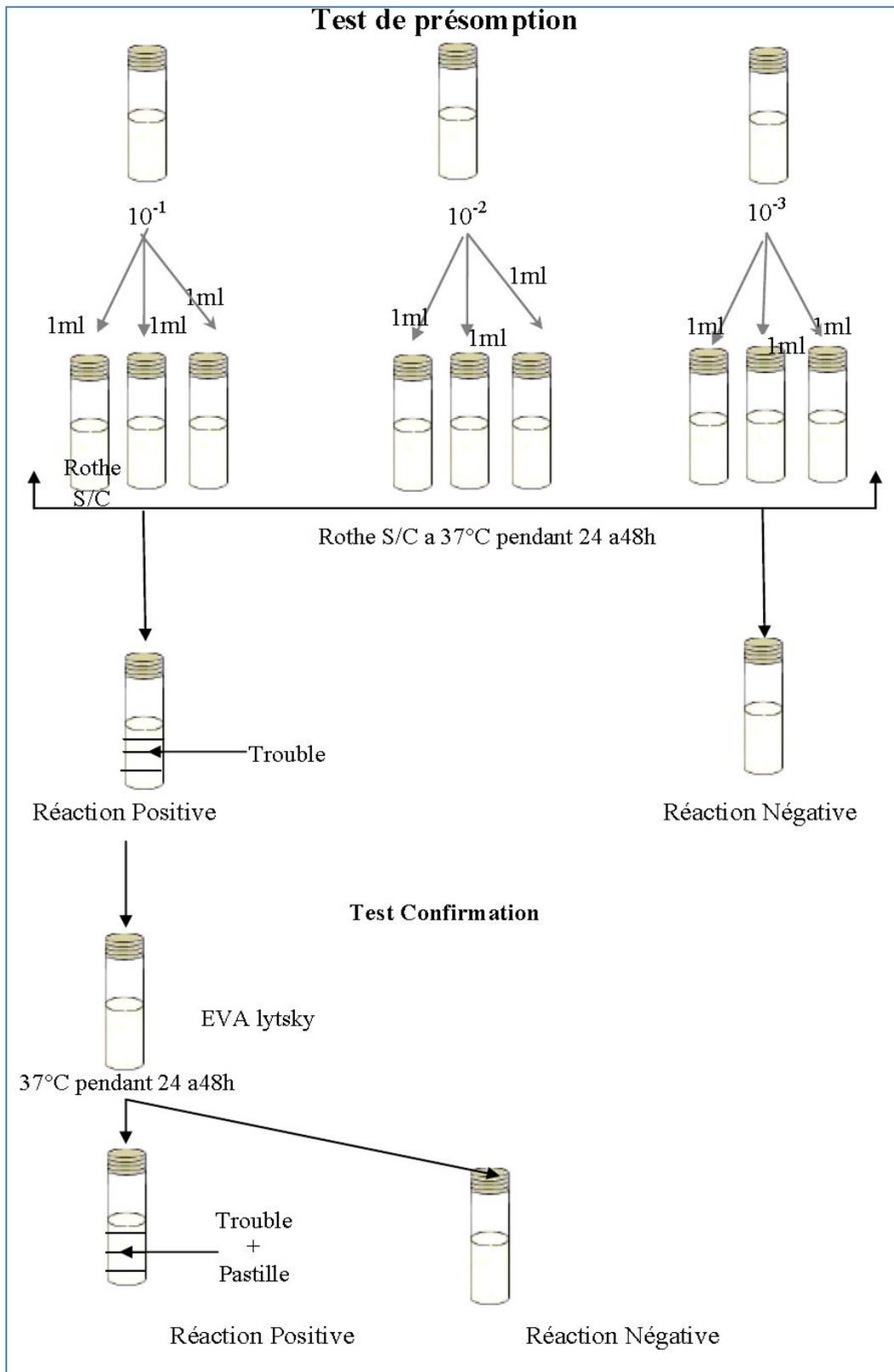
- [62] C. Micale, "Bio-methane generation from biogas upgrading by semi-permeable membranes : An experimental , numerical and economic analysis," *Energy Procedia*, vol. 82, pp. 971–977, 2015.
- [63] K. Starr, G. Villalba, and X. Gabarrell, "Upgraded biogas from municipal solid waste for natural gas substitution and CO₂ reduction – A case study of Austria , Italy , and Spain," *WASTE Manag.*, vol. 38, pp. 105–116, 2015.
- [64] H. Oechsner, S. K. Khanal, and M. Taherzadeh, "Advances in Biogas Research and Application," *Bioresour. Technol.*, vol. 178, pp. 177–191, 2015.
- [65] K. Starr, L. Talens, L. Lombardi, X. Gabarrell, and G. Villalba, "Optimization of environmental benefits of carbon mineralization technologies for biogas upgrading," *J. Clean. Prod.*, vol. 76, pp. 32–41, 2014.
- [66] M. R. Hamed, A. Tsolakis, and C. S. Lau, "Biogas upgrading for on-board hydrogen production : Reforming process CFD modelling," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 24, pp. 12532–12540, 2014.
- [67] S. Borowski, "Temperature-phased anaerobic digestion of the hydromechanically separated organic fraction of municipal solid waste with sewage sludge," *Int. Biodeterior. Biodegradation*, vol. 105, pp. 106–113, 2015.
- [68] F. Passos and I. Ferrer, "Influence of hydrothermal pretreatment on microalgal biomass anaerobic digestion and bioenergy production," *Water Res.*, vol. 68, pp. 364–373, 2014.
- [69] T. T. Olugasa, I. F. Odesola, and M. O. Oyewola, "Energy production from biogas : A conceptual review for use in Nigeria," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 32, pp. 770–776, 2014.
- [70] M. Koyama, S. Yamamoto, K. Ishikawa, S. Ban, and T. Toda, "Anaerobic digestion of submerged macrophytes : Chemical composition and anaerobic digestibility," *Ecol. Eng.*, vol. 69, pp. 304–309, 2014.
- [71] Y. Hu *et al.*, "Influence of recirculation of liquid fraction of the digestate (LFD) on maize stover anaerobic digestion," *Biosyst. Eng.*, vol. 127, pp. 189–196, 2014.
- [72] Y. Chen, B. Rößler, S. Zielonka, A. Lemmer, A. Wonneberger, and T. Jungbluth, "The pressure effects on two-phase anaerobic digestion," *Appl. Energy*, vol. 116, pp. 409–415, 2014.
- [73] M. Markowski, A. Ireneusz, B. Krzemieniewski "Optimizing low-temperature biogas production from biomass by anaerobic digestion," *Renewable Energy*, vol. 69, pp. 219–225, 2014.
- [74] D. Krishna and A. S. Kalamdhad, "Pre-treatment and anaerobic digestion of food waste for high rate methane production – A review," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 2, no. 3, pp. 1821–1830, 2014.

- [75] D. Hidalgo and J. M. Martín-marroquín, "Effects of inoculum source and co-digestion strategies on anaerobic digestion of residues generated in the treatment of waste vegetable oils," *J. Environ. Manage.*, vol. 142, pp. 17–22, 2014.
- [76] M. Takashima and Y. Tanaka, "Acidic thermal post-treatment for enhancing anaerobic digestion of sewage sludge," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 2, no. 2, pp. 773–779, 2014.
- [77] G. Han, S. G. Shin, K. Cho, J. Lee, W. Kim, and S. Hwang, "Temporal variation in bacterial and methanogenic communities of three full-scale anaerobic digesters treating swine wastewater," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 112, pp. 3–12, 2018.
- [78] H. Min, H. Uk, S. Kyu, J. Hyub, and J. Moon, "Influence of thermophilic aerobic digestion as a sludge pre-treatment and solids retention time of mesophilic anaerobic digestion on the methane production, sludge digestion and microbial communities in a sequential digestion process," *Water Res.*, vol. 17, pp. 1–14, 2013.
- [79] A. Cestonaro, A. Kunz, R. Luís, R. Steinmetz, and K. Cristiane, "Zinc and copper distribution in swine wastewater treated by anaerobic digestion," *J. Environ. Manage.*, vol. 141, pp. 132–137, 2014.
- [80] H. Li, S. Zou, C. Li, and Y. Jin, "Alkaline post-treatment for improved sludge anaerobic digestion," *Bioresour. Technol.*, vol. 140, pp. 187–191, 2013.
- [81] A. Hajji and M. Rhachi, "The Influence of Particle Size on the Performance of Anaerobic Digestion of Municipal Solid Waste," *Energy Procedia*, vol. 36, pp. 515–520, 2013.
- [82] R. Rajagopal, D. I. Massé, and G. Singh, "A critical review on inhibition of anaerobic digestion process by excess ammonia," *Bioresour. Technol.*, vol. 143, pp. 632–641, 2013.
- [83] M. Pohl, K. Heeg, and J. Mumme, "Anaerobic digestion of wheat straw – Performance of continuous solid-state digestion," *Bioresour. Technol.*, vol. 146, pp. 408–415, 2013.
- [84] A. González-gonzález, F. Cuadros, A. Ruiz-celma, and F. López-rodríguez, "Potential application of anaerobic digestion to tobacco plant," *Fuel*, vol. 113, pp. 415–419, 2013.
- [85] A. Molino, F. Nanna, Y. Ding, B. Bikson, and G. Braccio, "Biomethane production by anaerobic digestion of organic waste," *Fuel*, vol. 103, pp. 1003–1009, 2013.
- [86] Z. Yue, C. Rui, Y. Fan, "Effects of dairy manure and corn stover co-digestion on anaerobic microbes and corresponding digestion performance," *Bioresour.*

- Technol.*, vol. 128, pp. 65–71, 2013.
- [87] S. Porselvam, N. Soundara Vishal, S. V. Srinivasan, “Enhanced biogas yield by thermo-alkalisolubilization followed by co-digestion of intestine waste from slaughterhouse with food waste,” *Biotech*, vol. 7, (5), , pp. 1–10, 2017.
- [88] K. Slimane., S. fathya, K. Assia, M. Hamza, “Influence of inoculums / substrate ratios (ISRs) on the mesophilic anaerobic digestion of slaughterhouse waste in batch mode : Process stability and biogas production,” *Energy Procedia*, vol. 50, pp. 57–63, 2014.
- [89] M.E. Alzate , R. Muñoz , F. Rogalla , “Biochemical methane potential of microalgae: Influence of substrate to inoculum ratio, biomass concentration and pretreatment,” *Bioresource Technology*, vol. 123, pp. 488-494, 2012.
- [90] H. Dhar, P. Kumar, S. Kumar “Effect of organic loading rate during anaerobic digestion of municipal solid waste” *Bioresource Technology*, vol. 217, pp. 56-61.
- [91] S. Begum, G. R. Anupoju, S. Sridhar, S. K. Bhargava, V. Jegatheesan, and N. Eshtiaghi, “Evaluation Of Single And Two Stage Anaerobic Digestion Of Landfill Leachate : Effect Of Ph And Initial Organic Loading Rate On Volatile Fatty Acid (Vfa) And Biogas Production,” *Bioresour. Technol.*, vol. 251, pp. 364–373, 2017.
- [92] K. Slimane, “Etude des parametres physico-chimiques de la digestion anaerobie des dechets organiques” These doctorat en-sciences, Universite abdelhamid ibn badis mostaganem, PP.96-108, 2012.
- [93] “[https://donnees.banquemondiale.org/.](https://donnees.banquemondiale.org/)” 2016.
- [94] APHA, Standard Methods for the Examination and Water and Wastewater, twenty first ed. American Water Works Association and Water Environment Federation, Washington DC. (2005)
- [95] Organisation mondiale de la santé (OMS), “Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater” World Health Organization. Geneva. pp. 36., 2006.
- [96] M. Jeannette, G. Perr Kenneth, R. Furton José “Gas chromatography positive chemical ionization and tandem mass spectrometry for the analysis of organic high explosives” *Talanta*, Vol. 67, pp. 430-436, 2005.
- [97] S. Khanizadeh, D. Buszard, G. Constantinos “Misuse of the Kjeldahl Method for Estimating Protein Content in Plant Tissue” *HORTSCIENCE*, VOL. 30(7), pp. 1341-1342, 1995.
- [98] J. Wilson “Fibres, yarns and fabrics: fundamental principles for the textile designer” *Textile Design, Principles, Advances and Applications* Woodhead Publishing Series in Textiles, pp. 3-30, 2011.
- [99] P. Chow simon, M. Landhäuser “A method for routine measurements of total sugar and starch content in woody plant tissues” *Tree Physiology*, Vol

- 24(10),pp.1129-1136, 2004.
- [100] S. Str, I. Achu, M. Nistor, B. Wang, and A. Bj, "Evaluating the influences of mixing strategies on the Biochemical Methane Potential test," *J. Environ. Manage.*, vol. 185, pp. 54–59, 2017.
- [101] A. Elreedy, M. Fujii, and A. Tawfik, "Factors affecting on hythane bio-generation via anaerobic digestion of mono-ethylene glycol contaminated wastewater: inoculum-to-substrate ratio, nitrogen-to-phosphorus ratio and pH," *Bioresour. Technol.*, vol. 223, pp. 10–17, 2016.
- [102] N. M. S. Sunyoto, M. Zhu, Z. Zhang, and D. Zhang, "Effect of Biochar Addition and Initial pH on Hydrogen Production from the First Phase of Two-Phase Anaerobic Digestion of Carbohydrates Food Waste," *Energy Procedia*, vol. 105, pp. 379–384, 2017.
- [103] S. Begum, G. R. Anupoju, S. Sridhar, S. K. Bhargava, V. Jegatheesan, and N. Eshtiaghi, "Evaluation Of Single And Two Stage Anaerobic Digestion Of Landfill Leachate : Effect Of Ph And Initial Organic Loading Rate On Volatile Fatty Acid (Vfa) And Biogas Production," *Bioresour. Technol.*, vol. 251, pp. 364–373, 2017.
- [104] H. Ejhed *et al.*, "The effect of hydraulic retention time in onsite wastewater treatment and removal of pharmaceuticals , hormones and phenolic utility substances," *Sci. Total Environ.*, vol. 618, pp. 250–261, 2018.
- [105] A. H. Salem, R. Brunstermann, and T. Mietzel, "Effect of pre-treatment and hydraulic retention time on biohydrogen production from organic wastes," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 10, pp. 4856–4865, 2018.
- [106] X. Font and T. Vicent, "Alkalinity ratios to identify process imbalances in anaerobic digesters treating source-sorted organic fraction of municipal wastes," *Biochem. Eng. J.*, vol. 76, pp. 1–5, 2013.
- [107] T. T. Olugasa, I. F. Odesola, and M. O. Oyewola, "Energy production from biogas : A conceptual review for use in Nigeria," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 32, pp. 770–776, 2014.

Annexe 01: **Dénombrement des *Streptocoques fécaux*:**



Annexe 02: La table de Mac Grady

Nombre de résultats positifs			NPP
0	0	0	<0,30
0	0	0	0,30
0	1	0	0,30
0	1	1	0,61
0	2	0	0,62
0	3	0	0,94
1	0	0	0,36
1	0	1	0,72
1	0	2	1,1
1	1	0	0,74
1	1	1	1,1
1	2	0	1,1
1	2	1	1,5
1	3	0	1,6
2	0	0	0,92
2	0	1	1,4
2	0	2	2
2	1	0	1,5
2	1	1	2,0
2	1	2	2,7
2	2	0	2,1
2	2	1	2,8
2	2	2	3,5
2	3	0	2,9
2	3	1	3,6
3	0	0	2,3
3	0	1	3,8
3	0	2	6,4
3	1	0	4,3
3	1	1	7,5
3	1	2	12
3	1	3	16
3	2	0	9,3
3	2	1	15
3	2	2	21
3	2	3	29
3	3	0	24
3	3	1	46
3	3	2	110
3	3	3	>110

Annexe 03: Composition des milieux des cultures

- **Gélose PCA (Plate Count Agar)**

Tryptone:6,0 g

Extrait de levure:2,5 g

Glucose 1,0 g

Agar 15,0 g

pH = 7

Eau qsp 1L

- **VBL**

Peptone 7 g

Extrait de levure 3 g

Lactose 10 g

Chlorure de sodium 5 g

Mélange sel biliaire 1,5 g

Cristal violet 0,002 g

Rouge neutre 0,03 g

Agar-agar 15 g

Eau distillé 1 000 ml

PH 7,4

- **Bouillon BHI:**

Protéose-peptone 10,0 g

Infusion de cervelle de veau 12,5 g

Infusion de cœur de bœuf 5,0 g

Glucose 2,0 g

Chlorure de sodium 5,0 g

Hydrogénophosphate de sodium 2,5 g

pH = 7,4

- **Gélose BP (Baird-Parker)**

Peptone 10,0 g

Extrait de viande de bœuf 4,0 g

Extrait de levure 2,0 g

Pyruvate de sodium 10,0 g

Glycocolle 12,0 g

Chlorure de lithium 5,0 g

Agar-agar 20,0 g

- **Milieu de Rothe**

Peptone 20,0 g

Glucose 5,0 g

Azide 0,2 g

NaCl 5,0 g

Hydrogénophosphate de potassium 2,7 g

Dihydrogénophosphate de potassium 2,7 g

- **EVA Lytski**

Peptone 20,0 g

Glucose 5,0 g

Azide 0,2 g

Ethyl-violet 0,5 g

NaCl 5,0 g

Hydrogénophosphate de potassium 2,7 g

Dihydrogénophosphate de potassium 2,7 g

pH= 6,8

Annexe 04: Photos



Les déchets d'abattoirs utiliser pour l'alimentation de digestion continue à l'échelle pilote.



Filtre de dioxyde de carbone CO₂.



Piège à eau.



Filtre de sulfure d'hydrogène H₂S utilisé.



Le compresseur utilisé.



Régulateur gaz (détendeur) utilisé.



Compteur à gaz.

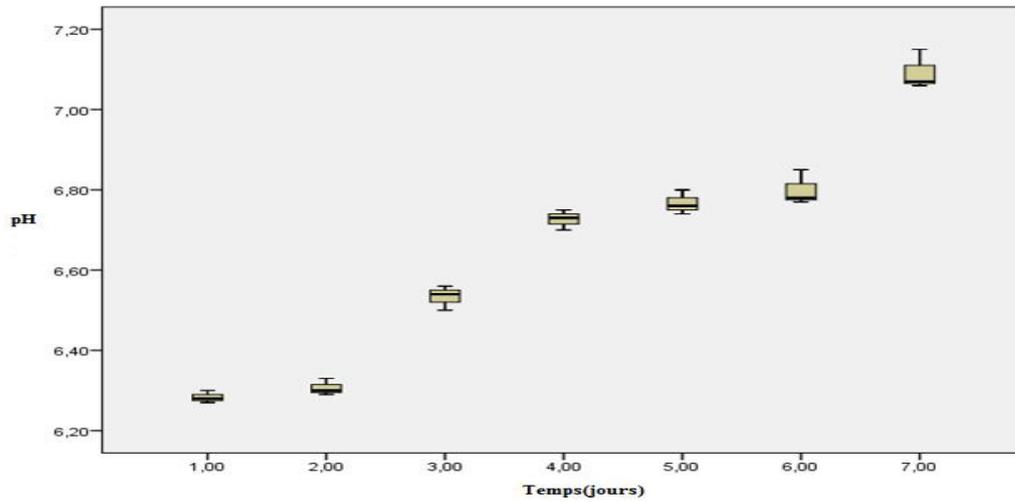


Le générateur de gaz.

Annexe 05

Teste ANOVA :

Les données ont été analysées à l'aide d'une analyse de variance (ANOVA) avec un système TRUKEY de IBM SPSS statistics version 23 à $p < 0,05$.



Test d'homogénéité des variances

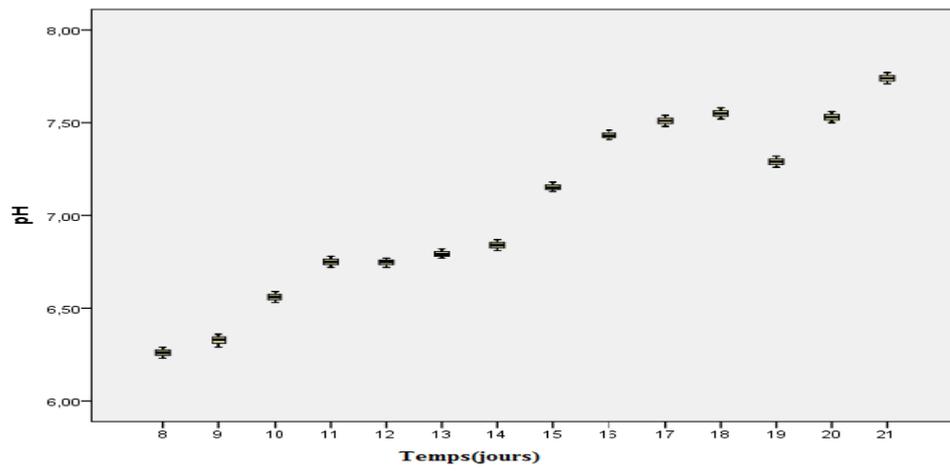
pH

Statistique de Levene	ddl1	ddl2	Sig.
,267	6	14	,944

ANOVA

pH

	Somme des carrés	ddl	Carré moyen	F	Sig.
Inter-groupes	1,482	6	,247	5764,593	,000
Intragroupes	,001	14	,000		
Total	1,483	20			



Test d'homogénéité des variances

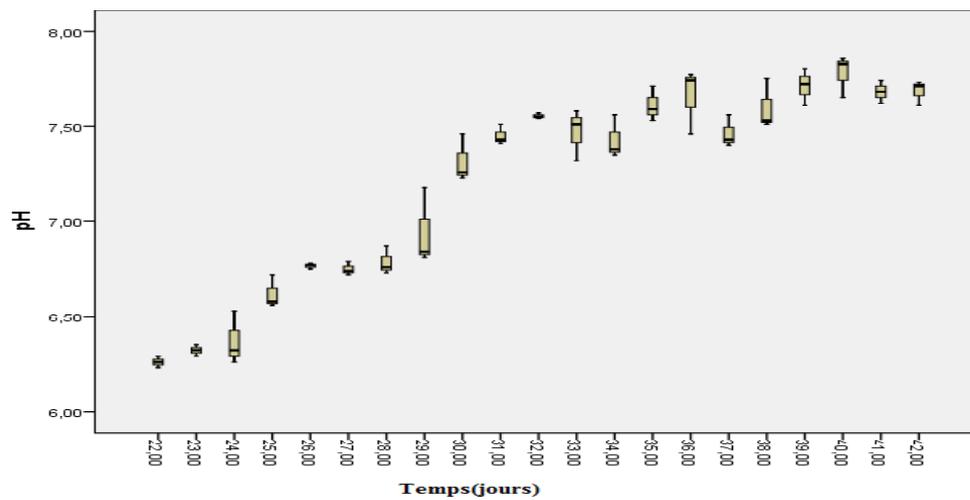
pH

Statistique de Levene	ddl1	ddl2	Sig.
,033	13	28	1,000

ANOVA

pH

	Somme des carrés	ddl	Carré moyen	F	Sig.
Inter-groupes	9,178	13	,706	832,931	,000
Intragroupes	,024	28	,001		
Total	9,202	41			



Test d'homogénéité des variances

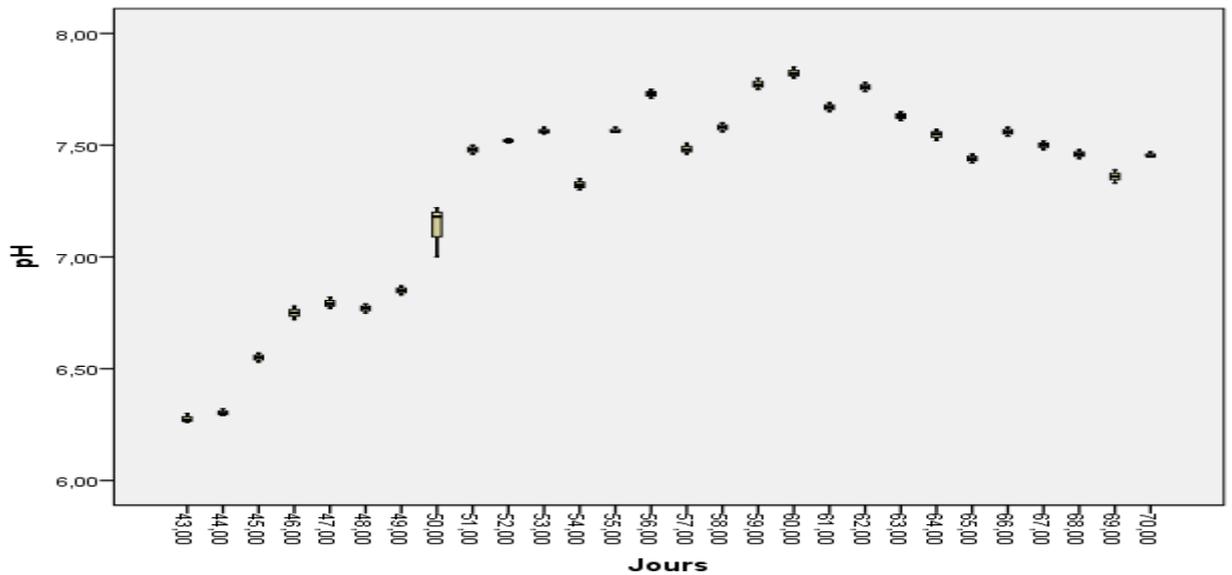
pH

Statistique de Levene	ddl1	ddl2	Sig.
3,183	20	42	,001

ANOVA

pH

	Somme des carrés	ddl	Carré moyen	F	Sig.
Inter-groupes	15,903	20	,795	75,658	,000
Intragroupes	,441	42	,011		
Total	16,344	62			



Test d'homogénéité des variances

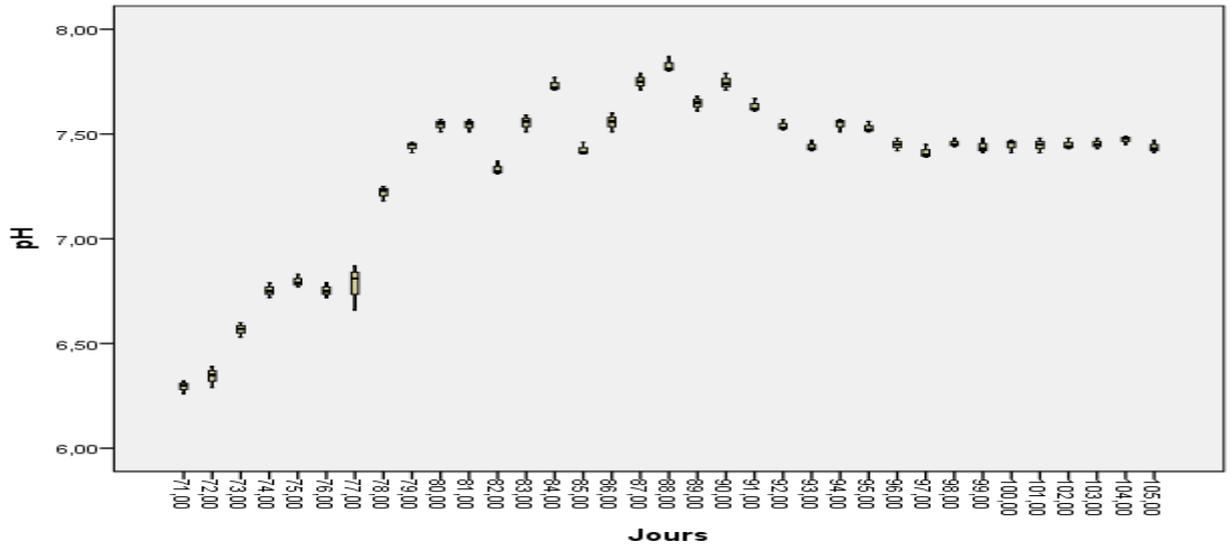
pH

Statistique de Levene	ddl1	ddl2	Sig.
3,269	27	56	,000

ANOVA

pH

	Somme des carrés	ddl	Carré moyen	F	Sig.
Inter-groupes	16,161	27	,599	649,592	,000
Intragroupes	,052	56	,001		
Total	16,213	83			



Test d'homogénéité des variances

pH

Statistique de Levene	ddl1	ddl2	Sig.
1,137	34	70	,319

ANOVA

pH

	Somme des carrés	ddl	Carré moyen	F	Sig.
Inter-groupes	16,021	34	,471	337,043	,000
Intragroupes	,098	70	,001		
Total	16,119	104			

Résumé :

La digestion anaérobie est un processus naturel de transformation de la matière organique en énergie par des bactéries méthanogène. Ce processus est effectué dans les digesteurs en l'absence d'oxygène, elles produisent du biogaz composé majoritairement de méthane(CH₄) qui est un gaz naturel combustible nous pouvons le utiliser dans la vie quotidien.

Dans ce travail, nous avons produit du biogaz en utilisant un digesteur continu d'une capacité de 4m³ et Après la purification du biogaz, Nous avons utilisé le méthane produit pour faire fonctionner le générateur pour produire de l'électricité. Les résultats sont très encourageants. Où nous avons produit de l'électricité et couvrir le besoin quotidien de l'individu algérien en électricité en utilisant 1m³ de biogaz provenance de notre digesteur.

Mots Clés: Déchets organique; Digestion anaérobie; Digesteur continu; Biogaz; Production d'électricité.

Abstract:

Anaerobic digestion is a natural process of transforming organic matter into energy by methanogenic bacteria. This process is performed in the digesters in the absence of oxygen, they produce biogas composed mainly of methane (CH₄) which is a combustible natural gas we can use it in everyday life.

In this work, we produced biogas using a continuous digester with a capacity of 4m³ and after the biogas purification; we used methane produced to run the generator to produce electricity. The results are very encouraging, where we have to produce electricity and cover the daily needs of the Algerian individual in electricity using 1m³ of biogas from our digester.

Keywords: Organic waste; Anaerobic digestion; Continuous digester; Biogas; Electricity production.

ملخص :

الهضم اللاهوائي هو عملية طبيعية لتحويل المواد العضوية إلى طاقة بواسطة بكتيريا ميثانوجينية. يتم تنفيذ هذه العملية في أجهزة الهضم في غياب الأكسجين ، فإنها تنتج الغاز الحيوي يتكون أساسا من الميثان (CH₄) وهو غاز طبيعي قابل للاشتعال يمكننا استخدامه في الحياة اليومية.

في هذا العمل ، أنتجنا الغاز الحيوي باستخدام جهاز هضم مستمر بسعة 4 م³ وبعد تنقية الغاز الحيوي ، استخدمنا غاز الميثان المنتج لتشغيل المولد لإنتاج الكهرباء. النتائج مشجعة للغاية ، حيث يتعين علينا إنتاج الكهرباء وتغطية الاحتياجات اليومية للفرد الجزائري في الكهرباء باستخدام 1 م³ من الغاز الحيوي من هضم لدينا.

الكلمات الرئيسية: النفايات العضوية. الهضم اللاهوائي. هضم مستمر. الغاز الحيوي. توليد الكهرباء.