

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

UNIVERSITE AHMED DRAIA

-ADRAR-



جامعة أحمد دراية- أدرار

Année / 2021

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département des Sciences de la Matière

Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme de Master en

Chimie

Option : Chimie de l'Environnement

Thème

Présenté Par :

Amélioration de rendement en méthane des palmes sèches de palmier dattier (*Phoenix dactylifera*) de la variété *H'mira* par la Co-digestion avec les déchets de camelin

Melle. Bardja Halima

et

Melle. Baali Khadidja

Devant le jury composé de :

Mr. CHERGUI Yamina	Présidente	MCB	Université Ahmed Draia-Adrar
Mr. DJAAFRI Mohammed	Rapporteur	MRB	URERMS d'Adrar, CDER Alger
Mr. KALLOUM Slimane	Co-Rapporteur	Pr	Université Ahmed Draia-Adrar
Mr. SLIMANI Said	Examineur	MCB	Université Ahmed Draia -Adrar

Année Universitaire 2020/2021



شهادة الترخيص بالإيداع

DJAAFRI Mohammed

انا الأستاذ:

المشرف مذكرة الماجستير.

الموسومة بـ :

Amélioration de rendement en méthane des palmes sèches de palmier dattier (*Phoenix Dactylifra*. L) de la variété *H'mira* par la Co-digestion avec les déchets de camelin

من انجاز الطالب(ة): BARDJA Halima

و الطالب(ة): BAALI Khadidja

كلية : FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE.....

القسم : DEPARTEMENT SCIENCE DE LA MATIERE.....

التخصص: Chimie de l'environnement

تاريخ تقييم / مناقشة: 17/06/2021

أشهد ان الطلبة قد قاموا بالتعديلات والتصحيحات المطلوبة من طرف لجنة التقييم / المناقشة، وان المطابقة بين النسخة الورقية والإلكترونية استوفت جميع شروطها. ويامكانهم إيداع النسخ الورقية (02) والأليكترونية (PDF).

- امضاء المشرف:

Djaafri Mohammed

ادرار في : 08/07/2021

مساعد رئيس القسم:

قوبلي محمر
مساعد رئيس قسم علوم المادة مكلف بالتدريس والتعليم في التدرج



Remerciements

En premier lieu, nous tenons à remercier notre Allah, pour le courage et la force qu'il nous a donné pour effectuer ce travail. Au moment d'achever ce modeste travail, Nous remercions profondément le directeur du mémoire « ***Dr. Djaafri Mohammed*** » ainsi que notre Co-promoteur « **Pr. Kalloum Slimane** » Qui nous a encouragés à poursuivre et réalisé ce travail.

Nous tenons à remercier Mr le directeur de l'Unité de Recherche en Energie Renouvelable dans le Milieu Saharien-Adrar (URER-MS) **Dr. Mouhadjer Samir** et tous les employeurs de cet établissement et Nous remercions également **Dr Kaidi kamel, Mme Bella soumia et Melle Salem Fethya** ainsi que toutes les élément de l'équipes bioconversion de l'unité de recherche URERMS d'Adrar pour leurs hospitalité, disponibilité et leurs orientations

Enfin, nous tenons à manifester notre reconnaissance à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce présent travail.

Dédicace

Je dédie ce travail :

A mon père et ma mère, Source

de ma réussite et de mon bonheur,

A ma grand-mère et mon grand-père,

A l'homme de ma vie : mon fiancé « Boufeldja »,

A mes sœurs et mes frères « Fatima; Soad ; Safia ;

Allal ; Mohammed ; Lhcn ; Houcine ;

Oussama et ma tante 'fatima' »,

A tous les membres de ma famille,

A toutes mes amies ,

A tous mes enseignants !

Halima

Dédicace

Je dédie ce travail :

A mon père et ma mère, Source

de ma réussite et de mon bonheur,

A ma grand-mère et mon grand-père,

A l'homme de ma vie : mon fiancé « Abd Alkader »,

A mes frères et mes sœurs « Noura ; Abd Alsalam ;

Manel et chahra ; » et ma chère amie Fatiha,

A tous les membres de ma famille,

A toutes mes amies,

A tous mes enseignants !

Khadija

Résumé

L'objectif de ce travail est d'évaluer l'effet de la co-digestion des palmes sèches (PS) de palmier dattier (*Phoenix dactylifera*) de la variété de *H'mira* avec les déchets de camelin (DC) sur le rendement en méthane. La digestion anaérobie a été effectuée au niveau de six digesteurs en triple fonctionnement à des température mésophiles 37°C pendant 26 jours avec un rapport inoculum : substrat de 2 :1. Les six digesteurs contiennent les proportions de cosubstrats suivantes : (100% PS) ; (25%PS+75%DC); (50%PS+50%DC) ; (75%PS+25%DC) et (100%DC) plus un sixième digesteur qui ne contient que de l'inoculum comme blanc . Les résultats obtenus démontrent un taux de biodégradabilité important pour les réacteurs contenant les palmes sèches avec les différentes proportions. Une faible biodégradabilité a été enregistrée avec les DC seuls. Une bonne cinétique du processus de digestion anaérobie a été enregistrée pour tous les réacteurs dès le début de la digestion avec un rapport AGV/TAC qui ne dépasse pas les 0.18. Le bon rendement en méthane estimé de 140 ± 1.5 ml de CH_4/g MO a été obtenu avec le réacteur qui contient 100% PS. La bonne proportion du cosubstrat a été celle de (50%PS+50%D C), elle donne le meilleur rendement en méthane (105 ± 1.5 ml de CH_4/g MO) en comparaison avec les autres proportions de cosubstrat. Le faible rendement en méthane (35.5 ± 1.5 ml de CH_4/g) a été obtenu avec le réacteur qui contient 100%DC. Ces résultats confirment que la co-digestion est bénéfique pour les déchets de camelin mais il n'affecte pas les palmes sèches. Il est important de suggérer d'autre technique afin d'améliorer le rendement en méthane à travers ces déchets sahariens.

Mots clés : Digestion anaérobie, co-digestion, biomasse sahariens, variété de *H'mira*, palmes sèches, palmier dattier, déchets de camelin.

ملخص

الهدف من هذه المذكرة هو تقييم تأثير الهضم المشترك للجريد الجاف للنخيل من صنف الحميرة مع مخلفات الإبل على محصول الميثان. تم إجراء الهضم اللاهوائي في ستة هاضمات ثلاثية تعمل عند درجة حرارة 37 درجة مئوية لمدة 26 يوماً مع نسبة لقاح: ركيزة 2:1. تحتوي الهاضمات الستة على النسب التالية من الركائز (100% جريد) (25% جريد + 75% مخلفات الإبل)، (50% جريد + 50% مخلفات الإبل)، (75% جريد + 25% مخلفات الإبل)، (100% مخلفات الإبل) بالإضافة إلى هضم سادس يحتوي فقط على اللقاح. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها نسبة عالية من التحلل البيولوجي للمفاعلات التي تحتوي على النخيل الجاف بنسب مختلفة. كما تم تسجيل انخفاض التحلل البيولوجي مع مخلفات الإبل وحدها. تم أيضاً تسجيل أداء جيد لعملية الهضم اللاهوائي لجميع المفاعلات من بداية الهضم مع نسبة AGV / TAC التي لا تتجاوز 0.18. تم الحصول على ناتج عائد الميثان الأعلى المقدر بـ 140 ± 1.5 ml de CH_4/g MO مع المفاعل الذي يحتوي على ركيزة (100% جريد). أما بالنسبة لأحسن نسبة ركيزة مشتركة هي (50% جريد + 50% مخلفات الإبل)، حيث أعطت أفضل عائد من الميثان (105 ± 1.5 ml de CH_4/g MO) مقارنة بالنسب الأخرى من الركيزة المشتركة. تم الحصول على عائد الميثان المنخفض (35.5 ± 1.5 ml de CH_4/g) مع المفاعل الذي يحتوي على (100% مخلفات الإبل). تؤكد هذه النتائج أن الهضم المشترك مفيد لنفايات الإبل ولكنه لا يؤثر على الجريد الجاف. من المهم اقتراح تقنية أخرى لتحسين إنتاج الميثان من خلال هذه النفايات الصحراوية.

الكلمات المفتاحية: الهضم اللاهوائي، الهضم المشترك، الكتلة الحيوية الصحراوية، صنف الحميرة، الجريد الجاف، نخيل التمر، فضلات الإبل.

Sommaire

<u>Remerciements</u>	i
<u>Résumé</u>	v
<u>Liste des figures</u>	x
<u>Liste des photos</u>	xi
<u>Liste des Tableaux</u>	xii
<u>Liste d'Abréviation</u>	xiii
<u>Introduction générale</u>	1
CHAPITRE I : Etude bibliographique	
<u>I.1 Introduction</u>	3
<u>I.2. Biomasse</u>	3
<u>I.2.1. Définition</u>	3
<u>I.2.2. Ressources de la biomasse</u>	3
<u>I.2.3. Les quatre générations de la biomasse</u>	4
<u>I.2.4. La biomasse lignocellulosique</u>	6
<u>I.2.4.1. La composition et la structure de la biomasse lignocellulosique</u>	6
a. Cellulose	7
b. Hémicellulose	7
c. Lignine	7
<u>I.2.5. Généralité sur les palmiers dattier (PHOENIX DACTYLIFERA L)</u>	8
<u>I.2.5.1. La variété H'mira de la région d'Adrar</u>	9
<u>I.2.5.2. Les déchets lignocellulosique des palmiers dattier</u>	9
<u>I.2.5.3. Les déchets des palmiers dattiers pour la bioénergie</u>	9
a. Bioéthanol	10
b. Biohydrogène	10
c. Biométhane	11
<u>I.3. La Digestion anaérobie</u>	11

<u>I.3.1. Définition</u>	11
<u>I.3.2. Etape de la méthanisation</u>	12
<u>I.3.2.1. Hydrolyse</u>	13
<u>I.3.2.2. Acidogénèse</u>	13
<u>I.3.2.3. Acétogénèse</u>	13
<u>I.3.2.4. Méthanogène</u>	13
<u>I.4. Les différents paramètres influençant la méthanisation</u>	14
<u>I.4.1. Température</u>	14
<u>I.4.2. pH</u>	14
<u>I.4.3. L'absence d'oxygène</u>	14
<u>I.4.4. Rapport C / N</u>	15
<u>I.4.5. Brassage</u>	15
<u>I.4.6. Pression partielle en hydrogène</u>	15
<u>I.4.7. Humidité</u>	16
<u>I.4.8. Temps de rétention hydraulique</u>	16
<u>I.4.9. Type du substrat</u>	16
<u>I.5. Amélioration de la digestion anaérobie</u>	17
<u>I.5.1. Les différents types Prétraitements</u>	17
<u>I.5.2. La co-digestion</u>	21
<u>I.6. Le biogaz</u>	21
<u>I.6.1. Définition et composition</u>	21
<u>I.6.2. Valeur énergétique</u>	22
<u>I.6.3. Purification du biogaz</u>	23
<u>I.7. Les avantages et les inconvénients de digestion anaérobie</u>	24
<u>I.8. Conclusion</u>	25
CHAPITRE II : Matériels et méthodes	
<u>II.1.Introduction</u>	27

<u>II.2. Origine et caractérisation du substrat utilisé</u>	27
<u>II.3. Le prétraitement physique du substrat</u>	27
<u>II.4. Description du digesteur et dispositif utilisé</u>	28
<u>II.5. Méthodes d'analyses</u>	29
<u>II.5.1. Détermination de taux la matière sèche (MS)</u>	29
<u>II.5.2. Détermination de la teneur en matière organique (MO)</u>	30
<u>II.5.3. Paramètres du contrôle du processus de digestion anaérobie</u>	31
<u>II.5.3.1. PH</u>	31
<u>II.5.3.2. Détermination de la DCO</u>	32
<u>II.5.3.3. Détermination de l'AGV</u>	34
<u>II.5.3.4. Détermination de TAC</u>	36
<u>II.5.3.5. Volume de biogaz produit</u>	36
<u>II.5.4. Inflammabilité du biogaz</u>	37
<u>II.6. Conclusion</u>	38
 CHAPITRE III : Résultats et discussion	
<u>III.1. Introduction</u>	39
<u>III.2. Enquête sur terrain</u>	39
<u>III.2.1. Description des différents déchets lignocellulosiques du palmier dattier de la variété <i>H'mira</i></u>	39
<u>III.2.2. Les palmes sèches et les déchets de camelin (substrat de la présente étude)</u>	41
<u>III.3. Caractérisation de substrat de la présente étude</u>	42
<u>III.4. Les paramètres de fonctionnement au début et à la fin de digestion anaérobie</u>	42
<u>III.4.1. Le pH</u>	42
<u>III.4.2. Biodégradabilité du substrat</u>	43
<u>III.4.2.1. la DCO</u>	43
<u>III.4.3. Les AGV</u>	45
<u>III.4.4. Le TAC</u>	46
<u>III.4.5 Rapports AGV/TAC</u>	47

<u>III.5. Production de biogaz</u>	48
<u>III.5.1. Production quotidienne en méthane</u>	48
<u>III.5.2. Production accumulative en méthane</u>	49
<u>III.6. Conclusion</u>	50
<u>CONCLUSION GENERALE</u>	51
<u>REFERENCES</u>	52

Liste des figures

Figure 1: Les différentes sources de la biomasse.....	4
Figure 2: Constituants de la matière lignocellulosique et les résultats schématiques du procédé.. ..	7
Figure 3: Principales étapes de la digestion anaérobie et leurs groupes de microorganismes respectifs.....	12
Figure 4: Equivalence énergétique de 1m ³ de biogaz à 50% CH ₄ par rapport à d'autres sources d'énergie	Erreur ! Signet non défini.
Figure 5: Le pH au début et à la fin de DA en fonction de rapports de cosubstrats	Erreur ! Signet non défini.
Figure 6: DCO au début et à la fin de DA en fonction des rapports de cosubstrats.....	44
Figure 7: Valeurs des AGV au début et à la fin de digestion pour tous les réacteurs	45
Figure 8: TAC au début et à la fin en fonction de cosubstrat	46
Figure 9: Rapport de AGV/TAC en fonction du rapport de cosubstrat	47
Figure 10: Production quotidien du CH ₄ en fonction de temps	49
Figure 11: Production accumulatif du CH ₄ en fonction de temps.....	50

Liste des photos

Photo 1: Palmier dattier (<i>Phoenix dactylifera</i> L).	8
Photo 2: Palmes sèches.....	27
Photo 3: Déchets camelin.	27
Photo 4: Le macro et le micro broyeur.....	28
Photo 5: Digesteur utilisé remplis par l'inculcume et substrat.....	29
Photo 6: Les digesteurs dans un bain maris	29
Photo 7: L'étuve utilisé et réglée à 105°C	30
Photo 8: Centrifugeuse.....	33
Photo 9: Filtration d'échantillon après centrifugation	33
Photo 10: Les échantillons après la dilution.....	33
Photo 11: Préparation des tubes prêts à l'emploi.....	33
Photo 12: Thermoréacteur	34
Photo 13: Le chauffage du liquide.	35
Photo 14: Dispositif de mesure du volume du biogaz produit.	37
Photo 15: Teste d'inflammabilité du biogaz produit.	38
Photo 16: Les palmes de palmier dattier.	40
Photo 17: Les pétioles de palmier dattier.	40
Photo 18: Les spathes de palmier dattier.....	41
Photo 19: Le fibrillum de palmier dattier.....	41
Photo 20: Le régime de palmier dattier.	41

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Rendement de production de biogaz à partir de différents types de matière organique.....	17
Tableau 2 : Les composants du biogaz et leurs pourcentages	22
Tableau 3 : Les avantages et les inconvénients de digestion anaérobie.....	24
Tableau 4 : Le rapport de MO et MS au début et à la fin la digestion anaérobie.	42
Tableau 5 : Le taux de biodégradabilité.....	44

Liste d'Abréviation

TAC	Titre Alcalimétrique Complète
AGV	Acide Gras Volatile
C/N	Rapport Carbone / Azote
DCO	Demande Chimique en Oxygène
J	Jour
GES	gaz à effet de serre
M	Masse
MS	Matière Sèche
MO	Matière Organique
MM	Matière Minéral
V	Volume
MV	Matière Volatile
DC	Déchet de camelin
PS	Palmer sache

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale

L'épuisement des réserves mondiales de pétrole et de gaz naturel, leurs prix qui augmentent sans cesse et l'insécurité de l'approvisionnement à long terme, mettront la situation énergétique mondiale en rupture avec les objectifs du développement durable et provoquent une demande grandissante pour de nouvelles sources d'énergie renouvelables et non polluantes [1].

Par ailleurs, l'une de ces ressources renouvelables est la biomasse. Ce mot regroupe toutes les matières organiques d'origine végétale ou animale, soit pour la consommation humaine ou comme des déchets d'agricultures et les industries agroalimentaires [2]. Ces déchets ne sont pas utilisés dans une grande gamme des activités dans le monde et la plupart sont détruite et brules seulement pour le nettoyage de l'espace, ce qui contribue de manière significative à la pollution de l'environnement. L'exploitation de ces déchets par les technologies disponibles aujourd'hui permet de protéger l'environnement et de produire l'énergie renouvelable sous forme de bioénergie [1]

En outre, les régions désertiques d'Algérie occupent plus de 80 % de sa superficie totale, ce qui constitue un environnement convient à la croissance et à la production de palmiers dattiers en raison de ses caractéristiques climatiques. La superficie occupée par la culture du palmier dattier est de 160 mille hectares, ce qui représente actuellement plus de 18 millions de palmiers, et la production de dattes dépasse 700 mille tonnes à partir de 190 types de palmiers différents [3]. Ces déchets de palmier dattier sont riche en sucre et on matière lignocellulosique en raison de leur origine végétale ce que offre la possibilité de produire la bioénergie en utilisant des micro-organismes dans les processeurs de la digestion anaérobique. Ces déchets donnent une valeur importante dans la production des biocarburants. La présente étude a été réalisé afin d'évaluer l'effet de la co-digestion sur deux substrats sahariens représentées par les déchets de chameau et les palmes sèches des palmiers dattier.

Ce mémoire est divisé en trois chapitres principaux : le premier chapitre sous forme d'une étude bibliographique sur les énergies renouvelables, la biomasse lignocellulosique, le palmier dattier *Phoenix Dactylifera L* " variété *H'mira* " et les déchets de camelin ainsi que la technologie de digestion anaérobie. Le deuxième chapitre représente une investigation sur terrain et au laboratoire avec le matériel utiliser ainsi que les différentes techniques d'analyses. Le troisième chapitre regroupe les résultats obtenus avec la discussion. Enfin, Le mémoire et terminé par une conclusion générale.

CHAPITRE I :

Etude bibliographique

CHAPITRE I : Etude bibliographique**I.1 Introduction**

Par définition, la biomasse regroupe toutes les matières organiques vivantes peuvent être transformées en chaleur, en biocarburants, ou encore en électricité en utilisant des technologies différentes. Le bois, les plantes, les déchets agricoles et les céréales sont des biocarburants valorisés pour produire de l'énergie. Naturelle et renouvelable, c'est l'énergie la plus ancienne exploitée par l'Homme, avec le bois brûlé pour se chauffer. Ce chapitre consiste une synthèse bibliographique visant à développer, dans une première partie, une discussion sur la biomasse, sa définition, ses différentes sources et générations. Il se concentre sur la biomasse lignocellulosique et surtout celui du palmier dattier qui constitue le substrat utilisé dans la présente étude. Il discute sa définition, sa description morphologique, sa distribution dans la région d'Adrar. La deuxième et la troisième parties sont consacrées à la digestion anaérobie sa définition, ses étapes, les facteurs influençant la digestion anaérobie, les différentes techniques d'amélioration de la digestion anaérobie comme la co-digestion et les différents types de prétraitement et se termine par les produits de la digestion anaérobie comme le biogaz.

I.2. Biomasse**I.2.1. Définition**

La biomasse se définit comme « la fraction organique » des produits, déchets et résidus provenant des origines végétales et/ou animales. Toutes ces matières organiques peuvent devenir une source d'énergie soit par combustion directe (ex : bois énergie), soit après transformations biochimique comme la méthanisation pour la production du biogaz ou après de nouvelles transformations chimiques (biocarburant) [4] [5].

I.2.2. Ressources de la biomasse

Les ressources de la biomasse se diffèrent selon le rôle de l'utilisation, selon leur nature et leurs composants (Figure 1):

- Les déchets agricoles qui regroupent les produits et déchets de l'agriculture : résidus de cultures (pailles de canne, etc.) [6].
- Le bois tels que les copeaux de bois, les déchets solides, les produits et les déchets de la sylviculture etc... [6].
- Les déchets urbains comme les déchets ménagers et les déchets industriels comme les boues d'épuration, le carton, les résidus textiles etc...[6].

- Les déjections animales qui peuvent être converties en fibres ou d'autres produits chimiques industriels, y compris les biocarburants.
- La culture et les résidus forestière, (tels que les arbres morts, les branches et les souches d'arbres).



Figure 1: Les différentes sources de la biomasse.[4].

I.2.3. Les quatre générations de la biomasse

La croissance démographique et l'amélioration du pouvoir d'achat dans plusieurs zones économiques du monde contribuent à une consommation accrue d'énergie fossile et à une plus grande hausse des prix de l'énergie. Les préoccupations face au (changement climatique) incitent, par ailleurs, à réduire l'utilisation de ce type d'énergie afin de contribuer à la diminution des émissions de gaz à effet de serre (GES) d'origine anthropique. Ces deux mouvements ont stimulé, depuis une dizaine d'années, la recherche de sources d'énergies alternatives et renouvelables comme le vent, le soleil ou la biomasse. Les biocarburants constituent l'une de ces alternatives qui peut remplacer les énergies fossiles. Par évolution, les biocarburants sont classés en quatre générations différentes [7].

1^{er} génération :

Les matières premières pour biocarburants de premières générations composées essentiellement de produits alimentaires comme les graines oléagineuses, la canne à sucre et d'autres huiles contenant des aliments et cultures destinées à l'alimentation animale [8].

Les deux filières principales de biocarburants liquides sont aujourd'hui la production de bioéthanol obtenue grâce à la fermentation de produits végétaux (blé, maïs, betterave, canne à sucre, etc.) et de biodiesel à partir d'huiles (dont les principales sont celles de colza, tournesol, soja et palme). Il existe également une filière dédiée au biogaz (bio méthane) qui peut remplacer le gaz naturel ; la filière basée sur le charbon de bois est quant à elle, très peu utilisée [7].

Les produits qui peuvent être obtenus grâce à cette génération sont : Biodiesel, Bioéthanol et Biobutanaol [8].

2^{ème} génération :

Les problèmes associés aux biocarburants de première génération peuvent être résolus par la production de biocarburant produit à partir de matières premières végétales non alimentaires. Les matières lignocellulosique de cette génération peuvent être classés en quatre groupes en fonction du type de ressource, le premier groupe englobe les résidus forestiers, le deuxième contient les déchets solides municipaux, alors que le troisième groupe renferme les vieux papiers et le dernier groupe comprend les ressources en résidus de cultures [12]. Les boues et les fumiers de bétail aussi considérés comme des résidus non comestibles peuvent être ajoutés à cette génération [13]. Les cultures énergétiques spécialisées cultivées dans les terres arables, possèdent une productivité énergétique plus élevée que les cultures destinées aux biocarburants de première génération (et coproduits) produites sur les mêmes terres [9].

Les produits qui peuvent être obtenus grâce à cette génération sont : Biodiesel, Bioéthanol, Biobutanaol, Biogaz et Gaz de synthèse [8].

3^{ème} génération :

Les espèces microbiennes telles que les levures, les champignons et les algues peuvent être utilisées comme une ressource potentielle pour la production de biocarburants. Récemment, les algues ont attiré un intérêt important comme alternative matière première de biocarburant en raison de leur photosynthèse plus élevée et taux de croissance par rapport à n'importe quelle plante terrestre. Les algues peuvent contenir jusqu'à 70% de lipides sur une base de poids sec et peut croître dans un milieu lipide utilisant différents flux d'eaux usées entraînant une réduction de la demande en eau douce [14]. Il y'a la possibilité de produire une huile microbienne à partir de riz traité à l'acide sulfurique, en décomposant la paille en cultivant des micro-organismes comme (le trichosporon fermenté) et sur la base des résultats, ils ont conclu que cet organisme est capable de se développer et de profiter de la décomposition de la paille de riz pour l'accumulation de lipides dans la biomasse cellulaire à haut débit. Il existe également une production microbienne de biocarburant à partir de déchets

de mélasse, de sorte que la levure puisse bien se développer sur la biomasse lignocellulosique prétraitée efficacement promouvoir l'accumulation de graisse [10].

Les produits qui peuvent être obtenus grâce à cette génération sont : Biodiesel, Bioéthanol, Biobutanaol, Gaz de synthèse, Biogaz (Biohydrogène et Bio-Méthane) [8].

4^{ème} génération : Le biocarburant de quatrième génération (FGB) utilise des algues génétiquement modifiées (GM) tel que les microalgues, les levures les champignons et les cyanobactéries sont utilisés comme sources. Même si le biocarburant à base d'algues GM est une alternative bien connue aux combustibles fossiles, les risques potentiels pour l'environnement et la santé sont toujours très préoccupants [15]. La capacité des micro-organismes à convertir le CO₂ en carburant par photosynthèse. Les multiples avantages de microalgues telles que son taux de croissance élevé et sa teneur en huile et la faible complexité structurelle améliorent leurs nombreuses demandes [16]. En tant que les bactéries procaryotes photosynthétiques, cyanobactéries, ainsi que microalgues sont considérés comme des usines cellulaires dirigées par la lumière du soleil dans lesquelles le carbone de dioxyde et l'eau sont convertis en sucres et éventuellement en divers produits biochimiques [17]. Certaines technologies de quatrième génération comprennent la pyrolyse, la gazéification et la valorisation. L'objectif général de ces modifications est pour améliorer le rendement de HC. Les produits obtenus à partir de cette génération est les mêmes produits que la 3^{ème} génération.

I.2.4.La biomasse lignocellulosique

La biomasse lignocellulosique est la ressource renouvelable la plus abondante qui pourrait répondre, aux besoins énergétiques globaux annuels. Elle est aussi la source de carbone renouvelable la plus abondante de la planète. La plupart des combustibles et des produits chimiques nécessaires pour la société pourraient être obtenus à partir des cultures végétales riches en matières celluloses, en utilisant tous les moyens possibles pour les exploiter dans le domaine de la bioénergie dans un contexte de durabilité [11].

I.2.4.1. La composition et la structure de la biomasse lignocellulosique

La matière lignocellulosique est le constituant principal de la paroi cellulaire des plantes (figure 2). Elle est constituée de trois éléments majeurs qui sont la cellulose, l'hémicellulose et la lignine. À l'intérieur de la biomasse lignocellulosique, ces trois macromolécules s'entremêlent et forment une structure tridimensionnelle complexe et très résistante, maintenue par des liaisons d'hydrogène et des liaisons covalentes, qui résiste aux attaques microbiennes et qui confère de la rigidité des plantes. La proportion et la nature de chacune des macromolécules sont en fonction de l'origine botanique de la matière [18].

a. Cellulose

La cellulose est une molécule linéaire non ramifiée dont la concentration est la plus abondante (35 à 50 % de la biomasse) donc c'est la composante principale de déchets lignocellulosique. Elle est constituée de milliers de monomères de glucoses liés par des liaisons osidiques (β 1-4) formant ce polymère. Environ 80 molécules de cellulose s'associent par des liaisons hydrogène pour former des micro fibrilles. Un grand nombre de micro fibrilles entrelacés forme une fibrille de cellulose. L'hydrolyse de la cellulose conduit à la production des sucres monomères fermentescibles (cellubiose, glucose et xylose) [19].

b. Hémicellulose

L'hémicellulose est un autre composant des parois cellulaires des plantes, elle a une structure aléatoire, amorphe et faible. Elle représente presque 33% de la biomasse lignocellulosique [19]. Elle a un groupe de glucides avec une structure à chaîne ramifiée et un faible degré de polymérisation (DP 100-200) et peut être représentée par la formule générale $(C_5H_8O_4)_n$ (classe, 1998, page 84). Il existe des différences significatives dans la composition et la structure de l'hémicellulose entre les différentes biomasses, cependant la plupart des hémicelluloses contiennent les résidus de sucre simples. L'hémicellulose a tendance à produire plus de gaz et moins de goudron que la cellulose. Elle est soluble dans les solutions alcalines faibles et peut être facilement hydrolysé par l'acide ou la base diluée [20].

c. Lignine

La lignine est un composant majeur de la biomasse (18 à 25 %), est un polymère insoluble composé d'unités phénylpropane. La lignine est un complexe hautement ramifié de phénylpropane et fait partie intégrante de la paroi cellulaire secondaire des plantes. C'est l'un des polymères organiques les plus abondants sur terre. Elle est l'agent de cimentation des fibres de cellulose contenant des cellules adjacentes, les motifs monomères dominants dans les polymères sont les cycles benzéniques [20].

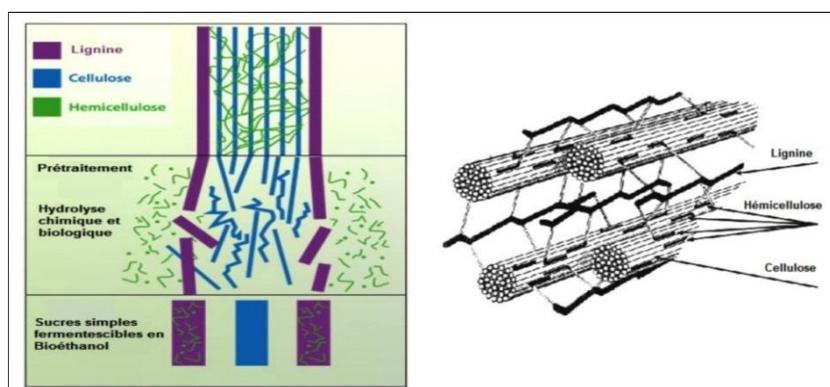


Figure 2: Constituants de la matière lignocellulosique et les résultats schématiques du procédé. [19].

1.2.5. Généralité sur les palmiers dattier (PHOENIX DACTYLIFERA L)

Le nom scientifique du palmier dattier est *Phoenix dactylifera* L, provient du mot "Phoenix " qui signifie dattier chez les phéniciens, et *dactylifera* dérive du terme grec "dactylos" signifiant doigt, allusion faite à la forme du fruit [21]. Le palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.) est cultivé dans les régions arides et semi-arides sur 1,34 million d'hectares et produit 8,17 millions de tonnes de fruits à travers le monde [22]. Le monde arabe compte plus de 84 millions de palmiers dattiers dont la majorité en Égypte, en Irak, en Arabie saoudite, en Algérie, au Maroc, en Tunisie, aux Émirats arabes unis et en Iran [23].

Classification du palmier dattier :

La place du palmier dattier (Photo 1) dans le règne végétal est rappelée ci-dessous [24] :

Groupe : Spadiciflores.

Ordre :Palmales.

Familles : Palmacées.

Sous famille : Coryfoïdées.

Tribu : Phoenicées.

Genre : Phoenix.

Espèce : Phoenix dactylifera L.

Le genre Phoenix comporte au moins douze espèces, dont la plus connue est dactylifera et dont les fruits " dattes " font l'objet d'un commerce international important [25].



Photo 1: Palmier dattier (Phoenix dactylifera L).

I.2.5.1. La variété H'mira de la région d'Adrar

En Algérie les cultivars de dattes sont nombreux et sont estimés à plus de 800 cultivars [26]. Ces ressources génétiques sont très mal exploitées à l'exception de Deglet nour et à moindre degré, Ghars, Degla beida et Mech degla qui présentent une importance économique [27]. Par contre le secteur phoénicicole de la région d'Adrar fournit chaque campagne un tonnage très élevé de dattes communes environ 675 milles quintaux (DSA 2008).

La variété *H'mira* représentant 42.81% du total des palmiers de la région d'Adrar, génère une quantité de déchet annuelle estimée de 22.961,68 tonnes dont les palmes sèches représentent 52,64% soit 12.063,20 tonnes. Les folioles qui sont le principal constituant des palmes sèches contiennent un taux de 81.7% de matières organiques (MO) et 90% de composé lignocellulosique. La capacité théorique de rendement en méthane des folioles est estimée de 492 ml de CH₄/g de MO [28].

I.2.5.2. Les déchets lignocellulosique des palmiers dattier

Le palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L) est l'une des cultures les plus prospères et les plus vitales de la région du Moyen-Orient ainsi que dans d'autres régions arides et semi-arides du monde. La production annuelle mondiale de dattes était d'environ 8,2 millions de tonnes en 2017 [29].

Chaque année le palmier dattier génère des tonnes de déchets de biomasse, ces déchets sont composés principalement de palmes, de régimes et du fibrilium (lif), c'est à dire trois catégorie ligneux évalués à 25 kg/palmier/an, dont l'exploitation promet de contribuer au développement durable des bio fineries et ils sont riches en cellulose en hémicelluloses et en lignine. Une grande partie de ces déchets est convertie en compost et peut être utilisée dans les arts et l'artisanat traditionnels [30]. De plus, les déchets de taille de palmier dattier en générale sont sèche caractérisés par une teneur élevée en solides volatils et une faible teneur en humidités. Ces facteurs rendent la biomasse du palmier dattier une excellente ressource de valorisation énergétique des déchets et la production de biogaz dans les usines de digestion anaérobie par Co-digestion avec des boues d'épuration, des déchets animaux et / et des déchets alimentaires [31,32].

I.2.5.3. Les déchets des palmiers dattiers pour la bioénergie

Aujourd'hui, le développement de la biomasse est en plein essor en réponse à l'engagement planétaire de réduire l'utilisation de combustibles fossiles (pétrole, charbon, gaz, etc.). Les technologies modernes permettent de convertir la biomasse en hydrocarbure en quelques heures, faisant de la biomasse un substitut aux combustibles fossiles [33].

Une équipe de recherche sur les énergies renouvelables a tiré une série de conclusions sur les avantages de cette source d'énergie. D'abord, il est mis en relief l'existence d'une biomasse extraite à partir de sept sous-produits phoénicoles de palmiers dattiers (*Phoenix dactylifera* L.) entre autres, la palme, le rachis, le pétiole, la spathe et le fibrilium. Le palmier dattier est naturellement sec par régénération naturelle de la biomasse et contient l'humidité à faible concentration (environ 7%). Ce critère est très avantageux pour le stockage et la conversion thermique de la biomasse. Par ailleurs, l'autre force de cette biomasse réside dans le rapport de la concentration des cendres des sous-produits (5%) par rapport aux biocombustibles solides conventionnels [34].

Parmi les produits extraits aujourd'hui de cette biomasse, il y a le bioéthanol, biohydrogène et le bio méthane.

a. Bioéthanol

Le bioéthanol est considéré comme une énergie renouvelable. Les matières premières végétales (ou biomasse) se renouvelant chaque année. Il permet également de diminuer les émissions de gaz à effet de serre, par rapport aux carburants fossiles. En effet, les matières agricoles utilisées pour sa fabrication absorbent le CO₂ en quantité importante, à un niveau bien plus conséquent que les rejets dans l'atmosphère du superéthanol-E10, carburant qui contient un fort taux de bioéthanol son impact écologique est donc important. Il faut bien différencier le bioéthanol du biodiesel, l'un étant incorporé à l'essence tandis que le second est destiné au gazole [35].

Les déchets de palmier dattes à part leur grande richesse en lignocellulosique et leur pouvoir de conservation relativement longue peuvent constituer un substrat de choix pour produire de nombreuses substances à forte valeur ajoutée tel que l'éthanol [36]. Le processus pour la production d'éthanol à partir de matériaux lignocellulosique, il est effectué en quatre étapes, à savoir, comme prétraitement, hydrolyse, fermentation et séparation / distillation de produit [37].

b-Biohydrogène

L'hydrogène est l'un des carburants potentiels les plus propres pour l'avenir, car il s'agit d'une alternative prometteuse face aux carburants fossiles classiques, qui sont utilisés sans discernement et nuisent l'environnement. Le biohydrogène est également respectueux de l'environnement car il libère uniquement de la vapeur d'eau et de l'énergie pendant la combustion. L'hydrogène a également la plus haute teneur en énergie, 142kj/g ou 61000 Btu/lb de tous les combustibles connus. Il est utilisé comme carburant pour un moteur à combustion interne ou comme carburant pour les piles à combustible. Cependant, les plus

gros utilisateurs de l'hydrogène sont les industries des engrais et du pétrole avec respectivement 50 % et 37 % de la consommation [38]. Actuellement, les procédés de Production de biohydrogène les plus populaires largement discutés et développés à l'aide de déchets organiques sont la bio fermentation, la bio photolyse et les systèmes bio électrochimiques tels que les cellules d'électrolyse microbienne [39].

Le palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.) est l'un des arbres fruitiers les plus importants du monde arabe et de certains pays voisins et représente une bonne culture commerciale pour de nombreux agriculteurs, Des rendements de l'ordre de 162 g /L de H₂ a été obtenus par la fermentation de 1kg des dattes fraîches pourries ce que considéré comme l'un des déchets de palmier dattier [40].

c-biométhane

Les déchets de palmiers dattiers sont utilisés pour la production du méthane. Les travaux de sur la bio méthane est une énergie renouvelable obtenue par la valorisation de nos déchets en un biogaz. Une fois ce gaz nettoyé de certains composants (CO₂, H₂O), il devient du bio méthane. Et le biométhane possède des propriétés similaires au gaz naturel. Il peut donc être injecté dans les réseaux et être utilisé pour le chauffage ou l'électricité [41]. En l'absence d'oxygène, la cellulose se dégrade par la communauté anaérobie et se transforme en CH₂, CO₂ et H₂O à travers un complexe microbien chaîne alimentaire [42] il est aussi devenu possible de produire du biométhane à partir de déchets de palmier dattier où les résultats montre que le biodégradabilité et coefficient de rendement en méthane de palmes sèches de palmiers dattiers atteint 33% et 133Nml CH₄/g MO respectivement [43]. En plus l'ajoute de graine de palmier dattier à les boues de traitement des eaux usées augmente significativement la production de biométhane jusqu'à 20 à 30% [44].il ya aussi beaucoup études pour la production de biométhane à partir de divers déchets de palmiers dattier pour améliorer le rendement.

I.3.La Digestion anaérobie

I.3.1. Définition

La méthanisation, ou encore appelée « digestion anaérobie » est la transformation de la matière organique en biogaz, composé principalement de méthane (CH₄) et de gaz carbonique (CO₂), par un écosystème microbien complexe fonctionnant en absence d'oxygène. En plus de ces produits, il est trouvé aussi des impuretés sous forme de traces comme l'azote (N₂) de l'hydrogène sulfuré (H₂S) et de l'ammoniac (NH₃) [45]. La méthanisation se produit

naturellement dans les marais, les lacs, les intestins des animaux et de l'homme et de manière générale dans tous les écosystèmes où la matière organique se trouve en situation anaérobie [46]. Le développement de la filière biogaz contribue à l'implantation d'entreprises et à la création d'emplois [47]

I.3.2. Etape de la méthanisation

La digestion anaérobie est souvent considérée comme un processus complexe La digestion elle-même est basé sur une réduction processus consistant en un certain nombre de réactions biochimiques se déroulant dans des conditions anoxiques [48]. La figure 3 présente l'ensemble des voies métaboliques, avec leurs groupes de micro-organismes respectifs, en 3 étapes principales : (1) l'hydrolyse et acidogènes ; (2) l'a cétogénèse ; (3) la méthanogènes [49]

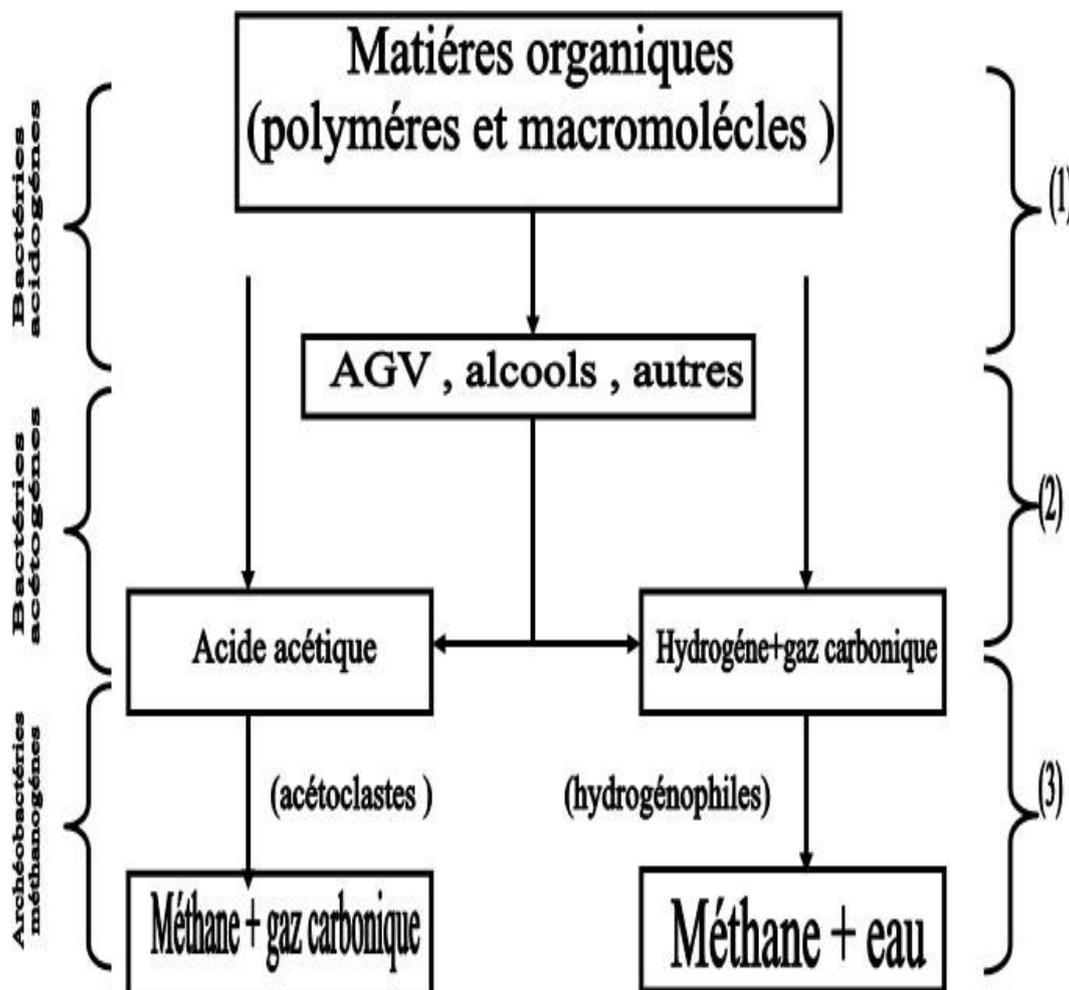


Figure 3: Principales étapes de la digestion anaérobie et leurs groupes de microorganismes respectifs[49].

I.3.2.1. Hydrolyse

Il existe Les micro-organismes dits hydrolytiques (une grande variété de bactéries ainsi que des champignons si l'étape d'hydrolyse est réalisée en présence d'oxygène) produisent des enzymes d'hydrolyse qui décomposent les particules solides et les polymères (solubles et insolubles) avec de longues chaînes carbonées qui se décomposent en petites chaînes (protéines, sucres et graisses) en composés mono et diagonaux (sucres, acides organiques, acides aminés, etc.). Une fois dissoute, la matière organique est disponible pour être assimilée par le deuxième groupe de micro-organismes, généralement appelés bactéries acides. [49]

I.3.2.2. Acidogénèse

L'acidogénèse correspond à la conversion intracellulaire des produits solubles d'hydrolyse en des autres composés tels que l'eau, le dihydrogène, le dioxyde de carbone, les Acides gras volatils, les alcools et l'ammoniac. Les AGV sont des molécules simples avec un Squelette de 1 à 6 atomes de carbone. Les sept principales types d'AGV sont les acides formique, acétique, proionique, butyrique et iso butyrique, valérique et iso valérique. Le biogaz produit au cours de cette phase, tout comme lors de l'hydrolyse, est principalement composé de CO₂ (80%) et de H₂ (20%), La production des différentes types d'AGV est conditionnée par le substrat et par la pression en H₂. L'acidogénèse des monosaccharides est présentée à travers de celle du glucose [50].

I.3.2.3. Acétogénèse

L'acétogénèse est l'ensemble des réactions qui conduit à la production d'acétate. Cette étape est réalisée par deux groupes microbiens consommant Respectivement le CO₂ et les AGV Les bactéries homoacétogènes ou acétogénèse Strictes produisent de l'acétate par la réduction du dioxyde de carbone [50].

I.3.2.4. Méthanogène

Au cours de cette dernière étape de minéralisation de la matière organique, les molécules qui possèdent un ou deux atomes de carbone sont converties en méthane Deux voies métaboliques permettent la production de méthane, à partir de l'acétate et du couple CO₂/H₂. Les microorganismes responsables sont anaérobies stricts et appartiennent au domaine des Archées.

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 du méthane [45].

I.4. Les différents paramètres influençant la méthanisation**I.4.1. Température**

La température est un facteur extrinsèque important qui affecte considérablement la reproduction et les activités des microbes anaérobies [52]. La température des différents digesteurs varie entre 8 et 65 ° C. Dans des cas normaux, la vitesse de production de gaz augmente avec l'augmentation de la température. La température de digestion peut être divisée en trois sous-pages a remarqué que lorsque la température du digesteur était maintenue à 40°C il était possible de réduire le temps de rétention de plus de 40% Généralement [51].

-1) La digestion anaérobie psychrophile (<25 °C) qui favorise souvent une activité méthanogène limitée.

-2) La digestion anaérobie mésophile (25 à 40 °C) qui représente la plage optimale pour la production de biogaz.

-3) La digestion anaérobie thermophile : (45 à 65°C), souvent associée à une production méthanogène plus importante. En effet, les processus thermophiles deviennent plus rapides, mais également plus instables et moins efficaces économiquement.

I.4.2. pH

Le pH est un paramètre essentiel car l'écosystème de la digestion anaérobie en particulier les organismes méthanogènes, sont sensibles à la variation de pH. 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. Celui-ci a également un effet indirect sur le fonctionnement du système par la modification des équilibres chimiques des acides et des bases faibles, 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 [53].

I.4.3. L'absence d'oxygène

L'oxygène est évidemment un inhibiteur (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 [54].

I.4.4. Rapport C / N

Fry (1973) déclare que les micro-organismes anaérobies utilisent le carbone pour l'énergie et l'azote pour la construction des cellules structure. La présence d'un excès de NH_4 augmentera le pH du biodigestat. un rapport C / N compris entre 20 et 30 est considéré comme optimal pour processus de digestion anaérobie [55] une valeur C / N d'au moins 25 :1 est suggéré pour une production optimale de gaz [56]. Si le rapport C/N est très élevé, les méthanogènes consommeront rapidement l'azote pour répondre leurs besoins en protéines et ne réagira plus avec la gauche sur la teneur en carbone du matériau. en conséquence, la production de gaz sera au-dessous de. en revanche, si le rapport C/N est très faible, l'azote sera libéré et accumulé sous forme d'ion ammonium (NH_4). La présence d'un excès de NH_4 augmentera le pH du biodigestat dans le digesteur et donc un pH supérieur à 8,5 commencera montrant un effet toxique sur la population de méthanogènes [57].

I.4.5.Brassage

L'agitation du digesteur n'est pas une étape essentielle du processus de digestion anaérobie. Néanmoins, il permet d'obtenir un milieu homogène, car c'est un moyen de favoriser le transport et le métabolisme thermiques et ioniques. Il permet également d'augmenter et d'éviter le contact entre les substrats a digéré et les plantes fixées. Le court-circuit dans le réacteur correspond à la libération anticipée d'une partie du substrat de la cuve car celle-ci ne suit pas le chemin habituel, et ainsi les effluents ne sont pas soumis à un traitement au méthane total [51].

I.4.6. Pression partielle en hydrogène

L'hydrogène est une molécule clé dans le processus de la digestion anaérobie [58]. 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 le H_2 au fur et à mesure de sa production [59].

I.4.7. Humidité

Pour toute activité biologique, la présence d'eau est indispensable surtout à la multiplication des microorganismes, d'après Marache [55] une humidité minimale de 60 à 70% est nécessaire à la méthanisation. de sa part Laskriet [60] a pu montrer que le taux de dilution est un facteur favorisant ; une augmentation du taux de dilution mène à une augmentation importante du volume du biogaz produit.

I.4.8. Temps de rétention hydraulique

Compte tenu de la température du réacteur, les déchets sont retenus suffisamment du temps dans le réacteur pour entraîner un degré significatif de destruction des solides volatils [48]. A une température donnée, le degré de destruction des solides volatils dépend de la durée pendant laquelle les déchets sont maintenus en contact avec les bactéries hydrolytiques, acidogènes et autres qui composent la population bactérienne du réacteur. À des fins de conception, le temps de rétention est optimisé près du niveau de rétention des déchets organiques où les taux marginaux de dégradation des VS sont maximisés et où un allongement supplémentaire des temps de rétention ne produit que de petites augmentations incrémentielles de la dégradation des déchets organiques. Les réacteurs anaérobies sont conçus pour traiter les déchets dilués à haute teneur en eau [60]. Dans un déchet bien mélangé, la partie solide dégradable des déchets est maintenue en suspension. Pour un déchet organique aussi bien mélangé, un seul temps de rétention des déchets est défini, appelé temps de rétention hydraulique (HRT).

Pour les déchets bien mélangés avec des quantités substantielles de solides totaux, un temps de rétention des déchets de 10 à 25 jours est typique à des températures mésophiles. Aux températures des réacteurs thermophiles, les HRT pour les déchets bien mélangés sont plus courts, environ 5 jours. [55].

I.4.9. Type du substrat

Bien que la plupart de matières organiques soient capables de se dégrader et de produire du méthane, certains possèdent plus de potentiel par rapport à d'autres la composition du substrat va définir la quantité de biogaz qui peut être produite par action des bactéries anaérobies (Tableau 1). La biomasse lignocellulosique peut se dégrader et former du méthane, mais la vitesse de sa décomposition est lente en raison de la configuration de ses molécules qui sont plus résistantes à l'action des bactéries. La matière grasse contient plus

de molécules de carbone et d'hydrogène qui peuvent produire du biogaz avec une teneur plus riche en méthane, ce type de substrat demande aussi de long temps de séjour pour sa dégradation. Les résidus d'origine animale peuvent aussi produire du biogaz mais leur potentiel est limité étant donné qu'ils contiennent plus d'azote que par rapport à des autres types de biomasse utilisées, une teneur élevée de cet élément perturbe l'activité de bactéries pendant la digestion anaérobie et diminue la formation du biogaz [61].

Tableau 1 : Rendement de production de biogaz à partir de différents types de matière organique [61].

Substrat	Production de biogaz (m ³ /tonne) de MO
Matière grasse	826 – 1 000
Déchets alimentaires	110
Fumier de cheval	56
Maïs	200 - 220
Déchets ménager	102
Boues d'épuration	4

I.5. Amélioration de la digestion anaérobie

1.5.1. Les différents types Prétraitements

Les prétraitements sont des procédés visant à modifier le substrat avant sa méthanisation et cela afin d'améliorer les rendements de production de biogaz. Ils incluent des mécanismes d'hydrolyse thermique, physique, chimique et biochimique ainsi que des procédés de concentration. Ils permettent également d'accélérer la vitesse des réactions métaboliques, de diminuer la taille des réacteurs ou les volumes de digestat [62, 63].

a) Prétraitements physiques

i) La concentration ou l'épaississement

Ces procédés sont employés principalement dans le traitement des eaux usées. Ils ont pour but de diminuer la présence d'eau et de maximiser la MV dans l'effluent. Pour cela, le procédé peut être gravitaire, être réalisée mécaniquement par centrifugation et déshydratation,

ou thermiquement par séchage. Cette étape a également un intérêt dans la réduction des volumes des digesteurs [64]. La phase liquide, extraite lors du procédé peut, par la suite, être réintroduite, partiellement ou totalement dans le réacteur. Cette fraction d'eau est employée pour orienter le procédé vers une méthanisation par voie sèche ou par voie humide [65].

ii) Le broyage

Le broyage est principalement utilisé pour la valorisation de déchets présentant une forte MS. Il permet de « casser » la matière, de les rendre plus soluble et ainsi d'augmenter la surface d'échange entre les enzymes et le substrat. Il va ainsi permettre une augmentation de la production de biogaz et une diminution du temps nécessaire aux étapes biologiques. Le procédé est notamment utile dans le cas d'une MS riche en composés difficilement dégradables [66]. Pour certains substrats, la réduction de la taille des particules peut, toutefois entraîner, une accumulation excessive d'AGV nuisibles au procédé de méthanisation [67].

iii) L'application de force de pression

L'application de force de pression est réalisée, en fonction de l'intensité du traitement désirée. De nombreux brevets et applications industrielles permettent d'opérer des pressions entre 1bar et 900bar, le substrat est ensuite, brutalement dépressurisé, provoquant la lyse des cellules, la réduction des chaînes moléculaires et une diminution forte de la matière en suspension [68]. Cette étape peut être couplée par la projection du substrat sur une plaque de collision afin d'intensifier le traitement [69].

iv) L'utilisation d'ultrasons

Elle permet de déstructurer les membranes des cellules et les flocs de matière en suspension par phénomène de cavitation acoustique générée à faible fréquence. Cela aboutit à l'abaissement de la pression en phase aqueuse en dessous de la pression de vapeur saturante, entraînant une formation de microbulles [69]. L'implosion du gaz emplissant les bulles, conduit à libérer une importante force de cisaillement capable de lyser les membranes cellulaires et désagréger les particules présentes dans la matière [70].

v) Les procédés thermiques :

Ces procédés sont généralement de trois types : Mésophiles, s'ils sont appliqués à des températures comprises entre 35 et 45° C ; Thermophiles, aux alentours de 55°C ; et Hyperthermophiles vers 70°C et au-delà. La littérature comprend de nombreuses études concernant

ce type de prétraitement [71, 72, 73,74]. Le procédé d'hydrolyse thermique a pour objectifs de solubiliser les MV par le fractionnement des chaînes moléculaires et de diminuer ainsi la durée de la phase d'hydrolyse. Cette solubilisation est supérieure, pour une température comprise entre 170°C et 190°C, à des procédés par ultrason et ozonation [75].

Au-delà de 70°C, une augmentation de la biodégradabilité est également observée par dégradation de la matière organique dite « récalcitrante » [69]. Ces procédés offrent de plus, un caractère hygiénisant non négligeable, aboutissant à une réduction des micro-organismes pathogènes [76]. Les procédés thermiques présentent également l'avantage d'abaisser la viscosité du substrat à traiter. La viscosité d'un effluent diminue lors de l'application de nombreux types de prétraitement, c'est toutefois lors de l'utilisation de températures comprises entre 170°C et 190°C, que l'on constate les plus fortes baisses [75]. L'optimum temps/température de ce prétraitement est situé, d'après la littérature, entre 160°C et 180°C pour une durée de traitement de 30 à 60 min [69].

b) Prétraitements chimiques et biologiques

i) Les procédés alcalin

Ils agissent notamment par rupture des liaisons hydrogènes (saturation en OH⁻) et déstructuration de la matière composant le substrat. Les réactions chimiques qu'ils engendrent, permettent ainsi une augmentation de la solubilité. En parallèle, l'addition de composés alcalins augmente la fraction minérale du substrat, ce qui peut être un inconvénient pour la réduction des volumes des installations. L'augmentation de la matière minérale (MM) peut possiblement présenter un avantage pour des posttraitements type Zone de Rejets Végétalisées. Les prétraitements alcalins sont simples à mettre en œuvre [77], mais ils s'avèrent plus lents et généralement moins performants que des procédés thermiques [58]. De plus, l'ajout de 55 composés chimiques représente un coût supplémentaire non négligeable. Il peut également nécessiter une étape de neutralisation avant son emploi en méthanisation. Afin d'accroître ses performances, le procédé d'hydrolyse alcaline est généralement couplé à une augmentation de la température. Les résultats sont alors significativement meilleurs [66, 71, 70, 78].

ii) Les procédés acides

Des acides concentrés, tels que H₂SO₄ et HCl, ont été utilisés pour traiter les matériaux lignocellulosiques. Bien qu'ils soient des agents puissants pour l'hydrolyse de la cellulose, les

acides concentrés ne sont pas largement utilisés en raison de problèmes de toxicité et de danger. Le traitement à l'acide peut opérer soit à haute température et à faible concentration d'acide (traitement à l'acide dilué) soit à basse température et à forte concentration d'acide (traitement à l'acide concentré) [86]. La température de fonctionnement inférieure dans le prétraitement à l'acide concentré (par exemple 40°C) est un net avantage par rapport aux procédés à l'acide dilué d'un point de vue énergétique. Cependant, les concentrations élevées d'acide (par exemple 30 à 70 %) dans le processus d'acide concentré le rendent extrêmement corrosif et dangereux. Par conséquent, ce processus nécessite soit des constructions non métalliques spécialisées, soit des alliages coûteux. Des prétraitements avec des acides tels que l'acide acétique, nitrique et sulfurique ont également été utilisés pour éliminer la lignine et la cellulose des déchets de papier journal [87] et des boues actives pour la production de biogaz.

iii) L'ozonation

L'ozonation est le procédé de prétraitement chimique, le plus souvent employé pour la méthanisation des boues activées [79]. Durant l'ozonation, l'oxygène se transforme en ozone qui en contact avec l'eau se décompose sous la forme de radicaux, capables de réagir avec une large gamme de composés organiques et inorganiques [77]. Ces réactions vont engendrer une réduction de la taille des particules, une libération de matière organique par lyse des cellules et ainsi une meilleure solubilisation du substrat [80]. Il est à noter que cela correspond à l'action indirecte du procédé. En effet l'ozone par action directe, oxyderait la MO libérée au détriment du consortium microbien, pouvant conduire jusqu'à la lyse des biofilms microbiens [76].

iv) L'hydrolyse enzymatique

Elle constitue une des principales voies biologiques pour le prétraitement du substrat. Elle se réalise par l'ajout d'enzymes extraites de micro-organismes ou par l'inoculation de microalgues. La littérature sur ce type de procédé est moins riche que celle concernant les procédés plus conventionnels tel que l'hydrolyse thermique, toutefois les résultats présentés semblent prometteurs [81]. Les enzymes permettent alors une forte augmentation de la solubilité de la matière, ainsi que de la qualité et de la quantité de biogaz produit [82]. Le recours aux prétraitements biologiques est particulièrement étudié pour les effluents présentant de forte concentration en composés difficilement dégradables. Le but est de réaliser l'hydrolyse de ces constituants par l'emploi d'enzymes normalement absentes de la flore anaérobie. Leur emploi a également été mené avec succès pour le prétraitement de substrats

riches en graisse et de diverses eaux industrielles [83, 84, 85].]. L'enzyme la plus utilisée est la cellulase, elle est connue par sa grande capacité de dégrader la cellulose insoluble présente en majeure partie dans la biomasse lignocellulosique suivie par la β -glucosidase et de la xylanase [88]. Par conséquent, les micro-organismes peuvent synthétiser et sécréter différentes enzymes comme par exemple, la lipase, l'amylase, la protéase et l'enzyme ligninolytique qui catalysent la dégradation de l'huile et de la graisse, des glucides, des protéines et de la lignine respectivement.

I.5.2. La co-digestion

La co-digestion est définie comme étant la digestion simultanée de deux ou plusieurs substrats. Durant ces dernières années, la co-digestion a connu un développement très important et le nombre de réacteurs de co-digestion à partir de différentes variétés de déchets solides a fortement augmenté. D'une façon générale, l'avantage de mélanger plusieurs substrats est considéré à deux niveaux. En premier lieu, au niveau du procédé et du fonctionnement du digesteur, la codigestion permet d'améliorer la stabilité des digesteurs, garantissant un meilleur traitement de déchets. En effet, la co-digestion peut être accompagnée d'une augmentation de la productivité et des rendements en méthane. En deuxième lieu, sur le plan économique, la co-digestion est considérée plus favorable que la monodigestion. En effet, cette technologie permet de traiter des substrats de types et origines différents dans une installation commune [89]. La co-digestion des fumiers des animaux qui sont caractérisés par une capacité tampon élevée, une forte teneur en Azote et une grande variété de nutriments nécessaires pour les bactéries méthanogènes avec les déchets riches en carbone comme les déchets lignocellulosiques peut résoudre plusieurs problèmes parmi lesquels la correction du rapport C/N, les concentrations de la macro et micronutriments et la capacité de mise en mémoire tampon [90][91][92]. Un rapport C/N élevé peut conduire à une carence en azote engendrant un ralentissement de l'activité microbienne. Au contraire, un rapport C/N élevé peut également générer un ralentissement de l'activité microbienne par toxicité due à l'azote ammoniacale [75].

I.6. Le biogaz

I.6.1. Définition et composition

Le biogaz est un gaz issu de la fermentation de matières organiques en absence d'oxygène sous l'action de bactéries. Le biogaz se produit grâce à un processus appelé «

méthanisation » ou « **digestion anaérobie** » [93]. Le biogaz est un mélange de différents gaz dont les proportions, il est principalement composé de méthane, mais aussi de dioxyde de carbone (CO_2) et des petites quantités de vapeur d'eau, de sulfure d'hydrogène (H_2S) et d'autres composés « impureté », notamment dans les biogaz de décharges [94], le tableau 2 ci-dessous contient les pourcentages de chaque composant du biogaz [95] :

Tableau 2 : Les composants du biogaz et leurs pourcentages [95].

Constituants	Composition%
Méthane (CH_4)	50 – 75
Carbone dioxyde (CO_2)	25 – 45
Vapeur d'eau (H_2O)	2 – 7
Nitrogène (N_2)	0 – 2
Hydrogène (H_2)	0 – 1
Hydrogène Sulfuré(H_2S)	0 – 2
Oxygène, O_2	0 – 2

La teneur de biogaz en ces différents éléments ainsi que sa valeur énergétique, dépendent de la durée et qualité du processus de fermentation, du type d'installation et beaucoup de la nature de la matière fermentescible utilisée (et en particulier de ses proportions en carbone, hydrogène, oxygène et azote ou contaminants indésirables). Leurs conditions de stockage doivent être contrôlées pour limiter la déperdition de matière organique.

I.6.2. Valeur énergétique

Le biogaz peut remplacer le gaz naturel dans toutes les applications courantes, grâce à sa haute teneur en méthane. La récupération d'énergie à partir du biogaz permet d'exploiter l'énergie potentielle de la matière organique contenue dans les déchets, tout en assurant, par la méthanisation et le retour au sol de cette même matière organique. L'énergie contenue dans un Nm^3 de biogaz contenant 60% de méthane sera de 21.6 mj ou 6 kWh, équivalant à environ 0.7 L d'essence ou 0.6 L de fuel (Fig.4). La composition et la propriété du biogaz varient

selon les intrants utilisés, les procédés de méthanisation, mais aussi la température, le temps de séjour hydraulique, etc. [96].

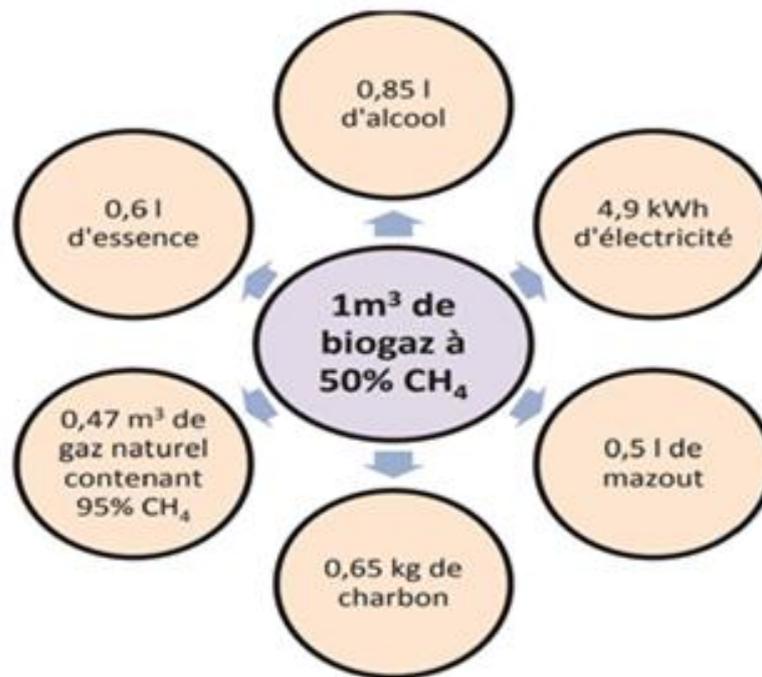


Figure 4: Equivalence énergétique de 1m³ de biogaz à 50% CH₄ par rapport à d'autres sources d'énergie.[97]

Pour valoriser ce potentiel, il existe trois méthodes : la combustion en chaudière pour produire de la chaleur (vapeur), la cogénération qui génère électricité et chaleur, et l'épuration qui permet la production d'un équivalent renouvelable au gaz naturel (le biométhane) [98].

I.6.3. Purification du biogaz

Le biogaz peut être utilisé directement pour produire de l'électricité, mais le grand volume de CO₂ réduit le pouvoir calorifique du gaz, augmentant les coûts de compression et de transport et limiter la faisabilité économique aux utilisations qui se produisent au point de production. La purification permet une plus grande variété d'utilisations, soit pour la chaleur et l'électricité, soit comme carburants pour véhicules. Pour une utilisation comme carburant, purification pour éliminer le dioxyde de carbone (CO₂) et du sulfure d'hydrogène (H₂S) est nécessaire, car il corrode la mécanique vitale des composants des groupes électrogènes et des moteurs de véhicules s'il n'est pas déposé [99].

Les techniques permettant de purifier le biogaz sont nombreuses [100] :

- Pour éliminer l'eau (H₂O), on peut agir en phase gazeuse par adsorption ou absorption mais aussi après condensation de l'eau grâce à un cyclone, un dévésiculeur ou un séparateur gravitaire.
- L'élimination du sulfure d'hydrogène (H₂S) est possible dès le digesteur par injection d'oxygène ou par ajout de chlorure de fer. On peut retirer le sulfure d'hydrogène ou les composés de silicium par adsorption, absorption, séparation membranaire.
- L'oxygène et l'azote peuvent être séparés du biogaz par adsorption ou par séparation membranaire.
- Enfin, l'ammoniac (NH₃) peut être absorbé dans des solutions acides ou adsorbé sur charbon actif. Concernant le dioxyde de carbone (CO₂), sa capture a été, ces dernières années, l'un des sujets les plus étudiés dans le domaine du génie chimique.

I.7. Les avantages et les inconvénients de digestion anaérobie

Les technologies auparavant détaillées sont lesquelles ont le plus d'expérience à l'échelle commerciale pour la digestion anaérobie de déchet organique ménager. Il n'existe pas une technologie exclusive pour la digestion anaérobie des déchets en raison que de plusieurs facteurs vont déterminer sont pris en compte pour la sélection de la technologie.

Le Tableau 3 résume les principales avantages et inconvénients dans le fonctionnement des systèmes de digestion anaérobie, ce qui donne une notion générale de leur faisabilité pour d'applications à l'échelle industrielle.

Tableau 3 : Les avantages et les inconvénients de digestion anaérobie [101].

Avantages	Inconvénients
<p>L'opération des digesteurs aérobies est plus simple que celle des digesteurs anaérobies, et moins de problèmes d'instabilité sont rencontrés.</p> <p>- La digestion aérobie requiert une moins grande concentration de boues affluentes que la digestion anaérobie, éliminant ainsi le besoin d'un procédé d'épaississement.</p>	<p>- Les coûts d'opération des digesteurs aérobies sont très élevés, dû à la grande demande énergétique créée par les besoins en aération.</p> <p>- Aucune récupération énergétique n'est tirée du procédé de digestion aérobie, alors que le méthane produit par la digestion anaérobie permet d'absorber certains coûts d'opération.</p>

<p>- Comparativement aux boues traitées en anaérobiose, une plus grande partie de la valeur fertilisante des boues aérobies est conservée, ce qui favorise leur valorisation agricole.</p> <p>- Le capital requis pour la construction des digesteurs aérobies est moins élevé que pour les réacteurs anaérobies</p>	<p>- La performance de la digestion aérobie est très dépendante de la température; l'efficacité du traitement varie beaucoup en fonction des saisons.</p>
--	---

I.8. Conclusion

Le Sahara Algérien riche en différentes variétés de palmier dattier dont la variété H'mira est la plus dominante dans la région d'Adrar. Cependant, son utilisation dans la production de l'énergie est encore rare. A travers ce chapitre, il est bien évident qu'il y a une possibilité d'exploiter les déchets de palmier dattier et valoriser leur biomasse avec des techniques simples et efficaces comme la digestion anaérobie afin de produire du biogaz et contribuer à l'économie nationale.

CHAPITRE II :
MATERIELS ET
METHODES

CHAPITRE II : Matériels et méthodes**II.1.Introduction**

Après avoir discuté l'origine et les différentes techniques de valorisation de la matière première utilisé dans la présente étude représentée par (les palmes sèche des palmiers dattiers (*Phoenix dactylifera* L) de la variété H'mira ainsi que les déchets de camelin. Le présent chapitre discute les différentes étapes, méthodes et techniques utilisé pour la caractérisation du substrat et l'application de la technique de digestion anaérobie.

II.2. Origine et caractérisation du substrat utilisé

Le substrat utilisé dans cette étude pour produire du biogaz se compose de deux éléments principaux : le premier élément est les palmes sèches du palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L) de la variété H'mira (Photo 2). Ces palmes proviennent de 5 jardins et de palmiers différents. Le deuxième élément est les déchets de dromadaires (Photo 3) provient du marché de cheptel

**Photo 2: Palmes sèches****Photo 3: Déchets camelin.****II.3. Le prétraitement physique du substrat****1. Le Nettoyage :**

Après avoir rassemblé les différents éléments du palmier dattiers au fur est aux mesures de l'opération de récolté les dattes (les pétioles ; les palmes sèche ; les spathes : les régimes les fils.). Les palmes ensuite sont séparés et nettoyés bien avec de l'eau pour éliminer les poussières.

2. Le broyage

Le substrat composé de palmes sèches et des déchets de camelin sont broyés finement à l'aide d'un macro et micro-broyeur (Photo 4) pour réduire la taille des particules et faciliter leur utilisation durant la digestion et sa décomposition lors du processus.



Photo 4: Le macro et le micro broyeur

II.4. Description du digesteur et dispositif utilisé

18 bouteilles en verre d'une capacité de 180 ml sont utilisées comme des digesteurs pour la production de méthane (six digesteurs en triple). 100 ml d'inoculum contenant 4 g de MO est ajouté à chaque réacteur. Une opération de dégazage de l'inoculum de 7 jours est effectuée avant le lancement des expériences afin d'éviter la production du méthane endogène. Pour cela, les réacteurs sont fermés hermétiquement et incubés dans un bain marée thermostaté à (37°C). Après ce moment, 2 g de MO de substrat soit un rapport inoculum / substrat de 2 sont ajoutés à chaque réacteur. Les six digesteurs contiennent les proportions suivantes :

- 1- 100% Déchet de camelin (DC)+ 0% de palme sèche (PS)
- 2- 75% DC+25% PS
- 3- 50%DC+ 50% PS
- 4- 25%DC+ 75% PS
- 5- 0%DC+100%PS
- 6- Blan (100% inoculum)

Après l'ajout de substrat à l'inoculum (Photo 5), les réacteurs sont fermés hermétiquement à nouveau et incubés dans un bain marée thermostaté à (37°C) (photo 6). Le volume du biogaz produit est calculé quotidiennement durant les sept premiers jours, puis chaque deux jours. La quantité de biogaz produite par l'inoculum (blanc) est soustraite de volume global produit par les réacteurs contenant du substrat plus inoculum à la fin de digestion.



Photo 5: Digesteur utilisé remplis par l'iniculum et substrat



Photo 6: Les digesteurs dans un bain maris

II.5. Méthodes d'analyses

II.5.1. Détermination de taux la matière sèche (MS)

a) Matériels utilisés :

- Balance.
- Creuset
- Dessiccateur
- Etuve réglée à 105°C

b) Méthode :

La matière sèche est déterminée par dessiccation dans une étuve maintenue à 105 °C (Photo 07) jusqu'à ce que le poids de l'échantillon à analyser devient constant. La différence du poids correspond à la perte d'humidité et le résidu représente la teneur en matière sèche de l'échantillon

Pour déterminer la matière sèche, une prise d'échantillon de masse quelconque, soit (M1), est versée dans une capsule de masse connue soit (M) préalablement nettoyée et séchée, ensuite l'ensemble est placé dans une étuve à 105 °C pendant 24 heures jusqu'à l'obtention

d'un poids constant. Le creusé contenant le substrat séché est pesée à nouveau après refroidissement dans un dessiccateur (M2).



Photo 7: L'étuve utilisé et réglée à 105°C

La matière sèche s'obtient selon la relation suivante :

$$MS \% = (M2-M) / (M1-M) \times 100 \dots \dots \dots \text{(I)}$$

Avec :

MS % : la teneur en matière sèche (MS).

M2 : masse finale de substrat après séchage.

M1 : masse initiale de substrat avant le séchage.

M : masse de creuset

II.5.2. Détermination de la teneur en matière organique (MO)

a) Matériels utilisés :

- creuset.
- dessiccateur.
- Four à moufle.
- Balance

b) Méthode

L'échantillon préalablement séché est mis à un four à moufle à 550 ° C, la matière organique est consommée et des résidus minéraux se restent. Pour déterminer la teneur en matière organique (MO), la masse de l'échantillon après séchage, c'est-à-dire (Mi), est introduite dans une creusé pré-nettoyée et séchée de masse (M), le tout est placé dans un four à moufle pour calcination à 550 ° C pendant 2 h. Après refroidissement, le creusé contenant le substrat est pesé à nouveau (Mf). La masse de matière organique est obtenue par la différence entre la masse de matière sèche et la masse de matière minérale.

La matière organique s'obtient selon la relation suivante après la soustraction des poids des creusets :

$$\text{MO \%} = (M_i - M_f) / M_i \times 100 \dots \dots \dots \text{(II)}$$

Avec :

MO% : la teneur en matière Organique (MO)

Mi : masse initiale de substrat après séchage

Mf : masse finale de substrat après calcination

II.5.3. Paramètres du contrôle du processus de digestion anaérobie

Il est apparu indispensable de connaître les paramètres de contrôle de fonctionnement d'un digesteur. Les conditions de fonctionnement des digesteurs anaérobie étant liées à la nature du substrat. Il est nécessaire, avant le démarrage de toute fermentation, de connaître assez précisément les caractéristiques de l'affluent (pH, DCO, TAC, AGV). Ceci afin de pouvoir reconnaître toute déséquilibre du processus possible et prendre des décisions en temps adéquat.

II.5.3.1. PH

Le PH est un indice sans unité qui permet de mesurer la concentration de l'ion d'hydrogène dans une solution. La mesure de ce paramètre est importante dans le processus de digestion anaérobie car la communauté bactérienne méthanogène est sensible aux variations de celui-ci. Cette communauté requiert un milieu neutre avec une valeur de pH comprise entre 6,5 et 7.5 pour son fonctionnement optimal.

a) Matériel :

- pH-mètre.
- Becher.

II.5.3.2. Détermination de la DCO

La demande chimique en oxygène (DCO) est la mesure de la quantité d'oxygène requise pour oxyder la matière organique et inorganique oxydable contenue dans un échantillon. Ce paramètre donne une estimation de la quantité de polluants présents dans un effluent industriel ou une eau usée [102]. La demande chimique en oxygène est retenue mondialement comme critère d'évaluation et apparaît dans toutes les études concernant les rejets et les déchets [103].

a) Matériels utilisés :

- Centrifugeuse
- Pipette.
- Eprouvette.
- Bécher.
- Tubes.
- Burette.
- Thermoréacteur.

b) Méthode :

La détermination de la DCO se fait principalement par oxydation avec le dichromate de potassium ($K_2Cr_2O_7$), un oxydant fort (Photo 08, 09, 10, 11, 12). Ce dosage est réalisé par l'emploi de la méthode au bichromate de potassium (AFNOR T90 -101). Cette méthode analytique est adaptée pour le dosage de la DCO dans la gamme de mesure va de 30 mg/L à 700 mg/L pour des échantillons non dilués. Les valeurs de la DCO de l'échantillon étudié lors de la présente étude sont plus élevées que ces valeurs, pour cela toutes les mesures de la DCO sont réalisées sur des échantillons dilués [104].



Photo 8: Centrifugeuse.

Photo 9: Filtration d'échantillon après centrifugation



Photo 10: Les échantillons après la dilution.

Les matières organiques contenues dans l'échantillon sont oxydées, en milieu acide (H_2SO_4), par le bichromate de potassium ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$), introduit en excès, en présence de sulfate d'argent (Ag_2SO_4) comme catalyseur, et de sulfate de mercure (HgSO_4) pour éviter l'interférence des chlorures. Le tout est chauffé à 150°C , pendant 2 heures dans un thermo réacteur.



Photo 11: Préparation des tubes prêts à l'emploi.

Photo 12: Thermoréacteur

Après la détermination de leur titre, en présence de quelques gouttes de ferroïne comme indicateur coloré. L'oxydation de la matière produit des ions donnant une coloration rouge violacé. La DCO est exprimé par la relation suivante :

$$\text{DCO} = \frac{(VT - VE) \times 8000 \times T \times d}{V_e} \quad (\text{en mg O}_2/\text{L}) \dots \dots \dots \text{(I)}$$

Avec :

VT : volume de sel de Mohr pour le témoin .

VE : volume de sel de Mohr pour l'échantillon .

T : titre de sel de Mohr .

d : facteur de dilution .

Ve : volume d'échantillon prélevés après la dilution .

II.5.3.3. Détermination de l'AGV

La teneur en acides gras volatils est un paramètre fondamental à surveiller, car leurs accumulations entraînent des modifications physico-chimiques plus graves. La teneur en AGV sans l'effluent de sortie est généralement inférieure à 0.5 g/l lorsque le digesteur fonctionne bien [105]. Les AGV sont des produits apparaissant lors d'une des étapes de la digestion. Ils sont par la suite transformés en méthane. Une augmentation de la concentration en AGV risque d'inhiber la méthanisation [106].

a) Matériels utilisés

- pH mètre .
- Plaque chauffante .
- Burette de 10 ml.
- Bécher.

b) Méthode :

L'échantillon après centrifugation est métté dans un bécher afin de mesurer la valeur de pH initial , ensuite le titrage est effectuée par l'ajout de l'acide sulfurique ($\text{H}_2\text{SO}_4 0.1\text{N}$) avec une agitation manuelle jusqu'à une valeur de PH = 4. Le volume de l'acide correspond à un volume V_1 . L'ajout de H_2SO_4 se continue jusqu'à un PH=3.50 sans calculer le volume. Après le liquide chauffé pendant 3 minutes après l'ébullition à 100 C° (Photo 13), de manière à dégazer le dioxyde de carbone. La solution est ensuite refroidie à une température ambiante. Après le refroidissement et à l'aide d'une burette, la soude (NaOH) 0,1 N est ajoutée jusqu'à atteindre une valeur de pH = 4, soit V_2 . L'ajout de la soude se continue jusqu'à atteindre une valeur de pH = 7, soit V_3 .



Photo 13: Le chauffage du liquide.

Les AGV est exprimé par la relation suivante :

$$\text{AGV} = \frac{(V3-V2) \times 0.1 \times 1000}{25} \quad (\text{ en meq.l-1 }) \dots\dots\dots \text{(II)}$$

$$= (V3 - V2) \times 4 \times 0.06 \quad (\text{ en g.l-1d'acide acétique }) \dots\dots\dots \text{(III)}$$

II.5.3.4. Détermination de TAC

Le titre alcalimétrique complet permet de connaître les doses de carbonates, d’hydroxydes et d’hydrogencarbonates alcalins ou alcalino-terreux, responsables du pouvoir tampon du fermenteur vis-à-vis des acides organiques et acides gras volatils. Cette alcalinité permet au pH de rester aux alentours de la neutralité malgré la présence d'acides. Le calcul de la TAC se fait à partir de volume V_1 noté précédemment dans la mesure de l'AGV par la relation suivante :

$$\text{TAC} = \frac{V1 \times 0.1 \times 1000}{25} = v_1 \times 4 \quad (\text{ en meq.L}^{-1}) \dots\dots\dots \text{(IV)}$$

$$= v_1 \times 4 \times 0.05 \quad (\text{ en g/l de CaCo3 }) \dots\dots\dots \text{(V)}$$

Le paramètre plus sensible pour la surveillance des digesteurs et la mesure de la stabilité du procédé est le rapport AGV/TAC. Lorsque ce rapport est inférieure à 0.35, le procédé est considéré comme fonctionnant favorablement sans risque d’acidification [107].

II.5.3.5. Volume de biogaz produit

Le but principal de la digestion anaérobie est la production du biogaz, donc pour bien contrôler le processus, et pour suivre l’évolution du biogaz, une mesure régulière du volume de biogaz est effectuée.

a) Matériel :

Le dispositif de mesure de volume de biogaz contient une éprouvette graduée plongée dans une solution acide à pH 2 Photo 14



Photo 14: Dispositif de mesure du volume du biogaz produit.

b) Méthode :

Le volume de biogaz produit est mesuré par un système hydraulique (déplacement du liquide). Ce dernier est relié à un tube attaché au digesteur. Lorsque la vanne est ouverte, le gaz produit par le digesteur passe dans une éprouvette graduée immergée dans une solution acide à pH 2 permettant de déplacer directement le niveau de liquide contenu dans l'éprouvette et indique ainsi le volume de gaz.

II.5.4. Inflammabilité du biogaz

Le test d'inflammabilité de biogaz (Photo 15), donne une idée sur le rendement énergétique de l'échantillon utilisé ainsi que sur le taux du méthane dans le biogaz. Le biogaz ne devient inflammable que si le pourcentage en méthane dépasse les 45%. Chaque fois, après la mesure de volume de biogaz, un test d'inflammabilité de ce dernier est effectué. Le biogaz est retiré à l'aide d'une seringue et subi à une flamme discontinue à partir d'un briquet.



Photo 15: Teste d'inflammabilité du biogaz produit.

II.6.Conclusion

Le contrôle des digesteurs anaérobies est nécessaire pour assurer la réussite de L'opération. A cause de la complicité du processus de la digestion anaérobie due à la sensibilité des groupes micro-organismes au plusieurs facteurs, il est important de pouvoir détecter le déséquilibre de processus au début et donc L'action peut être prise à temps riel pour empêcher l'échec du processus. Pour cela, les techniques de mesure des paramètres de fonctionnement des digesteurs ont été discutés profondément dans ce chapitre.

CHAPITRE III :
RESULTATS ET
DISCUSSION

CHAPITRE III : Résultats et discussion**III.1. Introduction**

Ce chapitre discute les résultats obtenus tout au long de la partie expérimentale de ce mémoire. Il commence par la préparation des substrats, puis l'interprétation des paramètres de contrôle de processus de méthanisation au début et à la fin de digestion comme le pH, les acides gras volatils AGV, l'alcalinité TAC et la DCO et se termine par le suivi de volume de biogaz produit pendant la durée de digestion anaérobie.

III.2. Enquête sur terrain

L'enquête sur terrain touche 15 palmiers dattiers au niveau de cinq jardins (trois palmiers par jardin) à travers la Wilaya d'Adrar sud-ouest de l'Algérie. Deux jardins parmi les cinq se situent au niveau de la palmerais de ksar Ammour commune de Tssabit, les trois qui restent se situent au niveau de ksar Noumennas commune de Tamentite,. L'échantillonnage est effectué après l'opération de la récolte des dattes et le nettoyage des palmiers dans le mois de Novembre 2020. La préparation des échantillons (broyage, lavage, séchage, re-broyage et pesés) est effectuée au niveau du laboratoire de l'Unité de Recherche en Energie Renouvelable en Milieux Saharien (URERMS) de la wilaya d'Adrar.

III.2.1. Description des différents déchets lignocellulosiques du palmier dattier de la variété *H'mira*

Chaque année, après l'opération de taille et nettoyage des palmiers dattiers, des différents types des résidus sont produits. Les principaux types sont représentées essentiellement par les palmes, les pétioles, les spaths, les régimes et les fibrilium. Ces éléments sont généralement riches en matières lignocellulosique.

a) Les différents résidus du palmiers dattiers

Les palmes : sont appelées localement « Djerids » Photo 16. Ce sont des feuilles de forme pennée insérées en hélice, très rapprochées sur le stipe par une gaine pétiole bien développée « Kornaf » enfouie dans le « life ». Le nombre ainsi que le poids des palmes se varie d'un cultivar à un autre et pour les mêmes cultivars d'un palmier à une autre [108].



Photo 16: Les palmes de palmier dattier.

. **Les pétioles** : ou rachis et appelés aussi localement (Kornaf) Photo 17. Ce sont des éléments semi-cylindrique, plus ou moins ailé, et porte les épines (chouks) ou encore (chouques), et les folioles. Le pétiole est dur et relativement rigide. il est constaté un gradient entre les premières épines et les épines du haut, qui se transforment progressivement en folioles [109].



Photo 17: Les pétioles de palmier dattier.

.**Le Spathes** : ou (Kilouane) ont une forme d'épis protégés par une bractée ligneuse close et fusiforme Photo 18. Elles sont de couleur vert-jaunâtre et sont formées à partir de bourgeons développés à l'aisselle des palmes [110].



Photo 18: Les spathes de palmier dattier.

Le lif : ou fibrillum (Fdame) il recouvre les pétioles autour du tronc Photo 19. Il est une bourre fibreuse, sorte de tissage végétal [111].



Photo 19: Le fibrillum de palmier dattier.

Le Régime : ou (Ziouane) est un axe florifère allongée terminée par un groupe de fleurs et ne possédant pas de feuilles Photo 20 [112]. Ces fleurs deviennent des dattes à la fin du cycle de croissance de palmier dattier. Après la récolte des dattes il reste que le régime.



Photo 20: Le régime de palmier dattier.

III.2.2. Les palmes sèches et les déchets de camelin (substrat de la présente étude)

Les palmes sèche de la variété *H'mira* sont choisis comme un substrat pour la présente étude car ils représentent plus de 50 % de la totalité des déchets générés par le palmier dattier. Parallèlement, la variété *H'mira* représente plus de 42% de nombre totale des palmiers dattiers au niveau de la région d'Adrar. Les déchets de camelin sont choisis comme un cosubstrat afin de régulariser le rapport C/N.

III.3. Caractérisation de substrat de la présente étude

Le tableau 4 suivant représente le taux de la matière sèches et la matière organique de substrat étudié au début et à la fin la digestion :

Substrat	MS%	MO%	Biodégradabilité
<i>H'mira</i> au début	95.39	89.59	33%
<i>H'mira</i> a la fin	5.91	60.07	
Camelin au début	94.14	70.00	13.3%
Camelin a la fin	6.34	60.691	

Tableau 4 : Le rapport de MO et MS au début et à la fin la digestion anaérobie.

Discussion

Les résultats obtenus dans le tableau 4 montrent la richesse des palmes sèche de la variété *H'mira* en matière organique avec un taux de 89.59%, alors, les déchets de camelin ne contiennent que 70.00%. A la fin de digestion, un taux d'élimination important est enregistré au niveau des déchets de palmier dattier en comparaison à cel du camelin traduit par le taux de biodégradabilité qui est estimé de 33 et 13.3% respectivement.

III.4. Les paramètres de fonctionnement au début et à la fin de digestion anaérobie

III.4.1. Le pH

Le pH est un indicateur très intéressant dans la stabilisation et le bon déroulement de la digestion anaérobie. Les procédés de DA sont fortement influencés par le pH. Le pH

optimum de fonctionnement est aux alentours de la neutralité et donc à des valeurs comprises entre 6,5 et 8,5 [113].

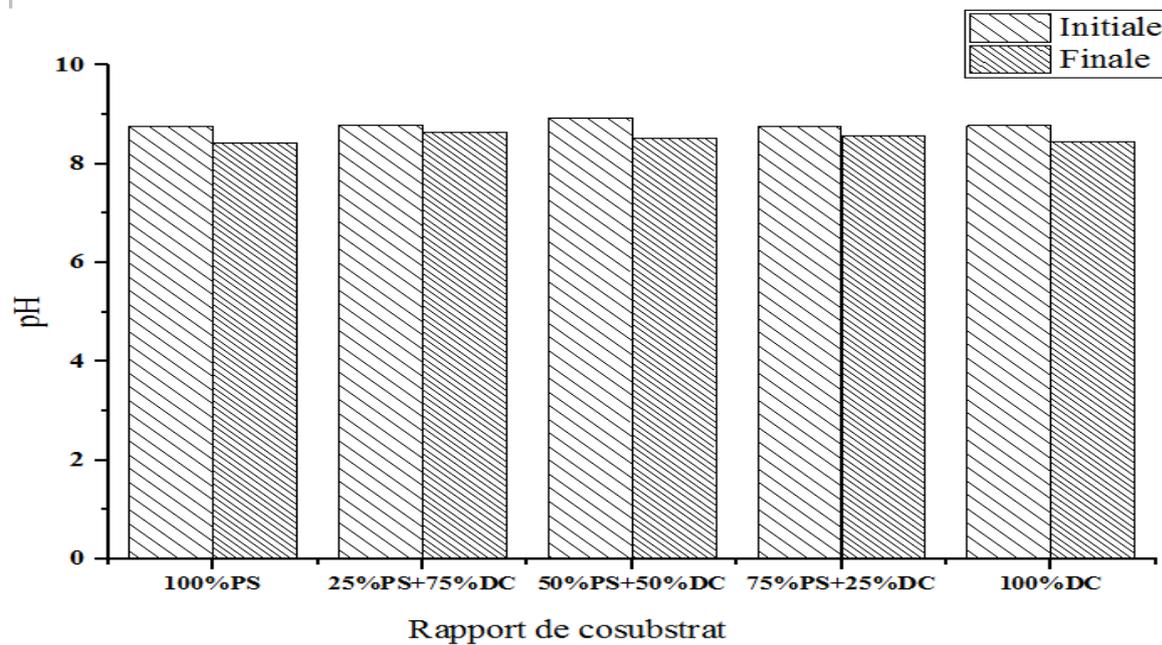


Figure 5: Le pH au début et à la fin de DA en fonction de rapports de cosubstrats.

La figure 5 montre les valeurs du pH au début et à la fin de DA pour tous les réacteurs de l'expérience. Au début de digestion, les valeurs de pH pour tous les réacteurs sont presque les mêmes et varient entre 8.76 et 8.82. Ce rapprochement des valeurs de pH entre tous les réacteurs est provenu par la quantité importante de l'inoculum qui influe directement sur ce paramètre [114]. A la fin de la DA, une faible diminution de pH pour tous les réacteurs est enregistrée avec des valeurs qui restent toujours supérieures à 8.4. La capacité tampon du milieu provoqué par l'inoculum est responsable à la stabilisation des valeurs du pH.

III.4.2. Biodégradabilité du substrat

III.4.2.1. la DCO

La demande chimique en oxygène est un paramètre qui donne une idée générale sur les activités des microorganismes dans le milieu réactionnel et de leurs besoins en oxygène pour la décomposition de la matière organique [115].

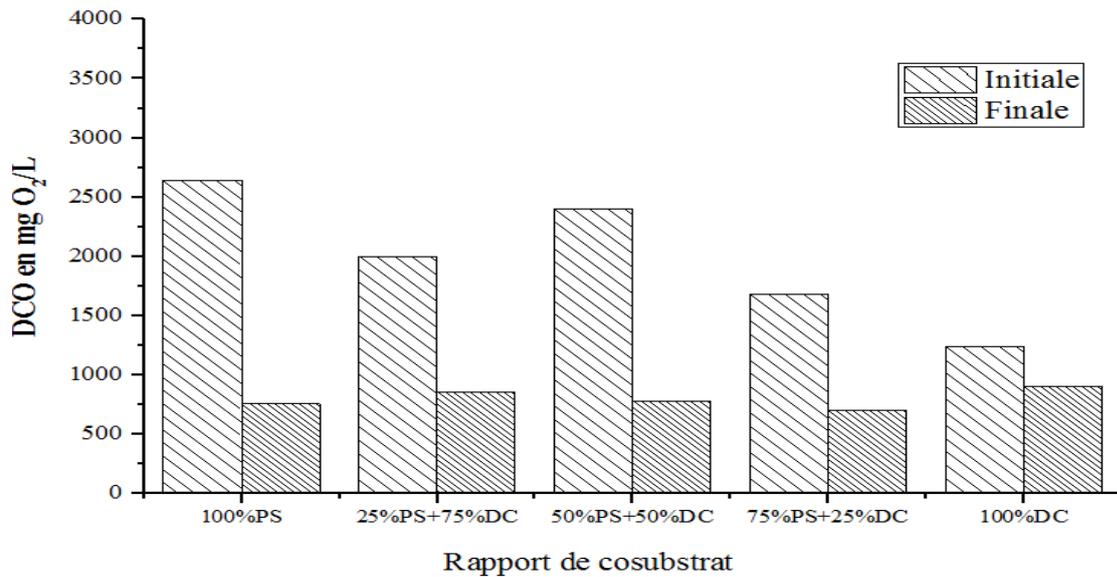


Figure 6 : DCO au début et à la fin de DA en fonction des rapports de cosubstrats

La figure 6 représente les valeurs de DCO au début et à la fin de digestion pour tous les réacteurs. En générale de fortes valeurs de DCO au début de processus évalué de 2640, 2000, 2400, 1680, 1240 mg d'O₂/L enregistré pour 100%PS, 25%PS+75%DC, 50%PS+50%DC, 75%PS+25%DC ; 100%DC respectivement. La valeur la plus élevée est enregistrée pour le réacteur qui contient 100% PS qui est estimée de 2640 en mgO₂/L. Cela est expliqué par le taux de solubilisation du substrat au début de la digestion [116].

Une diminution importante de la DCO est enregistrée à la fin de digestion pour tous les réacteurs avec des valeurs de 755.53, 855.55, 780, 700, 900 mg d'O₂/L pour 100% PS ; 25%PS+75%DC ; 50%PS+50%DC ; 75%PS+25%DC ; 100% DC respectivement.

Tableau 5 : Le taux de biodégradabilité

Les reacteur	Les taux biodégradabilité %
100%PS	71.3
25%PS+75%DC	57.2
50%PS+50%DC	67.5
75%PS+25%DC	58.3
100%DC	27.4

Cette diminution de la DCO correspond des taux de biodégradabilité de 71.3, 57.2, 67.5, 58.3 et 27.4% pour 100% PS ; 25%PS+75%DC ; 50%PS+50%DC ; 75%PS+25%DC ; 100% DC respectivement Tableau 5. Ces résultats indiquent le taux de la bioconversion de la matière organique en biogaz [117].

III.4.3. Les AGV

La concentration en acides gras volatils (AGV) est un paramètre caractéristique des premières phases de la méthanisation. Le suivi de son évolution permet d'estimer l'état de dégradation du substrat [118].

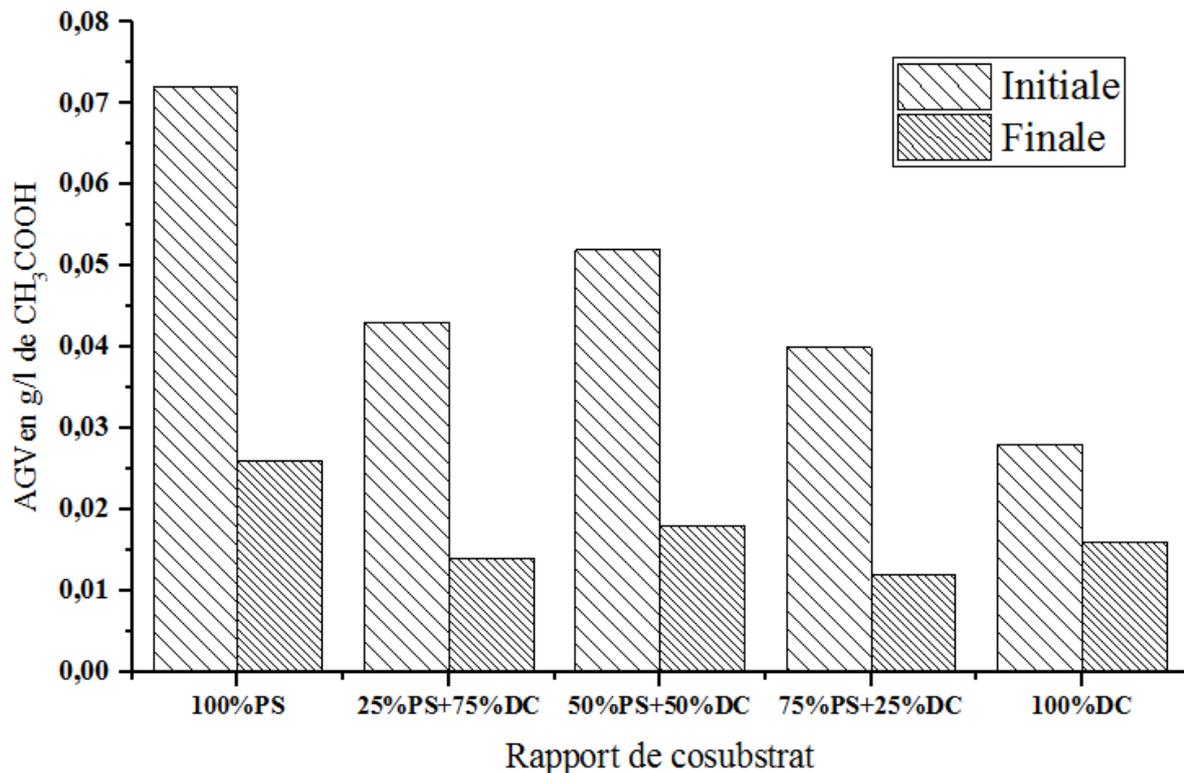


Figure 7 : Valeurs des AGV au début et à la fin de digestion pour tous les réacteurs

La figure 7 représente les valeurs des AGV au début et à la fin de la digestion pour tous les réacteurs. Les valeurs initiales des AGV sont plus élevées que celles des valeurs finales. Cela est expliqué par une production élevée des AGV au début de la DA (phase d'hydrolyse et acidogénèse). Cette production élevée est provoquée par la présence d'une concentration

élevé de substrats facilement biodégradables. Les mêmes constatations ont été faites par [119].

A la fin de DA, les valeurs des AGV sont diminuées en général avec des taux différents. Cette diminution est expliquée par la réalisation d'un équilibre entre les différents types de bactéries dans le milieu réactionnelle qui transforment ces AGV en autres métabolites [119].

III.4.4. Le TAC

Le titre alcalimétrique représente l'alcalinité du milieu. Cette dernière indique la capacité du milieu à réagir pour neutraliser les acides en solution (capacité tampon du milieu) [120].

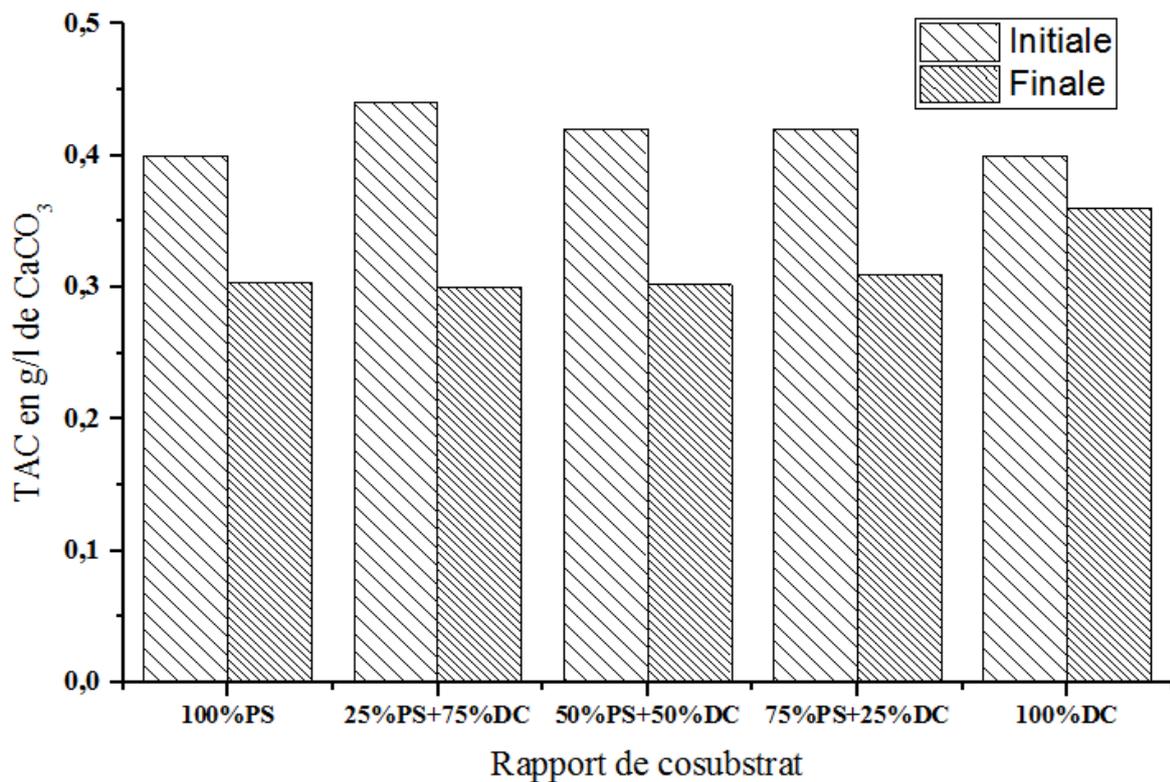


Figure 8 : TAC au début et à la fin en fonction de cosubstrat

Selon la figure 8, les valeurs du TAC au début de la méthanisation sont élevées comparativement aux celles de la fin de DA. Ils sont presque semblables et varient entre 0.39 et 0.43 g/l de CaCO₃. Ces valeurs élevées du TAC montrent une capacité tampon élevée du

milieu dû à la quantité suffisante de l'inoculum qui conserve l'alcalinité du milieu à des valeurs favorable pour les micro-organismes.

A la fin de la DA, une faible diminution des valeurs de TAC est enregistrée pour tous les réacteurs toujours grâce à la capacité tampon du milieu qui préserve l'équilibre du processus malgré la production des AGV.

III.4.5 Rapports AGV/TAC

Le rapport AGV/TAC est un paramètre clé qui permet de déterminer la cinétique de la digestion anaérobie représentée par la stabilité du processus et le risque d'acidification [121].

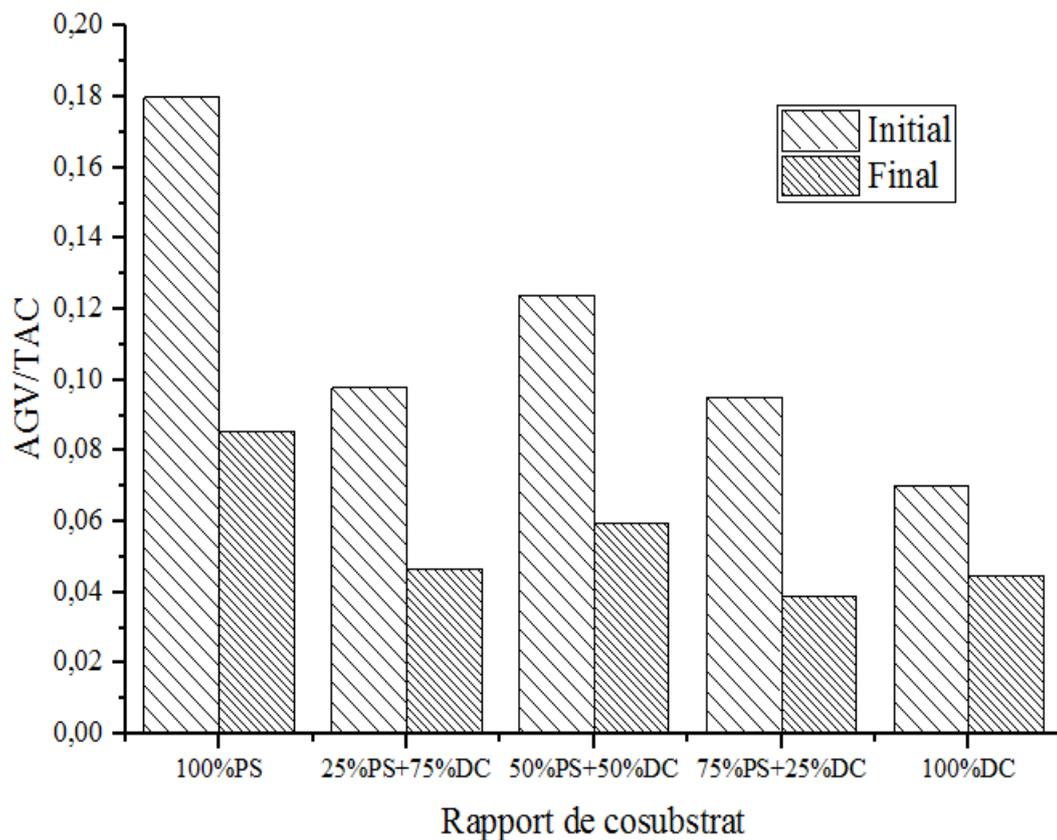


Figure 9 : Rapport de AGV/TAC en fonction du rapport de cosubstrat

La figure 9 montre les valeurs du rapport AGV/TAC au début et à la fin de digestion. Les valeurs au début du processus sont évaluées de 0.18, 0.09, 0.12, 0.095 et 0.070 pour 100%PS, (25%PS+75%DC), (50%PS+50%DC), (75%PS+25%DC) et 100%DC respectivement. Une diminution de ces valeurs est enregistrée à la fin de DA pour atteindre

0.08, 0.04, 0.06, 0.03 et 0,04 pour 100%PS, (25%PS+75%DC), (50%PS+50%DC), (75%PS+25%DC) et 100% DC respectivement. Comme remarque générale, toutes les valeurs de ce rapport (initial et final) pour les différents substrats sont inférieure à 0.18. Cela démontre une capacité tampon élevée du milieu qui empêche l'accumulation des acides gras volatils et favorise beaucoup la stabilité du processus de digestion anaérobie et par conséquent la production du méthane.

III.5. Production de biogaz

III.5.1. Production quotidienne en méthane

La figure 10 représente un suivi de la production quotidienne en méthane durant 26 jours de digestion. Au début de la DA, une production importante en méthane est enregistrée durant les deux premiers jours pour les quatre réacteurs contenant 100% PS ; 25%PS+75%DC ; 50%PS+50%DC ; 75%PS+25%DC avec 24, 20.9, 19.2 et 17.4 ml de CH₄/g MO/jours respectivement. Cette augmentation de production est expliquée par la forte solubilisation du substrat ainsi que par la concentration élevée de substrats facilement biodégradables consommé directement par les micro-organismes disponibles par l'inoculum. Dès le deuxième jour, la production en méthane commence à se diminuée jusqu'au 10^{ème} jours avec une faible augmentation au 4^{ème} jour. Cette diminution est due à la consommation des AGV et la transformation de ces derniers en biogaz. A partir de dixièmes jours, la production en méthane se stabilise entre 0 et 5 ml de CH₄/g MO/jours jusqu'à la fin de digestion grâce à l'épuisement de la matière organique facilement biodégradable.

Concernant le réacteur qui contient 100% de DC, la production en méthane ne commence qu'à partir de cinquième jour pour atteindre sa valeur maximale de 9 ml de CH₄/g MO/jours au 7^{ème} jours. A partir de 8^{ème} jour, la production en méthane commence à se diminuer pour se stabilisée à des valeurs inférieures à 5 du 10^{ème} jour jusqu'à la fin de digestion. Cette faible production est expliquée par la nature de substrat difficilement biodégradable.

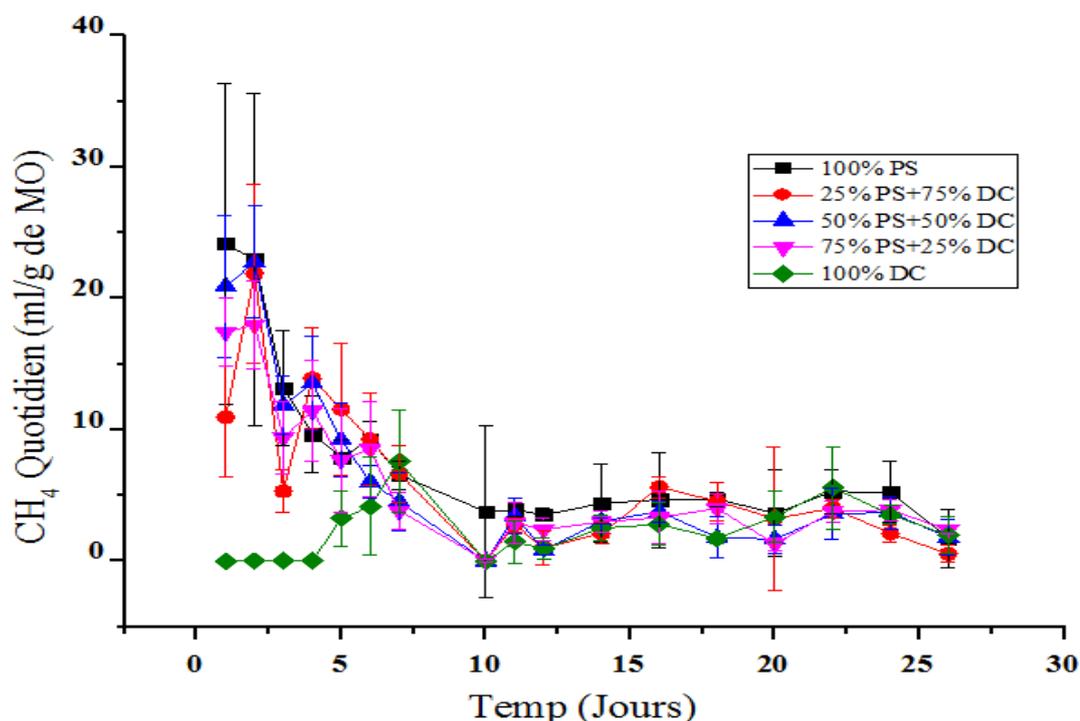


Figure 10 : Production quotidienne du CH₄ en fonction de temps

III.5.2. Production accumulative en méthane

La figure 11 montre la production accumulative en méthane en fonction du temps. La production en méthane connaît une augmentation significative au cours des sept premiers jours pour les quatre réacteurs contenant 100% PS ; 25% PS+75% DC ; 50% PS+50% DC ; 75% PS+25% DC avec 91 ± 1 , 79 ± 1 , 88 ± 1 , 78 ± 1 , 16 ± 1 ml de CH₄/g MO respectivement. Cette augmentation rapide est expliquée par la consommation de la MO facilement biodégradable par les micro-organismes. A partir de 8^{ème} jour, une faible augmentation est enregistrée pour les quatre réacteurs qui rendent la courbe presque stable grâce à l'épuisement de la MO facilement biodégradable comme il est indiqué auparavant.

Les valeurs finales du rendement accumulé en méthane pour les quatre réacteurs est estimé de 140 ± 1.5 ; 99.95 ± 1 ; 105 ± 1 ; 99.95 ± 1 ml de CH₄/g MO pour 100% PS ; 25% PS+75% DC ; 50% PS+50% DC ; 75% PS+25% DC respectivement.

Concernant le cinquième réacteur qui contient 100% DC, la courbe de production accumulé en méthane est presque stable dès le début de digestion jusqu'à la fin sauf une légère augmentation au septième jour pour atteindre une valeur finale de production accumulé en méthane estimé de 35.5 ± 1.5 ml de CH₄/g MO.

Dans le cas de la présente étude, la co-digestion influe négativement à la production an méthane à partir des déchets de palmier dattier (palmes sèches) de la variété de *H'mira* et positivement sur les déchets de camelin. Le meilleur rapport qui donne le meilleur rendement en méthane est celle de 50% PS+50% DC.

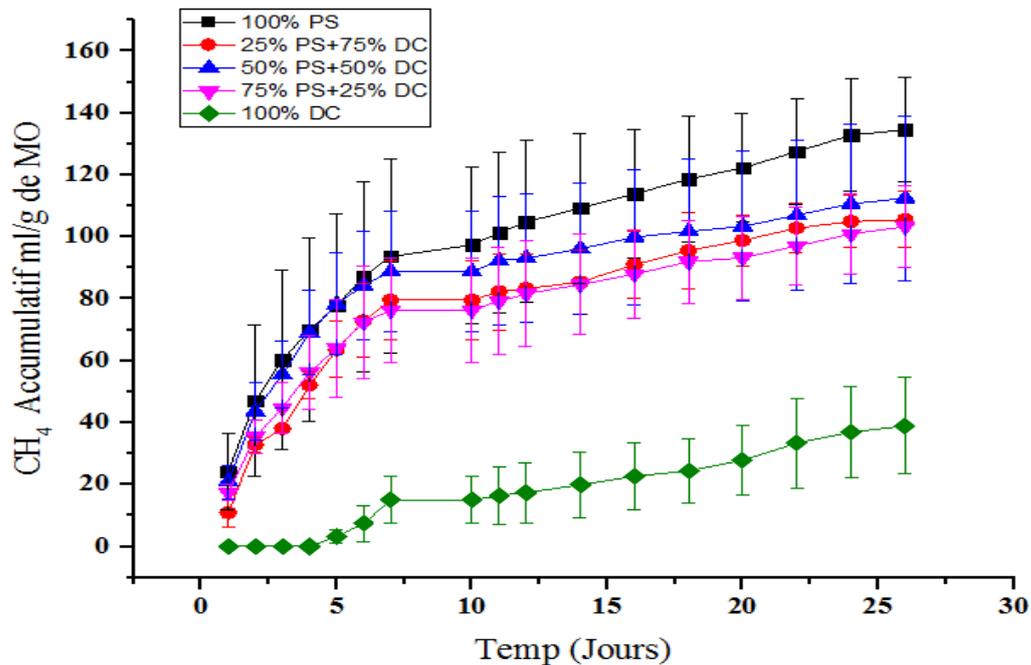


Figure 11 : Production accumulée du CH₄ en fonction de temps

III.6. Conclusion

A partir de ces résultats il conclut que les palmes sèche de palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L) de la variété *H'mira* génère une quantité de déchet annuelle estimé de 22.916,68 tonnes de déchet contenant 12.063,20 tonne de palmes sèches. Ces palmes cèches sont riches en matière lignocellulosique qui pourrait être valorisé par la bioconversion via la digestion anaérobie pour produire de la bioénergie (biogaz).

Dans ce travail, la technique de co-digestion à été utilisé. Les palmes sèches ont été co-digérer avec les déchets camelin en utilisant des différentes proportions afin améliorer le rendement en méthane. Les résultats montre que la co-digestion influe négativement sur les palmes sèche et positivement sur les déchets de camelin, et le meilleure rendement est obtenu avec la proportion de (50% PS+50% DC).

***CONCLUSION
GENERALE***

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Cette étude consiste à valoriser les déchets de palmiers dattiers (les palmes sèches) par le processus de « co-digestion » avec les déchets de Camelin (crotte) pour améliorer le rendement de la production de biogaz.

La démarche expérimentale consiste de mettre dans les digesteurs de différentes proportions des deux substrat à savoir 100% PS ; 25% PS+75%DC ; 50%PS+50%DC ;75%PS+25%DC et 100%DC avec la mesure des paramètres de contrôle (DCO, PH, AGV, TAC) au début et la fin de DA. Le volume en méthane produit est suivi

Les résultats obtenus montrent une augmentation de tous les paramètres de contrôle au début de DA puis une diminution à la fin ce qui indique la transformation de la matière organique en méthane. Le rapport de TAC/AGV ne dépasse pas les 0.18 pour tous les réacteurs ce qui démontre le bon déroulement du processus.

La production en méthane pour les réacteurs contenant 100% PS ; (50%PS+50%DC) (25%PS+75%DC), (75%PS+25%DC) et 100% DC est de 140, 105, 99.95,35.5 ml de CH₄ respectivement. Il est constaté que la co-digestion influe négativement sur les palmes sèche des palmiers dattier et positivement sur les déchets de dromadaire, et que la meilleure proportion est celle de (50%PS+50%DC).

A la fin, comme perspective il est suggéré de faire plus d'analyses (lignocellulosique, analyses élémentaires, (C/N) afin d'appliqué un prétraitement adéquat pour améliorer le rendement en méthane.

Les Références

REFERENCES

REFERENCES

- 1) H. Derbal, R. Miri et A. M’Raoui. « Etude d’un système de production d’hydrogène par voie solaire Application sur l’électrolyse de la vapeur d’eau à très hautes températures ». Rev. Energ. Ren. 2005 ; Vol. 8, p.137-156.
- 2) C. Bonechi, M. Consumi, A. Donati, G. Leone, A. Magnani, G. Tamasi, C. Rossi «Biomass : An overview » University of Siena, Siena, Italy, 2017.
- 3) N. Bouguedoura, F. Si-dehbi, S. Moussouni , et D. Chabane, «Les biotechnologies au service du développement de la phoeniculture »Conférence, Salon International des dattes Biskra 2015.
- 4) « La biomasse - Énergies nouvelles et renouvelables Un élément clé au service d'une croissance durable ». Union des Industries chimiques mars 2013.
- 5) «Biomass compared to fossil fuels, solar and wind » Viaspace 2021.
http://www.viaspace.com/biomass_versus_alternatives.php > .
- 6) Les ressources biomasse - biomasse/biogaz –2021 Guadeloupe Energie.gp.
- 7) Recherches en économie et sociologie rurales, (les biocarburants de première génération : un bilan mondial mitigé (version révisée juillet 2012).
- 8) K. Dutta, A. Daverey, Jih-Gaw Lin Review « Evolution retrospective for alternative fuels: First to fourth generation » Institute of Environmental Engineering, National Chiao Tung University, 1001 University Road, Hsinchu City 30010, Taiwan , 2014.
- 9) R. SimS, M. TayloR and J. SaddleR, W mabee, November 2008 « From 1st- to 2nd- Generation BioFuel technoloGies », An overview of current industry and RD&D activities.
- 10) A. Singh, S. Irving Olsen and P. Singh Nigam, 2011 «A viable technology to generate third-generation biofuel» . (wileyonlinelibrary.com) DOI 10.1002/jctb.2666.
- 11) S. Alfermore, C. Molina-jouve, January 2016 ,« De la conversion microbienne des ressources lignocellulosiques pour la production de molécules énergétiques : verrous et perspectives » (pdf).
- 12) K. Ghasemzadeh, E. Jalilnejad and A. Basile, 2017. «Production of bioalcohol and biomethane, in: Bioenergy Systems for the Future: Prospects for Biofuels and Biohydrogen ». Elsevier Ltd., pp. 61–86. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101031-0.00003-X>.

REFERENCES

- 13) R.B Nair, P.R. Lennartsson, M.J. Taherzadeh, 2016. «Bioethanol Production From Agricultural and Municipal Wastes, in: Current Developments in Biotechnology and Bioengineering: Solid Waste Management ». Elsevier B.V., pp. 157–190. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63664-5.00008-3>.
- 14) A. Daverey, K. Dutta, Jih-Gaw Lin «Evolution retrospective for alternative fuels: First to fourth generation ». *renewable energy* 69(2014) 114-122.
- 15) A. Bawadi , M. Syed Anuar Faua'ad Syed , Z. Shokravi, I. Shahrul , A.K. Khairul, Md. Azmi Nik, Md Maniruzzaman A. Aziz « Fourth generation biofuel »: A review on risks and mitigation strategies 107(2019) 37-50.
- 16) H.A. Alalwan, H. H. Alminshid, and H.A.S. Aljaafari « Promising evolution of biofuel generations. Subject review ». Volume 28 March 2019.
- 17) Z. Moravvej, M.A Makarem and M. Reza Rahimpour. «The fourth generation of Biofuel ». Department of Chemical Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran.2019, Chapter 20.
- 18) S. Amina, Recherche et Développement « La biomasse lignocellulosique et la bioénergie », N° 21, 2011. Chargée d'Études, Division Bioénergie & Environnement.
- 19) N. Eloutassi, B. Louaste, L. Boudine et A. Remmal, « Valorisation de la biomasse lignocellulosique pour la production de bioéthanol de deuxième génération » ; *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 17 N°4 (2014) 600 – 609.
- 20) P. Basu, 2013 « Biomass characteristics ». Chapitre3. pdf.
- 21) M. Djerbi (1994) « Précis de phoeniciculture » F.A.O. Rome, 192 p.
- 22) Faostat, 2017. «Food and Agriculture Organization of the United Nations ». Retrieved from <http://faostat.fao.org/site>.
- 23) A. AFN and Radwan ES, 2017. «The current status of the date palm (Phoenix dactylifera) and its uses in the Gaza Strip, Palestine. *Biodiversitas*». 18: 1047-1061.
- 24) M. Feldman.1976. «Taxonomie classification and names of wild, cul and modern cultivated whaets». *Evolution of plants*. Longman, london, 120-128.
- 25) E. Espiard (2002) «Introduction à la transformation industrielle des fruits» Ed. Tech et Doc Lavoisier, 360 p.
- 26) S. Hannachi , « Le patrimoine phoenicicole national, » Dans, *Atelier sur la valorisation des dattes communes organisé à L'I.N.F.S.A.S. de Ourgla*, 1995.

REFERENCES

- 27) S. Acourene et M. Tama, « Caractérisation physicochimique des principaux cultivars de dattes de la région des Zibans, » Recherche Agronomique, revue semestriel le n° 1, IN RA Algérie, 1997, pp. 59 66.
- 28) M. Djaafri , 2020, « Amélioration de la digestion anaérobie des déchets organiques dans un digesteur en continu » Thèse Présentée pour l'obtention du grade de doctorat en science .
- 29) C.C.T. Chao, , R.R. Krueger, , 2007. «The Date Palm (Phoenix dactylifera L.): Overview of Biology, Uses, and Cultivation. Hort.Science». 42, 1077–1082
- 30) S. N. Abdel Rahman, Ali H.Al –Marzouqia, M. M.Abu-Omarb, A. A.Khaleelc; E. Galiwangoa, « Isolation and characterization of cellulose and α -cellulose from date palm biomass waste » . Volume 5, Issue 12, December 2019.
- 31) A. Nasser Ramadan, M.Z. M. Salem, S. Hiziroglu , H. A. Al-Mefarrej , A. S. Mohareb , M. Alam , I.M. Aref. May 2016.«Chemical Analysis of Different Parts of Date Palm (Phoenix dactylifera L.) Using Ultimate, Proximate and Thermo-Gravimetric Techniques for Energy Production ».
- 32) M. Michelin, H.A. Ruiz, D.P. Silvac, D.S. Ruzenec, J.A. Teixeirad and Maria Lourdes June (2015), « Cellulose from Lignocellulosic Waste »
- 33) Article « Le palmier dattier pourrait alimenter plus d'un million de logements en énergie taille du texte normale agrandir la taille du texte » Octobre 2016, <https://www.unc.edu.dz>.
- 34) Document GEO, decembre (2018), *Qu'est-ce que le bioéthanol ?* site ; « www-geo-fr.cdn.ampproject.org ».
- 35) D. Amor « Etude de l'évolution de la consommation énergétique d'irrigation des palmiers et le potentiel d'intégration du bioéthanol des déchets des dattes » Mémoire de fin d'études Master , UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA 2014.
- 36) S.B. Leschine « Cellulose Degradation in anaerobic environments » Rev (1995) , Microbiology, 49 399-426.
- 37) K. Ghasemzadeh, E. Jalilnejad, A. Basile Urmia « Production of bioalcohol and biomethane ». University of Technology, Urmia, Iran, †Institute on Membrane Technology (ITM-CNR), Rende, Italy.(2017), Page (61-86).
- 38) S. Menia, I. Nouicer, Y. Bakouri, A. M'raoui , H. Tebibel et A. Khellaf « Oil & gas science and Technology » – Revue d'IFP Energies nouvelles (2019), production d'hydrogène par procédés biologiques

REFERENCES

- 39) A. Osman, T. Deka, D. Rooney ; « Critical challenges in biohydrogen production processes from the organic feedstocks » ; Biomass Conversion and Biorefinery (August 2020).
- 40) M.H. Abd-Alla ,F.M. Morsy et A.W.E. El-Enany.« Hydrogen production from rotten dates by sequential three stages fermentation » Botany Department, Faculty of Science, Assiut University, Assiut 71516, Egypt 2011.
- 41) Horizons. <https://leshorison.net/cest-quoi-le-biomethane/>. (Janvier 2020).
- 42) S.B. Leschine « Cellulose Degradation in anaérobic environments » Rev (1995) , Microbiology, 49 399-426.
- 43) O. Kerrou, N. Lahboubi, M. Bakraoui, F. Karouach, Y. El Gnaoui, A. Schüch, W. Stinner, H. El Bari ;2021 « Methane production from anaerobic digestion of date palm leafet waste in Morocco ». Journal of Material Cycles and Waste Management <https://doi.org/10.1007/s10163-021-01238-z>.
- 44) W. Radeef, A. Shanableh , T. Merabtene « Impact of Date Palm Seed Size on Biogas Production from Date Seeds/Wastewater Treatment Sludge Mixture ». Volume 13, No. 1 (2016) 1-6.
- 45) J. MABALA, « Aptitude d'écosystèmes anaérobies industriels à produire du méthane à partir d'éthanol en conditions psychrophile, mésophile et thermophile ».
- 46) J-Louis « Polomé pour valbio système de biméthanisation » 2012, p 4.
- 47) I. BOUTOUTA « Valorisation énergétique des déchets solide urbains de la ville de blida ». 2012, Université Saad Dahlab Blida 1.
- 48) A. DAOUD B. Kaci . Essai de traitement des boues par le procédé de « digestion anaérobic » En vue de l'obtention du diplôme Master II en Agronomie .Option : Traitement et valorisation des ressources hydrique.2016-2017.
- 49) J. LACOUR « Valorisation de résidus agricoles et autres déchets organiques par digestion anaérobic en Haïti » N° d'ordre: 2012 ISAL0026 L'Université Quisqueya (Haïti) 2012.
- 50) Membres de jury « L'effet de prétraitement chimique alcalin par KOH sur la production du biogaz à partir des boues de la station de lagunage de la ville d'Adrar, » March 2010.
- 51) DJ. Batstone and PD. Jensen : « Anaerobic Processes » The University of Queensland, Brisbane, & 2011 Elsevier B.V. All rights reserved. QLD, Australia

REFERENCES

- 52) X. Liu, Z. Yan and Z-B. Yue « Chengdu Institute of Biology, Chengdu », China Hefei University of Technology, Hefei, China, 2011 Elsevier B.V. All rights reserved.
- 53) I. Angelidaki, B.KAhring « Anaerobic thermophilic digestion of manure at different ammonia loads: Effect of temperature », March 1994.
- 54) L.E. Marache, « La méthanisation des effluents et déchets organiques: état des connaissances sur le devenir pathogène » thèse de doctorat, université Paul- Sabatier de Toulouse, France, 2001.
- 55) M.H. Gerardi. « The microbiology of anaerobic digesters, wastewater microbiology series Hoboken, New Jersey » John Wiley & Sons, Inc.; 2003.
- 56) K.M. Mital. « Biogas systems: principles and applications ». New Delhi, India: New Age International (P) Limited; 1996.
- 57) Anonymats. Méthane génération frome humain, animal and agricultural Vastes. Washington DC, USA: National Académie of Sciences; 1977.
- 58) A. Mottet, « Recherche d'indicateurs de biodégradabilité anaérobie et modélisation de la digestion anaérobie thermophile: application aux boues secondaires d'épuration non traitées et prétraitées thermiquement », thèse de doctorat, université Montpelier, 2009.
- 59) A. Dahou, « la production de biogaz à partir de lagunage de la wilaya d'Adrar » université Kasdi Merbah, Ouargla, 2010.
- 60) N. Orellana, C. Ricardo, « Valorisation par digestion anaérobie des déchets organiques ménagers de la ville de Cuenca, Équateur », Master en sciences et gestion de l'environnement. 2018-2019, <http://hdl.handle.net/2268.2/72>
- 61) S. Achinas, V. Achinas, & Euverink, G.J.W.(2017). « A Technological Overview of biogas production from Biowaste. Engineering »,3(3),299-307,<https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.03.002>.
- 62) J.A. Oleszkiewicz, V.K. Sharma. « Stimulation and inhibition of anaerobic processes by heavy metals »—a review. *Biol Wastes* 1990;31:45–67.
- 63) H. Bouallagui, O. Haouari, Y. Touhami, R. Ben Cheikh, L. Marouani, M. Hamdi. « Effect of temperature on the performance of an anaerobic tubular reactor treating fruit and vegetable waste ». *Process Biochem* 2004;39:2143–8. doi:10.1016/j.procbio.2003.11.022.
- 64) R. Moletta. *La méthanisation* (3^e Éd.). « Libr Lavoisier» 2015. <http://www.lavoisier.fr/livre/environnement/la-methanisation-3e-ed/moletta/descriptif-9782743019914> (accessed March 4, 2016).

REFERENCES

- 65) H. Hartmann, B.K. Ahring. « Anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste: Influence of co-digestion with manure ». *Water Res* 2005;39:1543–52. doi:10.1016/j.watres.2005.02.001.
- 66) H. Hartmann, I. Angelidaki, B.K. Ahring. «Increase of anaerobic degradation of particulate organic matter in full-scale biogas plants by mechanical maceration ». *Water Sci Technol* 2000;41:145–153.
- 67) K. Izumi, Y. Okishio, N. Nagao, C. Niwa, S. Yamamoto, T. Toda «Effects of particle size on anaerobic digestion of food waste ». *Int Biodeterior Biodegrad* 2010;64:601–8. doi:10.1016/j.ibiod.2010.06.013.
- 68) I.W. Nah, Y.W. Kang, K-Y. Hwang, W-K. Song. «Mechanical pretreatment of waste activated sludge for anaerobic digestion process ». *Water Res* 2000;34:2362–2368.
- 69) H. Carrère, C. Dumas, A. Battimelli, D.J. Batstone, J.P. Delgenès, J.P. Steyer, et al. «Pretreatment methods to improve sludge anaerobic degradability ». A review. *J Hazard Mater* 2010;183:1–15. doi:10.1016/j.jhazmat.2010.06.129.
- 70) A. Tiehm, K. Nickel, U. Neis. «The use of ultrasound to accelerate the anaerobic digestion of sewage sludge ». *Water Sci Technol* 1997;36:121–128.
- 71) J-J Lay, T. Noike. « Influences of pH and moisture content on the methane production in high-solids sludge digestion ». *Water Res* 1997;31:1518–24.
- 72) H. Bouallagui, B. Rachdi, H. Gannoun, M. Hamdi. «Mesophilic and thermophilic anaerobic codigestion of abattoir wastewater and fruit and vegetable waste in anaerobic sequencing batch reactors ». *Biodegradation* 2009 ;20:401–9. doi:10.1007/s10532-008-9231-1.
- 73) M. Kayhanian «Performance of a High-Solids Anaerobic Digestion Process Under Various Ammonia Concentrations ». *J Chem Technol Biotechnol* 1994:349–52.
- 74) J.A. Siles, J. Brekelmans, M.A. Martín, A.F. Chica, A. Martín «Impact of ammonia and sulphate concentration on thermophilic anaerobic digestion ». *Bioresour Technol* 2010;101:9040–8. doi:10.1016/j.biortech.2010.06.013.
- 75) C. Bougrier, C. Albasi, J.P. Delgenès, H. Carrère, «Effect of ultrasonic, thermal and ozone pretreatments on waste activated sludge solubilisation and anaerobic biodegradability. *Chem Eng* ». *Process Intensif* 2006;45:711–8. doi:10.1016/j.cep.2006.02.005.
- 76) Z. Mladenovska, H. Hartmann, T. Kvist, M. Sales-Cruz, R. Gani, B.K. Ahring. «Thermal pretreatment of the solid fraction of manure: impact on the biogas reactor performance

REFERENCES

- and microbial community ». *Water Sci Technol* 2006;53:59–67. doi:10.2166/wst.2006.236.
- 77) Y. Lin, D. Wang, S. Wu, C. Wang. Alkali « pretreatment enhances biogas production in the anaerobic digestion of pulp and paper sludge ». *J Hazard Mater* 2009;170:366–73. doi:10.1016/j.jhazmat.2009.04.086.
- 78) A. Valo, H. Carrère, JP. Delgenès, «Thermal, chemical and thermo-chemical pre-treatment of waste activated sludge for anaerobic digestion: Pre-treatment of waste activated sludge ». *J Chem Technol Biotechnol* 2004;79:1197–203. doi:10.1002/jctb.1106
- 79) L. Chu, S. Yan, X-H. Xing, X. Sun, B. Jurcik. «Progress and perspectives of sludge ozonation as a powerful pretreatment method for minimization of excess sludge production ». *Water Res* 2009;43:1811–22. doi:10.1016/j.watres.2009.02.012.
- 80) IT. Yeom, KR. Lee, YH. Lee, KH. Ahn, SH. Lee. «Effects of ozone treatment on the biodegradability of sludge from municipal wastewater treatment plants ». *Water Sci Technol* 2002;46:421–5.
- 81) F. Ometto, G. Quiroga, P. Pšenička, R. Whitton, B. Jefferson, R. Villa .«Impacts of microalgae pretreatments for improved anaerobic digestion: Thermal treatment, thermal hydrolysis, ultrasound and enzymatic hydrolysis ». *Water Res* 2014;65:350–61. doi:10.1016/j.watres.2014.07.040.
- 82) G. Bochmann, Herfellner T, Susanto F, Kreuter F, Pesta G. «Application of enzymes in anaerobic digestion ». *Water Sci Technol* 2007;56:29–35. doi:10.2166/wst.2007.727.
- 83) H. Yi, Y. Han, Y. Zhuo, «Effect of Combined Pretreatment of Waste Activated Sludge for Anaerobic Digestion Process ». *Procedia Environ Sci* 2013;18:716–21. doi:10.1016/j.proenv.2013.04.097.
- 84) R. Uma Rani, S. Adish Kumar, S. Kaliappan, Yeom I-T, J. Low. Rajesh Banu «temperature thermochemical pretreatment of dairy waste activated sludge for anaerobic digestion process ». *Bioresour Technol* 2012;103:415–24. doi:10.1016/j.biortech.2011.09.124.
- 85) N. Chamchoi, H. Garcia, I. Angelidaki. «Methane Potential of Household Waste : Batch Assays Determination ». *J Enviro Res* 2011;33:13–26.
- 86) M.A.D.L. Rubia, F. Raposo, B. Rincón, R. Borja, «Evaluation of the hydrolytic–acidogenic step of a two-stage mesophilic anaerobic digestion process of sunflower oil cake ». *Bioresour. Technol.* 100, 4133–4138 (2009).

REFERENCES

- 87) J.L. Garcia, B.K.C. Patel, B. Ollivier, «Taxonomic, phylogenetic, and ecological diversity of methanogenic Archaea. *Anaerobe*6(4) », 205–226 (2000).
- 88) E.H. Koupaie, S. Dahadha, A.A.B. Lakeh, , A. Azizi, E. Elbeshbishy,2019. « Enzymatic pretreatment of Lignocellulosic biomass for enhanced biomethane production »-A review .*Journal of Environmental Management* 233 ,774 - 784.<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.09.106>.
- 89) M. Kouas « Caractérisation cinétique de la biodégradation de substrats solides et application à l'optimisation et à la modélisation de la co-digestion ». Génie des procédés. Université Montpellier; Université de Sfax. Faculté des sciences, 2018. Français. NNT : 2018 MONTG 021
- 90) K.S. Creamer, , Y. Chen, , C.M. Williams, , J.J. Cheng, , 2010. « Bioresource Technology Stable thermophilic anaerobic digestion of dissolved air flotation (DAF) sludge by co-digestion with swine manure ». *Bioresource Technology* 101, 3020–3024. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.12.029>.
- 91) R. Moral, , C. Paredes, , B. Rufete, , 2008. «Salinity , organic content , micronutrients and heavy metals in pig slurries from South-eastern Spain» 28, 367–371. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.01.009>.
- 92) I. Angelidaki, , L. Ellegaard, , B. Kiør, , 2003. «Applications of the Anaerobic Digestion Process » 82, 1–33.
- 93) Lexique Gaz Tarif Réglementé janvier 2018. « définition de biogaz ».Site « <https://gaz-tarif-reglemente.fr> »
- 94) biogaz – Wikipédia, (Juin 2014) , site : « <https://fr.m.wikipedia.org> »
- 95) Méthanisation (production de biogaz et de digestat) *Energies renouvelables* 2011.
- 96) Document « les valorisations énergétiques des biogaz et gaz de synthèse » Aout 2018.
- 97) A. Cabrera-Codony, M.A. Montes- Mora, M. Sa, M.J. Mart, R Gonzalez-Olmos, «biogas Upgrading : Optimal Activated Carbon Properties for siloxane Removal, *Environ. Sci. Technol* ». 48 (2014) 7187-7195.
- 98) Document de dalkia biogaz « Valorisation du biogaz ».2021.
- 99) Q. Zhao, E. Leonhardt, C. Mac Connell, C. Frear and S. Chen « Purification Technologies for Biogas Generated by Anaerobic Digestion » ; CSANR Research Report 2010 – 001, Climate Friendly Farming.
- 100) E. Ryckebosch, M. Drouillon, and H. Vervaeren. « Techniques for transformation of biogas to biomethane. *Biomass and Bioenergy* », 35(5) :1633–1645, May 2011.

REFERENCES

- 101) J.P. Canler - J.M. Perret. « La réduction de boues par voie biologique par le procédé MycET² », Document technique N° 39 Mars 2013, Département Ecotechnologie, Thème de recherche TED E.
- 102) Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec. « Détermination de la demande chimique en oxygène : méthode de reflux en système fermé suivi d'un dosage par colorimétrie avec le bichromate de potassium » MA. 315 – DCO 1.1, Rév0. 4, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec, 2016, 12 p.
- 103) Taallah « Étude du comportement physico-mécanique du bloc de terre comprimée avec fibres » Thèse de doctorat, Université Mohamed khider, Biskra. Algérie.182p,(2014).
- 104) I. Boutouta, « A Valorisation énergétique des déchets solide urbains de la ville de Blida ». 2011/2012 , Blida Université Saad Dahlab Blida 1.
- 105) R. Moletta. article « contrôle et conduite des digesteurs anaérobies », Revue des sciences de l'eau journal of water science. Volume 2, numéro 2, 1989.
- 106) «Guide de suivi de la biologie sur une unite de méthanisation agricole » Réalisé dans le cadre de l'Association des Agriculteurs Méthaniseurs de France (AAMf), soutenu par l'ADEME ; Juin 2011.
- 107) B. Rincón, R. Borja, JM. Gonzalez . (2008) « Influence of organic loading rate and hydraulic retention time on the performance, stability and microbial communities of one-stage anaerobic digestion of two-phase olive mill solid residue. Biochemical Engineering » Journal 40: 253–261.
- 108) I. DJOUDI , « Contribution à l'identification et à la caractérisation de quelques accessions du palmier dattier (Phoenix Dactylifra. L) dans la région de Biskra » Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de magister en sciences agronomiques 2012/2013.
- 109) G. Peyron, Janvier 2000 « Cultiver le palmier-dattier » Ministère de l'agriculture et du développement de Djibouti.
- 110) S. Moulay Hassan «Le Palmier Dattier base de la mise en valeur des oasis au Maroc » International Plant, Genetic Resources Institute.254p (2003) .
- 111) Em. Miège « le palmier-dattier au Maroc » Journal d'agriculture traditionnelle et de botanique appliquée , 1952, / 351-352 / pp.28-32.
- 112) J. Clement, 1981- «Larousse Agricole »,395-700 pages.
- 113) R. Moletta , 2002- « La méthanisation de la matière organique ».

REFERENCES

- 114) S. Kalloum , M. Khelafi, M. Djaafri, A. Tahri et A. Touzi « Etude de l'influence du pH sur la production du biogaz à partir des déchets ménagers ». Vol.10 N°4 (2007) 539 – 543.
- 115) M. Abd. Lamir « Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de Master en : Génie des Procédés ». Université Ahmed Draïa Adrar, Année Universitaire : 2019/2020
- 116) M. Djaafri, S. Kalloum, M. Khelafi, A. Tahri, F. Salem, K. Kaïdi, O. Barako, A. Kadri, L. Bensmail et A. Amahrouch« Amélioration de la digestion anaérobie des déchets ménagers (déchets de restaurant) en utilisant un prétraitement physique ». Revue des Energies Renouvelables SIENR'14 Ghardaïa (2014) 93 – 98.
- 117) A. Takdastan, H. Movahedian, N. Jafarzadeh, et B. Bina, «The Efficiency of Anaerobic Digesters on Microbial Quality of Sludge in Isfahan and Shahinshahr Waterwaste Treatment Plant.» Iranian J Env Health Sci Eng (2005) : 56-59.
- 118) A. Saïdi-Boulahia , S. Abada et M. Saber, «Valorisation des déchets organiques ménagers et les déjections bovines par la méthanisation» Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER B.P.62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger, Algérie. Revue des Energies Renouvelables Vol. 21 N°4 (2018) 537-543 537.
- 119) S. Kalloum, M. Khelafi, M. Djaafri, A. Tahri et A. Touzi « Etude de l'influence du pH sur la production du biogaz à partir des déchets ménagers » Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien , B.P. 478, Route de Reggane, 01000 Adrar 25 Décembre 2007.
- 120) I. MLOUKI, A. AISSAOUI, «L'effet de prétraitement chimique alcalin par KOH sur la production du biogaz à partir des boues de la station de lagunage de La ville d'Adrar » MA Univ d'Adrar Année Universitaire : 2016 / 2017.
- 121) L.N. Liew, J. Shi, Y. Li, 2012. «Methane production from solid-state anaerobic digestion of lignocellulosic biomass. Biomass and Bioenergy» 46, 125–132. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.09.014>.

