République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Ahmed Draïa Adrar

جامعة أحمد دراية ـ أدرار

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département d'Hydrocarbures et Energies Renouvelables

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

Filière : Génie des Procédés

Spécialité : Génie Chimique

Thème :

Contribution à l'étude de la transformation des sous-produits des fruits de *Balanites aegyptiaca* en biogaz

Préparé par :

Mlle. ABASSI Malika

Mlle. AZZAOUI Zahira

Membres de jury d'évaluation :

Mr.	CHADLI Samir	Président	MCA	Univ. Adrar
Mr.	BOULAL Ahmed	Encadreur	MCA	Univ. Adrar
Mr.	HADRI Kamel	Co-encadreur	AR	URER/MS. Adrar
Mr.	KHELAFI Mostefa	Examinateur	AR	URER/MS. Adrar

Année Universitaire : 2021/2022

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

People's Democratic Republic of Algeria

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
جامعة أحمد دراية- أدرار
المكتبة المركزية
مصلحة البحث الببليوغرافي

Ministry of Higher Education and Scientific Research
University Ahmed Draia of Adrar
The central library

جامعة احمد دراية - ادرار

شهادة الترخيص بالإيداع

انا الأستاذ(ة) : بولال أحمد

المشرف مذكرة الماستر الموسومة بـــ : Contribution à l'étude de la transformation des sous-produits de fruits de Balanites aegyptiaca en biogaz.

من إنجاز الطالب(ة): ABASSI Malika et AZZAOUI Zahia

و الطالب(ة):

كلية : العلوم و التكنولوجيا

القسم : المحروقات والطاقات المتجددة

التخصص: هندسة كيميائية

تاريخ تقييم / مناقشة: يوم 08 جوان 2022

أشهد ان الطلبة قد قاموا بالتعديلات والتصحيحات المطلوبة من طرف لجنة التقييم / المناقشة، وان المطابقة بين النسخة الورقية والإلكترونية استوفت جميع شروطها.

وبإمكانهم إيداع النسخ الورقية (02) والاليكترونية (PDF).

- امضاء المشرف:

ادرار في : 12 جوان 2022

مساعد رئيس القسم:

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
قسم المحروقات والطاقات المتجددة

أ.د: خليفي علي
رئيس قسم المحروقات والطاقات المتجددة
بكلية العلوم والتكنولوجيا

ملاحظة :لاتقبل أي شهادة بدون التوقيع والمصادقة.

Dédicace

***Je* dédie ce travail à :**

Mes chers parents *pour leur soutien moral qu'ils m'ont apporté et les sacrifices émisent à mon égard durant mes études. A* ***ma Grand-Mère*** *(Qu'Allah ait pitié d'elle).*

A mes Sœurs ***Aida***, ***siham***, ***Milouda*** *Et* ***Fatima****.*

A Mes frères ***Souleymane*** *et* ***Abd el Hamid****.*

Toute la famille ***ABASSI****.*

Une spéciale dédicace à une personne qui compte beaucoup pour moi.

A ma binôme ***Zahira****.*

A ma chère amie ***Rachida****.*

Et a' toutes les personnes qui ont contribué de prés ou de loin a la réalisation de ce travail .

Merci.

Malika

Dédicace

J'ai l'honneur de dédier ce travail :

***A ma chère mère**, **A mon Cher père**, **A ma chére tante**, **A mes soeurs, A mes frères**,*

*A toute la famille **AZZAOUI.***

*A mon amie **MALIKA** et à tous mes amies.*

Merci a toutes.

Zahira

Remerciement

Nous remercions Allah qui nous a donné le courage et la patience jusqu'au bout de nos études.

Ce travail a été réalisé au laboratoire de l'Unité de Recherche en Energie Renouvelables en Milieu Saharien ***(URER/MS- Adrar)***

Nous remercions également toutes les personnes qui ont contribué au succès de nos lors de la rédaction de ce mémoire.

Nous voudrons adresser notre premier remerciement t à Notre directeur de mémoire ***Dr. BOULAL*** *Ahmed. Maitre conférence "A" au Département de Sciences de la Nature et de la Vie à l'Université Ahmed Draïa- Adrar, qui a accepté de nous encadrer et de suivre ce travail avec patience, compréhension et vigilance, ce qui nous a donné l'occasion de profiter dans la préparation de ce mémoire. Un grand merci à* ***Mr. HADRI Kamel,*** *Attaché de recherche à l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien pour l'orientation, les conseils et l'assistance qu'il nous a donnés.*

Nous tenons à remercier ***Mr. CHADLI Samir,*** *Maitre conférence "A" à l'Université d'Adrar, d'avoir bien voulu accepter de présider le jury de ce mémoire.*

Nous remercions également ***Mr. Khelafi Mostefa,*** *Attaché de recherche à l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien, d'avoir accepté d'examiner ce travail*

Nous remercions également ***Mr. BENSSAID Achour****, Assistant de chercheur de l'Unité des énergies Renouvelables pour son aide qui était toujours présente pendant ce travail.*

Je voudrais exprimer ma gratitude à l'ensemble des membres du jury.

Résumé

Selon l'étude réalisée durant l'année universitaire 2019/2020 par les étudiantes, Massoudi et Ammar, elles ont produit du bioéthanol à partir des fruits du dattier du désert (*Balanites aegyptiaca*) par la réaction de fermentation, du fait que ses fruits sont riches en sucre fermentescible. Le rendement de production du bioéthanol atteint lors de cette étude est 30% (125g de fruit produit 30mL de bioéthanol). Cependant, à la fin de ce procédé, elles ont obtenu un résidu. La question c'est : que fait-on de ces résidus ? Ce problème sera abordé dans notre étude de recherche cette année. Le résidu de la fermentation serra utilisé comme substrat (déchet) pour produire du biogaz. En tant qu'énergie alternative et respectueuse de l'environnement, il présente de nombreux avantages non négligeables ainsi que de nombreuse incitation à son utilisation.

Dans cette étude, nous nous sommes focalisées sur la valorisation des résidus récupérer après la production de bioéthanol à partir des fruits de dattier du désert pour la production de biogaz. La production de biogaz (digestion anaérobie ou méthanisation) , est un processus biologique naturel de décomposition de la matière organique par des microorganismes (bactéries) qui s'activent dans des conditions anaérobiques. Le contrôle de l'évolution du processus est assuré par les paramètres influant sur les différents stades, tels que le pH, la demande chimique en oxygène (DCO), les acides gras volatils (AGV), les Titre Alcalimétrique Complet (TAC).

Les résultats de cette étude ont montré que le volume du biogaz obtenu est de 500 mL à partir d'une masse d'environ de 8.5 g de résidu pendant 45 jours. Les résultats de cette étude montrent clairement que la matière organique présente dans les déchets traités peut être utilisée comme matière première dans la production de biogaz et est considérée comme une source nouvelle, diversifiée dans la production de biogaz.

Mots clés : Biogaz, *Balanites aegyptiaca*, dattier du désert, digestion anaérobie, matière organique.

Abstract

According to the study conducted during the academic year 2019/2020 by the students, Massoudi and Ammar, they produced bioethanol from the fruits of the desert date palm (*Balanites aegyptiaca*) by the fermentation reaction, due to the fact that its fruits are rich in fermentable sugar. The yield of bioethanol production achieved in this study is 30% (125g of fruit produces 30mL of bioethanol). However, at the end of this process, they obtained a residue. The question is : what to do with this residue? This problem will be addressed in our research study this year. The residue of the fermentation will be used as substrate (waste) to produce biogas. As an alternative and environmentally friendly energy, it has many significant advantages and incentives for its use.

In this study, we focused on the valorization of the residues recovered after the production of bioethanol from the fruits of desert date palm for the production of biogas. The production of biogas (anaerobic digestion or methanisation), is a natural biological process of decomposition of organic matter by microorganisms (bacteria) that activate in anaerobic conditions. The control of the evolution of the process is ensured by the parameters influencing the different stages, such as pH, chemical oxygen demand (COD), volatile fatty acids (VFA), Total Alkalimetric Title (TAC).

The results of this study showed that the volume of the biogas obtained is 500 mL from a mass of about 8.5 g of residue for 45 days. The results of this study clearly show that the organic matter present in the treated waste can be used as a raw material in the production of biogas and is considered a new, diversified source in the production of biogas.

Keywords: Biogas, *Balanites aegyptiaca*, desert date palm, anaerobic digestion, organic matter.

ملخص

وفقا للدراسة التي أجريت خلال العام الدراسي 2020/2019 من قبل الطلاب ، مسعودي وعمار ، قاموا بإنتاج الإيثانول الحيوي من ثمار نخيل التمر الصحراوي (*Balanites aegyptiaca*) عن طريق تفاعل التخمير ، نظرا لأن ثماره غنية بالسكر القابل للتخمير. يبلغ إنتاج الإيثانول الحيوي الذي تم تحقيقه خلال هذه الدراسة 30 ٪ (125 جراما من الفاكهة تنتج 30 مل من الإيثانول الحيوي). ومع ذلك ، في نهاية هذه العملية ، حصلوا على بقايا. والسؤال هو: ماذا نفعل مع هذه المخلفات؟ سيتم معالجة هذه المشكلة في دراستنا البحثية هذا العام. سيتم استخدام بقايا التخمير كركيزة (نفايات) لإنتاج الغاز الحيوي. كطاقة بديلة وصديقة للبيئة، لديها العديد من المزايا الهامة وكذلك العديد من الحوافز لاستخدامها.

في هذه الدراسة, ركزنا على تثمين المخلفات المستردة بعد إنتاج الإيثانول الحيوي من ثمار التمر الصحراوي لإنتاج الغاز الحيوي. إنتاج الغاز الحيوي (الهضم اللاهوائي أو الهضم اللاهوائي) ، هو عملية بيولوجية طبيعية لتحلل المواد العضوية بواسطة الكائنات الحية الدقيقة (البكتيريا) التي يتم تنشيطها في ظل الظروف اللاهوائية. يتم ضمان السيطرة على تطور العملية من خلال المعلمات التي تؤثر على المراحل المختلفة، مثل الرقم الهيدروجيني، الطلب على الأكسجين الكيميائي (DCO)، الأحماض الدهنية المتطايرة (AGV)، عيار القلوي الكامل (TAC).

أظهرت نتائج هذه الدراسة أن حجم الغاز الحيوي الذي تم الحصول عليه هو 500 مل من كتلة حوالي 8.5 غرام من البقايا لمدة 45 يوما. تظهر نتائج هذه الدراسة بوضوح أن المادة العضوية الموجودة في النفايات المعالجة يمكن استخدامها كمواد خام في إنتاج الغاز الحيوي وتعتبر مصدرا جديدا ومتنوعا في إنتاج الغاز الحيوي.

الكلمات المفتاحية: الغاز الحيوي، *Balanites aegyptiaca*، نخيل التمر الصحراوي، الهضم اللاهوائي، المواد العضوية.

Table des matières

	Page
Dédicace……..	I
Remerciement……..	iii
Résumé……	iv
Abstract……...	V
ملخص……	vi
Liste des tableaux…….....	xi
Liste des figures……..	xii
Liste des photos…….. ……	xiii
Liste des abréviations……. ……	xiv
Introduction Générale……. …….	1
Partie bibliographique	
Chapitre I: *Balanites aegypteiaca*	
I.1. Introduction …….....	5
I.2. Origine du mot *"Balanites"et "aegyptiaca"* …….....	5
I.3. Classification Botanique…….....	5
I.4. Description de dattier du désert (*B. aegyptiaca*)…….....	6
I.4.1. Description morphologie …….....	6
I.4.2. Description Botanique ……	6
I.5. Adaptations à la sécheresse …….....	7
I.6.Répartition et habitat du dattier du désert dans le monde et en Algérie…….....	7
I.6.1. Répartition dans le monde…….....	7
I.6.2. Répartition en Algérie…….....	8
I.7. Rôle écologique……..……..	8
I.8.Les fruits de dattier du désert…….....	9
I.8.1. Définition et Aspect botanique des fruits…….....	9
I.8.2. Les constituants du fruit de *Balanites aegyptiaca*…….....	10
I.8.3. Analyse chimique…….....	11
I.8.4. Collection et conservation des fruits…….....	12
I.9. Utilisations…….....	12
I.9.1. Alimentation humaine…….....	12

I.9.2. Médicinales……..... 12
I.9.3. Fourragères……..... 13
I.9.4. Cosmétique……..... 13
I.10. Conclusion……..... 13

Chapitre II: Généralité sur le biogaz

II.1. Introduction……....…… 16
II.2. Définition des énergies …….....……..... 16
II.2. Les types d'énergies…….....……..... 17
II.2.1. Les énergies non renouvelables……... 17
II.2.2. Les énergies renouvelables……...……..... 17
II.2.2.1. Les différents types d'énergie renouvelable ……..... 17
II.3.Biomasse……..... 17
II.3.1. Définition ……..... 17
II.3.2. Les filières de biomasse……..... 18
II.3.2.1. Le bioéthanol……..... 18
II.3.2.2. Le biodiesel et les huiles végétales……..... 19
II.3.2.3. Le biogaz.....……..... 20
II.4. Généralité sur le biogaz..... ……..... 20
II.4.1. Définition……..... 20
II.4.2. Composition du biogaz…….……..... 21
II.4.3. Propriétés du biogaz……..... 22
II.4.4. Purification du biogaz……..... 23
II.4.5. Production du biogaz……..... 23
II.4.5.1. Biogaz produit à partir de sucre / amidon (première génération)...…… 24
II.4.5.2. Biogaz produit à partir de sources non alimentaire (deuxième génération)……. …..... 24
II.4.5.3. Biogaz produit à partir des algues (troisième génération) …..... 25
II.5. La méthanisation…….…..... 25
II.5.1. Définition…….....….....…..... 25
II.5.2. Les phase de dégradation biologique dans la méthanisation ….....…..... 25
II.5.2.1. L'hydrolyse……..….....….....…..... 26
II.5.2.2. L'acidogenèse..... ….....…..... 26
II.5.2.3. L'acétogenèse .....….....…..... 27

II.5.3.3. La méthanogenèse 27
II.6. Différents paramètres influençant la méthanisation..... 27
II.6.1.Température..... 27
II.6.2. pH… 28
II.6.3.Rapport C / N et Substances nutritive..... 28
II.6.4.Pression partielle en hydrogène..... 29
II.6.5.Humidité..... 29
II.6.6. La charge organique et le temps de séjour..... 29
II.6.7. Absence des inhibiteurs 30
II.7. Digesteur..... 31
II.7.1. Classification des différents types de digesteurs..... 32

Partie Expérimentale

Chapitre III : Matériels et Méthodes

III.1.1. Appareillage et verreries..... 35
III.1.2. Produits chimiques et réactifs 35
III.2.Substrat d'étude..... 35
III.2.1. Le choix du substrat 35
III.2.2. Lieux de prélèvement..... 36
III.2.2. Prélèvement du substrat..... 37
III.3. L'obtention du substrat d'étude (Fermentation alcoolique) 37
III.3.1.Préparation de moût des fruits de dattier du désert..... 37
III.4. Production du biogaz..... 40
III.4.1. Description du dispositif utilisé (biogaz)..... 40
III.4.2. Préparation du substrat de digestion anaérobie..... 40
III.4.2.1. Principe 40
III.4.2.2. Conditions du travail 40
III.5. Les analyses effectuées..... 41
III.5.1. Les paramètre de détermination du bilan de matière..... 41
III.5.1.1.Détermination de la matière sèche (MS)..... 41
III.5.1.2. Détermination de la teneur en matière organique (MO)..... 42
III.5.2. Les paramètre suivis durant la digestion anaérobie..... 44
III.5.2.1.Le PH..... 44

III.5.2.2. La détermination du Titre Alcalimétrique Complet (TAC) …….. 45
III.5.2.3. Le détermination des Acides Gras Volatils (AGV)……... 46
III.5.2.4. Détermination de la DCO …… 48
III.5.2.5. Le volume de biogaz…….. 50
III.5.2.6.L'inflammabilité du biogaz …… 51

Chapitre IV : Résultats et Discussion

IV.1. Caractérisation du substrat utilisé…….. 53
IV.2. Evolution des paramètres de fonctionnement……... 53
IV.2.1. Évolution du pH……. 53
IV.2.2. Évolution des acides gras volatils (AGV)…….. 55
IV.2.3. La variation du titre alcalimétrique (TAC) du milieu…… 56
IV.2.4. La variation du rapport AGV/TAC ……... 57
IV.2.5. Variation de la demande chimique en oxygène (DCO)…… 58
IV.2.6. La production du biogaz …… 59
IV.2.7. L'inflammabilité du biogaz…… 59
Conclusion général et Perspectives…….. **61**
Références Bibliographiques ……... **64**

Liste des tableaux

Page

Tableau I.1. Les pourcentages des parties du fruit……. 10

Tableau I.2. La composition de la pulpe du mésocarpe……. 10

Tableau I.3. Analyse chimique / Valeurs nutritionnelles…….. 12

Tableau I.4. Principaux constituants et caractéristiques de l'huile de Balanites..…… 13

Tableau II.1. La composition du biogaz…… 21

Tableau II.2. Composition du biogaz selon ses origines…….. 22

Tableau II.3. Techniques de purification du biogaz…….. 23

Tableau II.4. Les étapes de production de biogaz de la biomasse de premier génération……. 24

Tableau III.1. Produits chimiques et réactifs……. 35

Tableau IV.1. Caractéristiques des fruits de dattier du désert utilisé dans la fermentation…… 53

Tableau IV.2. Caractéristiques de substrat utilisé…….. 53

Liste des figures

Page

Figure I.1. La morphologie de dattier du désert……..... 6

Figure I.2. Répartition de *balanites aegyptiaca* en Afrique en fonction des isohvétes……. 8

Figure I.3. Répartition de *Balanites aegyptiaca* en Algéria…….. 8

Figure I.4. Fruit de dattier du désert…….. 10

Figure I.5. Principaux constituants de I 'amande……... 11

Figure I.6. L'analyse chimique de la pulpe du mésocarpe……. 11

Figure II.1. La combustion de la biomasse est neutre du point de vue émissions de CO_2…… 18

Figure II.2. La filière bioéthanol ou filière alcool ……... 19

Figure II.3. La filière des huiles végétales ou du biodiesel……... 19

Figure II.4. La filière du biogaz …… 20

Figure II.5. Différentes générations du biogaz…… 23

Figure II.6. La production de biogaz à partir de la biomasse de deuxième génération……. 24

Figure II.7. La production de biogaz à partir de le biomasse de troisième génération…….. 25

Figure II.8. Le processus de conversion de la matière organique lors de la méthanisation…... 26

Figure II.9. Taux de production de biogaz en fonction de la température……. 28

Figure II.10. Influence de la charge organique et le temps de séjour sur la production de biogaz…….. 29

Figure I.11. Différentes formes de digesteurs…… 32

Figure III.1. La situation géographique de la région de Timyawine en Algérie……... 36

Figure III.2. Schéma du digesteur utilisé…….. 40

Figure IV.1 : Évolution du pH en fonction de temps dans la méthanisation……. 54

Figure IV.2. Évolution des AVG dans le digesteur…….. 55

Figure IV.3. Évolution des TAC dans le digesteur…… 57

Figure IV.4. Variation du rapport AGV/TAC dans le digesteur……... 58

Figure IV.5 : Variation de la DCO dans le digesteur……. 58

Figure IV.6 : Evolution du volume de biogaz en fonction de temps dans le digesteur……. 59

Liste des Photos

	Page
Photo III.1. Substrat utilisé……	36
Photo III.2. Imbibition des fruits de dattier du désert…….	37
Photo III.3. Dénoyautages des fruits de dattier du désert……..	37
Photo III.4. La dilution……...	38
Photo III.5. Réactivation de la levure……	38
Photo III.6. Fermentation……...	39
Photo III.7. Filtration…….	39
Photo III.8. Filtrat(résidu)……..	39
Photo III.9. Bioréacteur dans un bain marie à 37 C°…….	41
Photo III.10. Détermination de la matière sèche à l'aide d'une étuve……	42
Photo III.11. Pèse de matière organique à l'aide d'une balance de précision.....	43
Photo III.12. Incinération de la matière organique à l'aide d'un four a moufle utilisé……...	43
Photo III.13. Mesure de pH à l'aide d'un pH mètre……	45
Photo III.14. Détermination de TAC…….	46
Photo III.15. L'ébullition de liquide sur la plaque chauffante ……...	47
Photo III.16. La détermination du L'AGV ……	48
Photo III.17.. Dilution de l'échantillon……..	48
Photo III.18. Échantillons après l'ajute de catalyseur et d'oxydant…….....	49
Photo III.19. L'échantillon dans le thermo-réacteur…….....	49
Photo III.20. Dosage d'échantillons à l'aide de sel de Mohr …….	49
Photo III.21. Dispositif de mesure du volume biogaz produit …….....	51
Photo III.22. Teste d'inflammabilité du biogaz produit…….	51
Photo IV.1. Vérification de L'inflammabilité du biogaz produit…….....	60

Liste des abréviations

AGV : Acides gras volatils

H_2SO_4 : L'acide sulfurique

ATEE: Association Technique Énergie Environnement

B. aegyptiaca : *Balanites aegyptiaca*

C: Le carbone

°C Degré**:** Celsius

CH_2O_3: Acide carbonique

CH3COOH Acide acétique

CH_4 : Méthane

Cm : Centimètre

C/N : Carbone / Azote

CO_2: Dioxyde de carbone H_2 Dihydrogène

CO**: Monoxyde de carbone**

COV**: Composé organique volatile**

DA: Digestion Anaérobie

DCO: Demande chimique en oxygène (mg/l).

EMHV: Ester méthylique d'acide gras N2 Diazote

EMHV: Ester méthylique d'huile Végétale

G.E.S: Gaz à effet de serre.

G: Génération

g: Gramme

h: Heure

H_2O: L'eau

H_2S: Sulfure d'hydrogène

ISD Installation de stockage des déchets

Kg Kilogramme

KOH : Hydroxyde de potassium

KWh: Kilowatt-heure

L: Litre

m: La masse

m^3: Mètre cube

meq: Milliéquivalent O_2 oxygène

mg : Milligramme ml millilitre

MO: Matière organique

MS: Matière sèche pH Le potentiel hydrogène

mv: Millivolt

N: Normalité

NH_3: Ammoniac

Nm_3: Nano Mètre Cube

NO_2: Nitrogen Dioxide

O_2 /L: Oxygène /litre

PCI: Pouvoir calorifique inferieure

Ppm: Parts per million

T: Température

TAC: Titre Alcalimétrique Complet

TRH: Temps de rétention hydraulique

V: Volume

%: Pourcentage

Introduction générale

Introduction générale

La croissance exponentielle de la population, du développement industriel et de l'urbanisation au cours du siècle dernier s'est accompagnée d'une augmentation de la demande d'énergie ; en particulier le pétrole et ses dérivés, le gaz naturel et le charbon, qui sont considérés comme des sources d'énergie primaires, mais cette demande accrue conduira à l'épuisement des réserves de combustibles fossiles. D'autre part, l'augmentation des activités humaines crée de plus en plus de problèmes à plusieurs niveaux, tels que l'érosion de la biodiversité, l'augmentation de la pollution (déchets de différentes sortes; déchets industriels, déchets agricoles...etc.) le réchauffement climatique(émissions de gaz à effet de serre (GES) **(Zegnouni, 2010).**

Pour cela les énergies renouvelables apparaissent à nos jours et à long terme comme la solution adéquate en diminuant l'inconvénient majeur émis par les énergies fossiles **(Bounaceur, 2015).** Les bioénergies notamment la biomasse ; et en particulier « la production du biogaz » constituent une réelle opportunité pour répondre à nos besoins énergétiques qui ne cessent de croître. Elles sont considérées comme une voie prometteuse pour les énergies renouvelables surtout que les énergies fossiles commencent à se raréfier.

L'Algérie est connue pour sa large diffusion d'arbres fruitiers presque non comestibles, tels que les (Ricin commune, Dattier du désert, Tamarix,……..etc), qui non pas reçu beaucoup d'attention pour améliorer sa culture et de son exploitation biotechnologique.

Dattier du désert *(Balanites aegyptiaca)* est un arbre forestier et fourrager, il a un rôle écologique et surtout Médicinale **(Berhaut, 1967;Von Maydell, 1983; Hall et Walker,1991).** Il se trouve dans les vallées, les cousins et dans les zones montagneuses, et c'est un arbre très répandu, on peut le rencontrer jusqu'a1000m d'altitude et sur les côtes maritimes. Il est très peu exigeant quant au sol, où il est commun sur les sols sableux pierreux, argileux. Ses fruits drupacés sont riches en glucides, l'amande est riche en huile comestible **(Hall et Walker, 1991 et Baumer, 1995).** Diverses études mettent en exergue les propriétés pharmacologiques et médicinales. Elle constitue un fourrage (feuilles, jeunes rameaux et fruits) apprécié des animaux domestiques et sauvages **(Harman et Sofowora, 1971; Dawidar et al., 1985; Fortin et al.,1997).**

Les fruits et les rebuts de fruits de l'arbre *Balanites aégyptiaca* sont constituent des substrats de choix pour produire de nombreuses substances à forte valeur ajoutée tels que le bioéthanol, biodiesel et le biogaz **(Ben Brahim, 2012; Hadri et al., 2022).** Ce dernier issu de la

bioconversion qui est la technologie utilisée pour convertir ces sources végétales en bioénergie. Cette technologie est simple, propre et elle est basée sur une large gamme de ressources naturelles (les boues des stations d'épuration, les déchets organiques municipaux des décharges publiques, les résidus agricoles, les déchets organiques animaux, végétaux et industriels,……. etc.) **(Chen et al., 2014).** Cette technique est mûre, respectueuse de l'environnement moins coûteuse.

Cet arbre forestier existe déjà au sud-ouest Algérien, en particulier à la wilaya de Tamanrasset, Adrar et Bordj Badji Mokhtar (Timyaouine). Où maintient l'équilibre écologique et participe dans l'amélioration de climat local.

L'objet de ce travail est la valorisation de résidu des fruits du dattier du désert comme un substrat pour la production de biogaz par des procédés biotechnologiques.

Ce travail est divisé en deux parties :

La première partie de ce mémoire présente une synthèse bibliographique comporte deux chapitres distincts. Le premier chapitre rapporte des données générales sur les dattiers du désert et la caractérisation morphologique, botanique, sa répartition dans le monde et en Algérie et leur utilisation. Le deuxième chapitre porte sur le biogaz, ce chapitre présent le biogaz, sa composition, ses propriétés et quelques informations sur la méthanisation.

La deuxième partie est divisée en deux chapitres : Le troisième chapitre rapporte les matériels et méthodes expérimentales mis en jeu pour la réalisation de ce travail. Le quatrième chapitre discutant l'ensemble des résultats obtenus.

Ce travail de mémoire est clôturé par une conclusion générale et des perspectives.

Partie bibliographique

Chapitre I:

Balanites aegypteiaca

I.1.Introduction

Balanites aegyptiaca **(L.) Delile**, autrement dit "dattier du désert" (Heiglige en Arabie) (**Hall et Walker, 1991)**.est un arbre tropical vivace à feuilles persistantes tolérant à la sécheresse appartenant à la famille des Zygophyllacées (Balanitacées), Il est connu sous des noms vernaculaires différents tels que Angarvriksha, Balanite, dattier égyptien, dattier du Sahel, dattier du désert, Acacia dattier, savonnier, myrobalan d'Egypte, Hajilij (nom communs dans différents pays Africains)…etc.

La famille des Zygophyllacées comporte le seul genre Balanites qui comprendrait plusieurs espèces. Sept de ces espèces se répartissent en Afrique et deux autres en Asie **(Gaussen et al., 1982; Booth et Wickens, 1988; Hall et Walker, 1991; Boesewinkel, 1994; Baumer, 1995)**. L'espèce comprend quelques variétés **(Sands, 1983; Hall et Walker, 1991; Boesewinkel, 1994)**.

Balanites aegyptiaca est une importante essence forestière, à usages multiples, des zones arides et semi-arides de l'Afrique, du Moyen-Orient et de l'Inde.. Elle est très utilitaire et est souvent considéré comme (une vache à lait) dans certaines régions de son aire de répartition.

I.2.Origine du mot "Balanites"et "aegyptiaca"

Balanites aegyptiaca, arbre a été décrit pour la première fois par **Prosper Alpinus** en 1592 dans la vallée du Nil sous le nom de *(Agihalicl)* **(Hall et Walker, 1991; Luxereau et Tubiana, 1994).**

Le nom "*Balanites*" dérive à l'origine du mot grec qui signifie fruit ressemble à un gland **(Gupta et al., 2012)** et "*aegyptiaca*" est relatif au lieu de sa première description.

I.3.Classification Botanique

En botanique les espèces sont désignées par leur genre et par leur espèce d'où le nom scientifique (botanique) de l'espèce. classent L'espèce comme suit: **(DAO Vincent,1993 (Gaussen et *a.l.*, 1982 ; Hall et Walker 1991; Boesewinkel, 1994)**

Règne Plantae

Sous-règne Tracheobionta

Division Magnoliophyta

Classe Magnoliopsida

Sous-classe Rosidae

Ordre Sapindales

Famille Zygophyllaceae

Genre *Balanites*

Espèce *Balanites Aegyptiaca* L.

I.4.Description de dattier du désert (*B. aegyptiaca*)

I.4.1.Description morphologie

C'est un arbuste ou un arbre multibranché, épineux, qui atteint jusqu'à 10 m de hauteur **(Yadav et Panghal, 2010; Chothani et Vaghasiya, 2011).** Généralement droit et souvent cannelé, le tronc mesure 30 à 35 cm de diamètre. L'écorce dure, de couleur gris foncé devient rugueuse et profondément striée avec une couronne arrondie ou ovale. **(Gnoula *et al.*, 2008).**Le dattier du désert fleurit de mars à mai et fructifie de juillet à octobre.

Figure I.1. La morphologie de dattier du désert .

I.4.2.Description Botanique

Balanites aegyptiaca est un arbuste ou un arbre qui peut atteindre une hauteur d'une dizaine de mètres.il est très rameux et épineux ; ses épines mesurent jusqu'à 7cm de long et sont disposées en spirale le long des rameaux et des branches. L'écorce est striée, les feuilles sont alternes paripennées bifoliolées, divisées en deux lobes et d'environ 5cm de long et 4cm de

large. Elles sont de couleur verte cendré ou vert glauque mat ouvert grisâtre **(Hall et Walker, 1991).**

Les fleurs sont jaunes verdâtres fleurissent à l'aisselle des feuilles. Elles produisent des fruits ovoïdes de 3 à 4 cm de long, très anguleuses, verdâtres pendant la maturation, jaune clair à maturité. la pulpe est comestible, contenant une amande riche en huile. le régime racinaire de cet arbre est double régime racinaire (des racines en surface qui captent l'eau dès qu'elle tombe et des racines en profondeur, qui vont jusqu'à 7 mètres pour puiser l'eau). L'arbre est donc particulièrement résistant à la sécheresse **(Rongead .2014)**.

I.5.Adaptations à la sécheresse

Comme la plupart des plantes de milieux semi-arides, le dattier du désert présente différentes adaptations morphologiques à la sécheresse. Ces adaptations sont ici particulièrement variées : pubescence, sclérification, feuilles coriaces, rameaux chlorophylliens assimilateurs réduit à l'état d'épines, système racinaire double (un appareil racinaire superficiel étendu capte de manière très performante l'eau immédiatement après les précipitations dans un rayon de 20mètres, et un appareil racinaire profond puise dans les réserves du sol jusqu'à 7 mètres). Ceci explique sa grande résistance aux sécheresses **(ANNIE, 1994)**

I.6.Répartition et habitat du dattie du désert dans le monde et en Algérie

I.6.1.Répartition dans le monde

Le *Balanites aegyptiaca* peut être cultivé dans divers habitats, Le dattier du désert se situe principalement en Afrique tropicale, particulièrement au Sahara central et occidental ainsi qu'en Asie extrême-orientale. Il y est arrivé depuis la Méditerranée via l'Égypte. Il pousse bien en sol sablonneux et désertiques sur tout type de géomorphologie : dépressions, fond des vallées, plaines et même montagnes.

- *Balanites aegyptiaca* existe spontanément dans les zones arides. Cette espèce présente en Afrique depuis le Sénégal, sur la côte atlantique jusqu'aux côtes somaliennes du golfe d'Aden, au sud de la vallée du Jourdain jusqu'au sud du Zimbabwe. Cette plante est considéré comme originaire d'Afrique, du Moyen-Orient

- En Asie,. D'après certaines auteurs, Le dattier du désert s'étend aussi en Asie de l'Océan Atlantique jusqu'á la Mer Rouge, et atteint la péninsule arabique, l'Océan Indien et la Birmanie. Au Sahel, Il joue un rôle écologique et socio-économique important **(Lauras, 1990).**

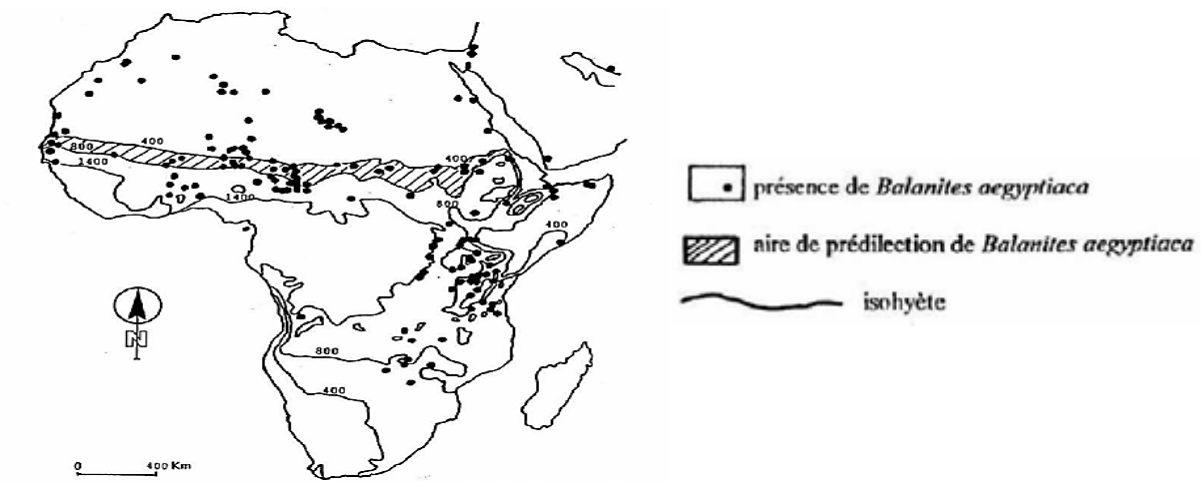

Figure I.2. Répartition de *Balanites aegyptiaca* en Afrique en fonction des isohyètes **(Hall et Walker 1991**).

I.6.2. Répartition en Algérie

En Algérie, le *Balanites aegyptiaca* se situe dans la région sud du pays, notamment à la wilaya de Tamanrasset **(Brama, 2001)**, à la wilaya Bordj Badji Mokhtar et la wilaya d'Adrar **.**

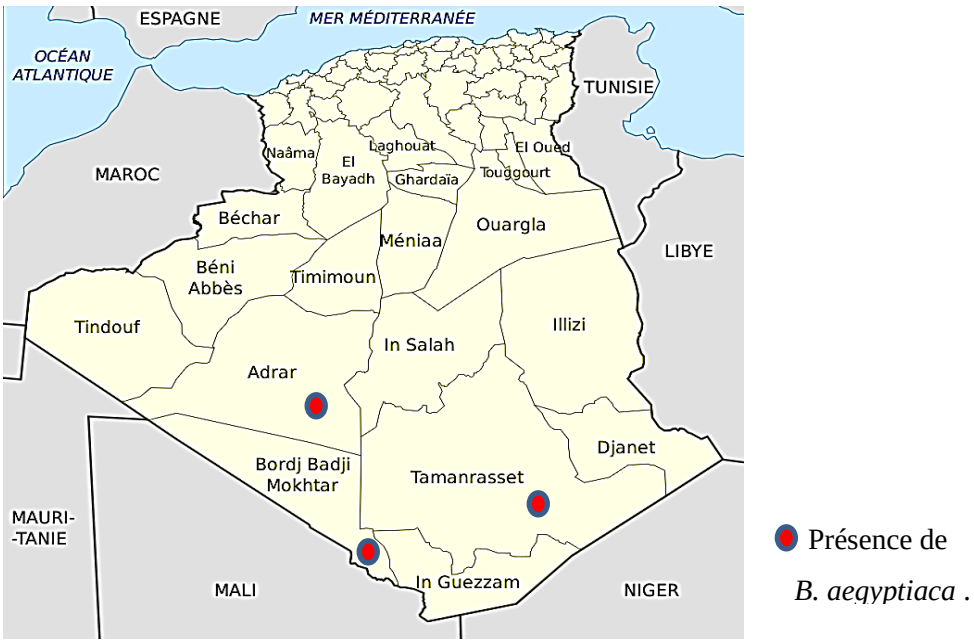

Figure I. 3 . Répartition de *Balanites aegyptiaca* en Algérie.

I.7.Rôle écologique

Le *Balanites* est une importance écologique grâce à sa résistance à la sécheresse **(Depierre et Gillet, 1991).** Le *Balanites aegyptiaca* est présente dans des zones côtières jusqu'á

1500 voire 2000 mètres d'altitude. Dans son aire de prédilection, elle croît de moins de 300 mètres jusqu'á 1500 mètres d'altitude **(Booth et Wickens, 1988; Hall et Walker, 1991).**

Cet arbre est confronté, outre le stress hydrique, à la prédation de différents ruminants tels que : dromadaires, chèvres et moutons. Sont consommées les feuilles sèches tombées et les fleurs. Des études ont été réalisées en vue d'augmenter cet usage dans l'alimentation du bétail. la chèvre est capable de manger le fruit lui-même en entier. après avoir ingéré des fruits, la chèvre rejettent au repos leurs noyaux en ruminant. Cette consommation ne nuit pas à l'arbre, au contraire il s'agit d'un cas de zoochorie, c'est-à-dire de dissémination des semences par un animal.**(Zoungran et al., 2008).**

Balanites aegyptiaca résiste bien à diverses adversités (maladies, incendies, pacage et coupes incontrôlées) **(Booth et Wickens, 1988; Von Maydell, 1990; Hall et Walker, 1992; Shanks et Shanks, 1993; Roussel, 1995).**

I.8.Les fruits de dattier du désert

I.8.1.Définition et Aspect botanique des fruits

Les fruits sont allongés et ont une forme ovoïde contenant une seule graine. La pulpe du mésocarpe que mangent les autochtones présente une saveur sucrée et un goût acre et amer **(Tayeauet al., 1955)**. Ses dimensions, ses formes et son poids sont variables. Selon **Booth et Wickens (1988), Von Maydell (1990), Parkan (1993), Baumer (1995), Fortin et al., (1997)**, le fruit mesure de 2,5 à 4 cm de long, de 1 à 2,5 cm de diamètre et pèse 6 à 15 grammes.

Le fruit est formé de quatre parties : **(Ammar, Massoudi , 2020).**

- 1ére partie épicarpe;
- 2éme partie mésocarpe;
- 3éme partie endocarpe;
- 4éme partie graine oléagineuse;

a: Epicarpe.
b: Mésocarpe.
c: Endocarpe
d: Graine oléagineuse

Figure I.4. Fruit de dattier du désert **(Dakar .S, 2020).**

I.8.2.Les constituants du fruit de *Balanites aegyptiaca*

Les diverses parties du fruit représentent le pourcentage suivant du fruit total**.** (Tableau I.1):

Tableau I.1: Les pourcentages des parties du fruit **(Niou , Zerroud , 2020).**

Partie	**Pourcentage**
Epicarpe	5% –9%
Mésocarpe	28% –33%
Endocarpe	49% –54%
Graine oléagineuse	8% –12%

La pulpe du mésocarpe, seule partie du fruit que mangent par les autochtones. a la composition suivante (tableau I.2) :

Tableau I.2. La composition de la pulpe du mésocarpe **(Tayeau et *al,* 1955).**

Composition	Glucides réducteurs	Saponifie	Cellulose, gommes, pectines
Pourcentage	40.3 %	7.2 %	52.5 %

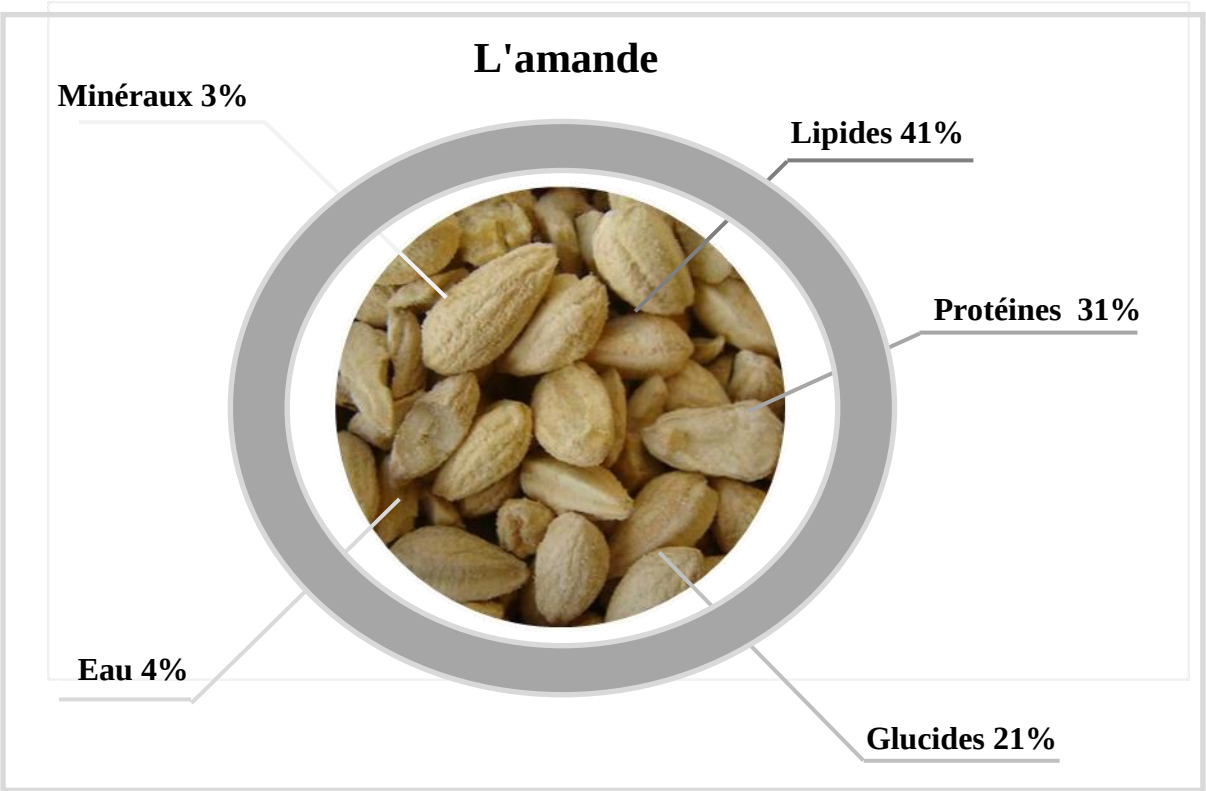

Figure.I.5. Principaux constituants de l'amande (g/100 g de matière sèche) **(Tiétiambou et al., 2015).**

I.8.3.Analyse chimique

Pulpe du fruit (mésocarpe)

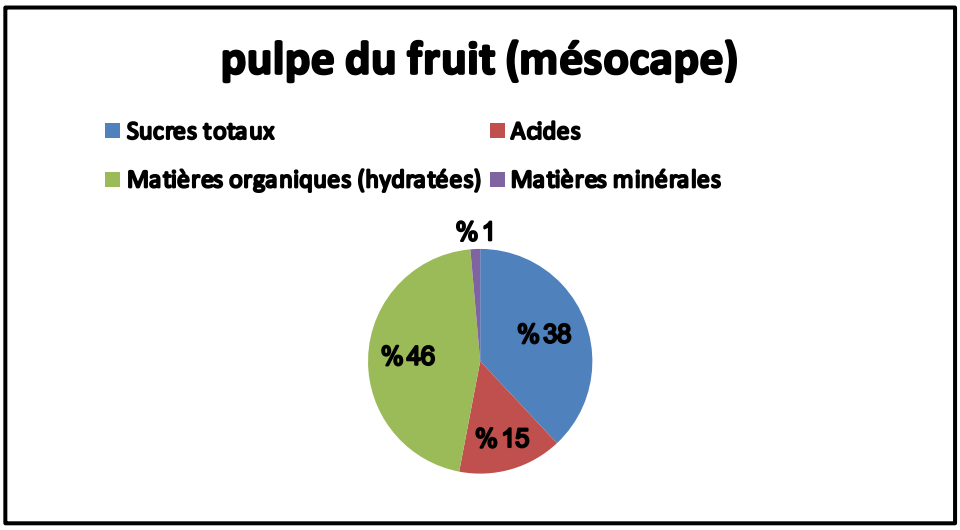

Figure.I.6.l'analyse chimique de la pulpe du mésocarpe **(Schunck de Goldfiem 1942).**

I.8.4.Collection et conservation des fruits : (Tiétiambou et al., 2015).

- Période de collecte : novembre à février
- Conditions de collecte : ramasser les fruits mûrs tombés à terre
- Conservation : à l'abri de l'humidité

I.1.9.Utilisations

Les utilisations de dattie du désert par les populations locales sont multiples : Alimentation humaine ,médicinales, fourragères et Cosmétique.

I.9.1.Alimentation humaine

Le fruit et les feuilles entrent dans l'alimentation des populations locales. Le fruit est généralement consommé frais par succion, une fois débarrassé de son épicarpe. Malgré son goût amer, la pulpe contient des sucres. Elle est consommée sous forme de bonbons par les enfants et les adultes. En outre,, faire macérer le fruit pour produire une boisson rafraîchissante L'amande contenue dans le noyau est consommée après une longue cuisson. Les huiles comestibles sont également extraites des amandes. Les feuilles sont séchées et transformées en poudre, qui peut être utilisée dans différentes sauces **(Lockett, 2000).**

Tableau I.3. Analyse chimique / Valeurs nutritionnelles **(Akourki et al., 2019).**

		En % de Matière sèche						
Produit	**matière sèche**	**Protéine brute**	**Fibres brutes**	**Cendres**	**Extrait d'éther (lipides)**	**extrait non azoté (glucides)**	**Calcium**	**Potassium**
feuilles vertes		11.6	13.6	12.7	4.2	57.9		
Fruits	66.3	11.1	10.2	8.1	1.7	68.9	0.16	0.4

I.9.2.Médicinales

En médecine traditionnelle, L'écorce, les fruits et l'huile de l'arbre ont été largement utilisés pour traiter diverses maladies ou troubles tels que le cancer, la tuberculose, le diabète **(Thobaiti et Abu Zeid , 2018) .** La décoction des feuilles est utilisée pour laver les plaies et brûlures. le macéré d'écorce de tige et de racine aide à soulager les coliques et les ictères. Leur solution est aussi employée comme antivenimeuse et vermifuge. le liquide obtenu en pressant le fruit est

utilisé traditionnellement pour stimuler la production de lait des mères allaitant, et les noix sont utilisés pour traiter des troubles digestifs. L'huile possède des propriétés antivirales et microbiennes, Cette huile, anti-inflammatoire, sert en massage au soin des rhumatismes. La décoction de racine est utilisée pour traiter le paludisme **(Orwa et al.2009)**.

En médecine vétérinaire, la solution est utilisée dans la préparation d'un. Produit servant à effectuer des lavements pour les chevaux. L'écorce est utilisée pour vermifuger les bovins **(Ceseau, 1964).**

I.9.3.Fourragères

Le tourteau riche en protéines, les feuilles sèches tombées et les fleurs peut être utilisé pour l'alimentation du bétail.

I.9.4.Cosmétique

L'huile est appropriée pour les soins des cheveux à cause de sa richesse en acide linoléique et comme lait corporel hydratant du fait de sa richesse en acide oléique. Elle peut être utilisée dans la formulation de savon à cause de son indice de saponification élevé. **(Tiétiambou et al., 2015).**

Tableau I.4. Principaux constituants et caractéristiques de l'huile de balanites **(Tiétiambou et al., 2015).**

Paramètres	**Unités**	**Valeurs**
Acide linoléique :	%	41
Acide oléique :	%	31
Acide palmitique :	%	15
Acide stéarique :	%	11
Indice de saponification :	mg KOH/g	181
Stabilité oxidative à 110°C :	Heures	7
Vitamine E :	Ppm	214

I.10.Conclusion

Il ressort de cette synthèse que *Balanites aegyptiaca* est une essence forestière très plastique voire ubiquiste très largement distribuée. Le dattier du désert a un rôle écologique, sociale et surtout médicinale dans les zones où il se trouve. Il a également de larges utilisations dans

plusieurs domaines : alimentaire, médical, fourrage ainsi que cosmétique. *B. aegyptiaca* se caractérise par nombreuses caractéristiques pour sa capacité à s'adapter aux conditions climatiques rudes, ainsi que la capacité de cet arbre à prospérer même pendant les années sèches. il est aujourd'hui une espèce utilisée dans le cadre du projet « La Grande Muraille Verte » pour le reverdissement du Sahel.

Le *B. aegyptiaca* est impliquée dans des plusieurs productions telles que le bioalcool, le biodiesel, ainsi que le biogaz qui fait l'objet de notre étude expérimentale **(Hadri et al. 2022).**

Chapitre II:

Généralité sur

Le biogaz

II.1 Introduction

La production mondiale d'énergie primaire a augmenté entre 1973 et 2016. Le pétrole et le charbon représente à lui seul plus de 60 % du mix énergétique. Mais cette énergie présente un risque major pour l'environnement et doit donc être trouvé Énergie alternative renouvelable et propre **(Belaidene, 2015).**

L'idée de trouver des sources d'énergie alternatives pour remplacer les combustibles fossiles a été développée lors de l'augmentation des niveaux de CO_2, CH_4 et le NO_2 dans l'atmosphère (principalement responsables du problème de l'ozone). Parallèlement, l'épuisement des réserves de combustibles fossiles et une augmentation des fluctuations les prix du pétrole exigent de nouvelles ressources propres et renouvelables. Ils peuvent être utilisés pour réduire l'impact environnemental et avoir de faibles émissions de gaz à effet de serre (GES). Parmi diverses propositions, le biogaz comme énergie renouvelable contribue à résoudre ce problème, non seulement par son potentiel énergétique, mais aussi par sa capacité à lutter contre le réchauffement climatique et le changement climatique **(Miret et al., 2016).**

la méthanisation ou digestion anaérobie est un processus microbiologique naturel qui permet de transformer la matière organique en un biogaz riche et un résidu, le digestat, aux excellentes qualités fertilisantes **(Moletta, 2013)** Compte tenu de la teneur en eau des substrats traités par digestion anaérobie.

II.2.Définition des énergies

Le terme énergie vient du latin « energia » grec ancien « enérgeia » et signifie « force en action » autrement dit « capacité à produire un mouvement». Aussi, L'énergie peut avoir plusieurs définitions :

D'une manière simple et générale, l'énergie définie comme la capacité d'un système à réaliser un travail. La quantité d'énergie que possède un système représente la quantité de travail qu'il peut réaliser. (Efficacité Energétique).

« L'énergie désigne la capacité qu'a un corps, un système, de produire un travail susceptible d'entraîner un mouvement, une production de chaleur ou d'ondes électromagnétiques (dont la lumière) ».

II.2.Les types d'énergies

on distinguer deux types d'énergies : renouvelables et non renouvelables.

II.2.1.Les énergies non renouvelables

L'énergie non renouvelable est toute quantité finie d'énergie qui existe sur terre et qui diminue avec l'utilisation humaine. Par exemple, le pétrole, le charbon, le gaz naturel et l'énergie nucléaire entrent tous dans cette vaste catégorie.

II.2.2.Les énergies renouvelables

Les énergies renouvelables sont toutes les ressources « illimitées » de la planète. Leur renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables car elles sont issues directement de phénomènes naturels, réguliers ou constants. Elles constituent ainsi des solutions nouvelles à exploiter. **(Adeline, 2019).**

II.2.2.1.Les différents types d'énergie renouvelable

La famille des énergies renouvelables est composée de : l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, l'énergie géothermique et l'énergie de la biomasse.(**Ratsiresiarisaona, 2015).**

II.3.Biomasse

II.3.1. Définition

Dans le domaine de l'énergie, la biomasse est généralement l'ensemble de la matière organique d'origine végétale ou animale peuvent être utilisé comme une source d'énergie. tel que le matériel végétal, les cultures énergétiques herbacées et ligneuses, les cultures agricoles destinées à l'alimentation humaine et animale, les déchets et résidus de cultures agricoles, les déchets et résidus de bois, les plantes aquatiques et autres déchets **(Brar et al., 2014).**

Les matières organiques peuvent être utilisées soit directement (bois énergie), soit après une méthanisation de la matière organique (biogaz) ou de nouvelles transformations chimiques (biocarburant). Elles peuvent aussi être utilisées pour le compostage.**(Mango et al., 2009).**
Ajoutant aussi que la biomasse a une composition hétérogène et chimiquement complexe.

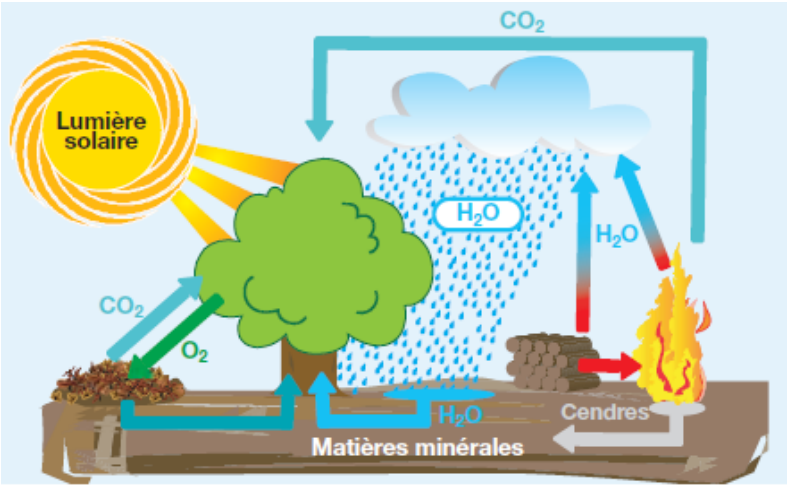

Figure.II.1. La combustion de la biomasse est neutre du point de vue des émissions de CO_2. www.citepa.org .

II.3.2. Les filières de biomasse

II.3.2.1.Le bioéthanol

Le combustible éthylique est obtenu à partir d'alcool (méthanol et éthanol) Transformation de la matière végétale organique fermentescible. Transforme les sucres (sucre, amidon, cellulose...) (figure.2) contenus dans les végétaux en alcool. Cette matière première renouvelable (sucre, amidon) est soumise à une distillation d'alcool pour obtenir une fermentation au bioéthanol **(Bakach ,2021)**. Il peut être utilisé de deux manières, Le bioéthanol peut partiellement remplacer l'essence, une petite proportion d'éthanol peut être ajoutée au gasoil mais cette pratique reste rare ou comme carburant unique dans des moteurs adaptés, généralement par injection. La matière première est riche en sucre et peut être utilisée dans la production Le bioéthanol c'est : la canne à sucre, la mélasse de betterave (produit résiduel de l'industrie sucrière), le lactosérum (produit en grande quantité lors de la transformation du lait), les tubercules et les racines, les graines et les céréales (maïs, orge, blé, avoine, sorgho, riz), la cellulose produits (résidus forestiers). **(Ammar ,Massoudi ,2020)**.

L'éthanol carburant a surtout été développé dans deux pays ; le Brésil et les Etats-Unis **(Poitrat. E, 2005).**

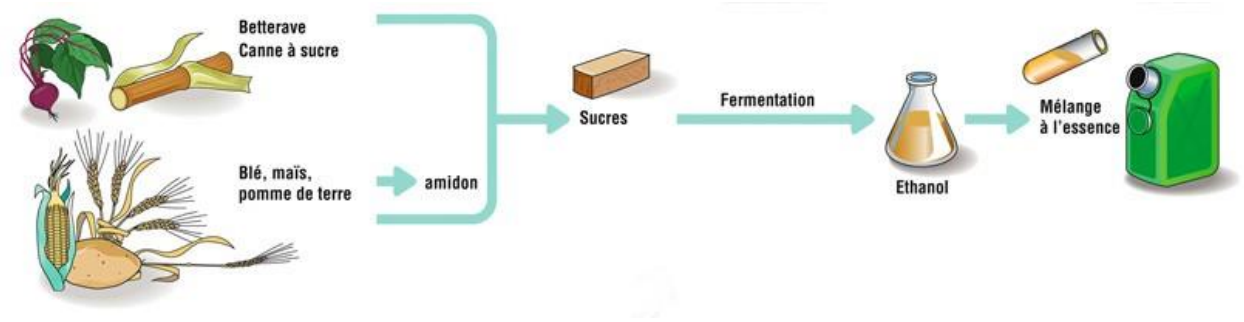

Figure.II.2. La filière bioéthanol ou filière alcool **https://www.ecologie.gouv.fr/biocarburants.**

II.3.2.2.Le biodiesel et les huiles végétales

Le biodiesel provient de la transformation de graisses animales et végétales ainsi que d'huiles alimentaires recyclées. Il s'agit d'un mélange d'esters méthyliques d'acides gras (esters méthyliques d'huiles végétales (EMHV)), formés lors de la conversion chimique des huiles et des graisses avec du méthanol. La transestérification est un processus classique de production de biodiesel qui convertit les corps gras en esters méthyliques d'acides gras (EMAG) en présence d'un catalyseur (soude) (Figure 1). La technologie permet de produire une tonne d'huile et 110 kg de méthanol, 970 kg de biodiesel et 108 kg de glycérine **(Bakach ,2021)**.

Le biodiesel peut être utilisé dans les moteurs diesel modernes moyennant quelques petites modifications. La plupart du temps, on utilise de l'huile de colza pour la fabrication du biodiesel (méthylester de colza). Le biodiesel est jusqu'à plus de 70% moins polluant que le gasoil et ne rejette pas de produits dangereux dans l'atmosphère.

Figure.II.3. La filière des huiles végétales ou du biodiesel **https://www.lesechos.fr/2004/09/lavenir-des-biocarburants-passe-par-les-residus-647069.**

Les huiles végétales sont obtenues à partir des cultures qui fournissent l'huile. Ces carburants comprennent l'huile pure et le EMAG (ester méthylique d'acide gras). Les carburants peuvent être produits à partir d'huiles végétales, de colza ou d'autres graines oléagineuses sans conversion chimique. Cependant, les huiles végétales ne peuvent être utilisées que dans des moteurs modifiés, qui cachent encore certains problèmes techniques.

II.3.2.3.Le biogaz

Le biogaz est un gaz combustible renouvelable produit par la fermentation de déchets organiques (déchets verts, ordures ménagères fermentescibles, boues de station, eaux usées et sous-produits agricoles d'élevage, cultures énergétiques agricoles, etc.) en conditions anaérobies. Le biogaz se compose principalement de méthane produit par des bactéries décomposant la matière organique, un phénomène appelé méthanation, qui se produit dans des récipients fermés appelés digesteurs. Outre le méthane, le biogaz contient également du dioxyde de carbone et quelques autres gaz (H_2S, eau, azote).

Le biogaz est utilisé en l'état ou après épuration, il est valorisé sous forme de chaleur ou d'électricité. D'autres utilisations de ce biocarburant sont en développement, comme l'injection dans le réseau de gaz naturel existant(après une mise aux normes) et la production d'un carburant pour véhicules (en gaz naturel véhicule), le biogaz peut aussi servir à alimenter un procédé industriel de fabrication de combustibles liquides à partir de gaz(procédé Fisher-Tropsch). Il est aussi possible de l'utilise en remplacement de l'essence. **(Bakach , 2021)**.

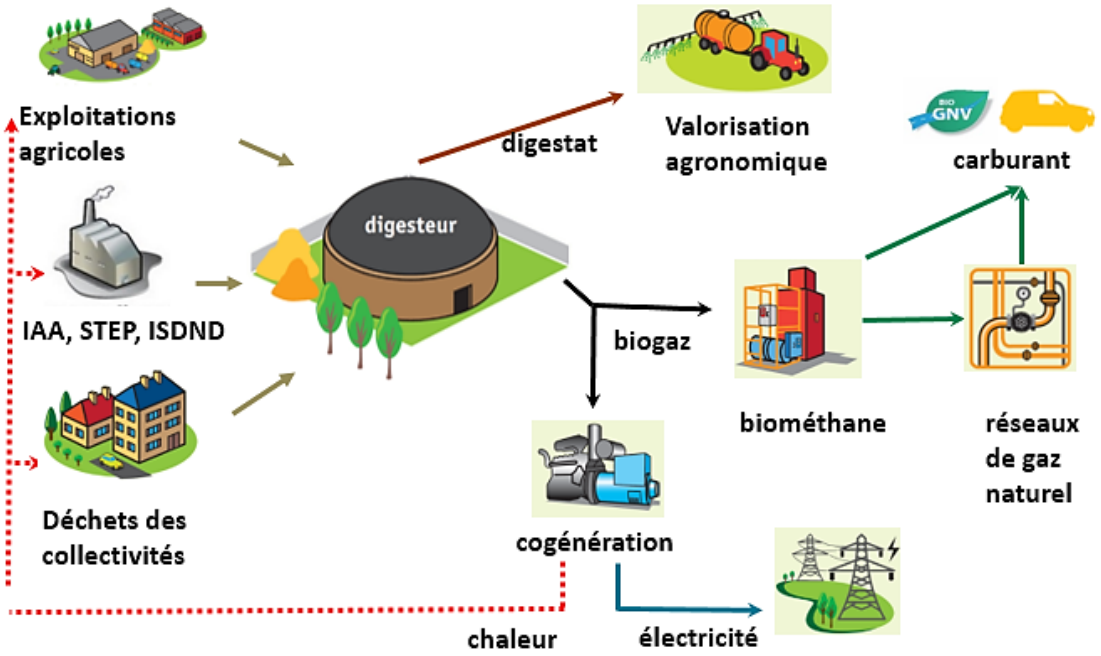

Figure.II.4. La filière du biogaz (**ATEE, 2022).**

II.4.Généralité sur le Biogaz

II.4.1.Définition

Le biogaz est le gaz produit par la fermentation de matières organiques animales ou végétales en absence d'oxygène (conditions anaérobies). Cette fermentation appelée aussi

"méthanisation" ou encore "digestion anaérobie" peut se produire naturellement ou être provoquée .

Le biogaz est un mélange composé principalement de méthane (CH_4) et de dioxyde de carbone (CO_2) et, en nettement plus faibles proportions, d'azote, d'oxygène et d'eau ; on retrouve également de nombreux composés trace (organiques et inorganiques) tels que le sulfure d'hydrogène (H_2S), les thiols (= mercaptans) et tout un panel de Composés Organiques Volatils (COV) notamment dans les biogaz d'Installations de Stockage de Déchets (ISD) **(Bouamoud , Kebier ,2021)**. De plus, le biogaz, en raison de sa valeur calorifique et de sa contribution à la réduction des déchets nocifs pour l'environnement, est considéré comme une source prometteuse d'énergie renouvelables.

II.4.2.Composition du biogaz

La composition du biogaz dépend de plusieurs paramètres, et surtout, de son origine (stocks du substrat traité). Le biogaz est constitué essentiellement de deux composés à proportion variable selon le substrat traité : méthane (CH_4) et dioxyde de carbone (CO_2) ; Donc seulement quelques traces d'hydrogène (H_2), de sulfure d'hydrogène (H_2S), d'ammoniac (NH_3), d'azote (N_2), monoxyde de carbone (CO), oxygène (O_2), divers hydrocarbures et eau. On trouve souvent les derniers ingrédients, mais à des niveaux bien inférieurs (commun moins de 1 %) **(Dahou , 2018)**

Tableau II.1. La composition du biogaz **(Saidi, Abada, 2007).**

Eléments	Proportions pour 1Nm³ de biogaz brut
Méthane (CH_4)	**50 – 75 %**
Dioxyde de Carbone (CO_2)	**25 – 45%**
Vapeur d'eau (H_2O)	**2 – 7%**
Azote (N_2)	**0 – 2 %**
Hydrogène (H_2)	**0 – 1 %**
Oxygène (O_2)	**0 – 2 %**
Hydrogène sulfuré (H_2S)	**0 – 2 %**

La composition caractéristique du biogaz est présentée ci-dessous, qui varie selon son origine:

Tableau II.2. Composition du biogaz selon ses origines **(de La fragge, 1995).**

Composant	**Ordures ménagères**	**Boues de station d'épuration**	**Déchet agricoles**	**Déchet de l'industrie agro-alimentaire**
CH_4 %vol	50-60	60-75	60-75	68
CO_2 %vol	38-34	38-19	33-19	26
N_2 %vol	5-0	1-0	1-0	-
O_2 %vol	1-0	<0.5	<0.5	-
H_2O %vol	6 à40°C	6 à40°C	6 à40°C	6 à40°C
H_2S%vol mg/m^3	100-900	1000-4000	3000-10000	400
NH_3%vol mg/m^3	-	-	50-100	-
Siloxanes mg/m^3	20-250	Traces	-	-
Organochlorés ou organofluorés mg/m^3	100-800	-	-	-

II.4.3. Propriétés du biogaz

Biogaz dans les mêmes conditions de température et de pression et le même volume il est plus léger que l'air, sa densité par rapport à l'air est d'environ 0,7. Le pouvoir calorifique du biogaz dépend de sa teneur en méthane **(Tou, Igoud et Touzi, 2001).** Si le biogaz contient 70% de CH_4 : le PCI sera de 6,96 kWh/m³, Pour le biogaz, le PCI sera proportionnel à sa teneur en méthane (ex. pour le biogaz contenant 70% de méthane, le PCI sera de 9,94 x 0,7 = 6,96 kWh/m³ **(Fredric ,2019).**

II.4.4. Purification du biogaz

Tableau II.3. Techniques de purification du biogaz **(Hess, 2007)**

Composés à éliminer	**Techniques**
Eau	Condensation ou cryogénie, absorption sur glycols, tamis moléculaires
Organohalogénés	Lavage à l'eau sous pression, adsorption sur charbon actif, ajout de chlorure de fer in-situ, techniques biologiques, micro-aération
Souffre	Adsorption sur charbon actif
CO_2	Lavage à l'eau sous pression, tamis moléculaires, séparation par membrane, adsorption sur des glycols, micro-algues

II.4.5.Production du biogaz

Le biogaz peut être produit à partir **:**

- De substrats riches en sucrose (canne à sucre, betterave sucrière, etc.), en amidon (maïs, orge, blé, pomme de terre, etc.),
- De substrats cellulosiques tels que les résidus agricoles (la paille ou les cannes de maïs), les résidus forestiers, cultures énergétiques (le panic érigé ou des arbres à courte rotation),
- Des algues.

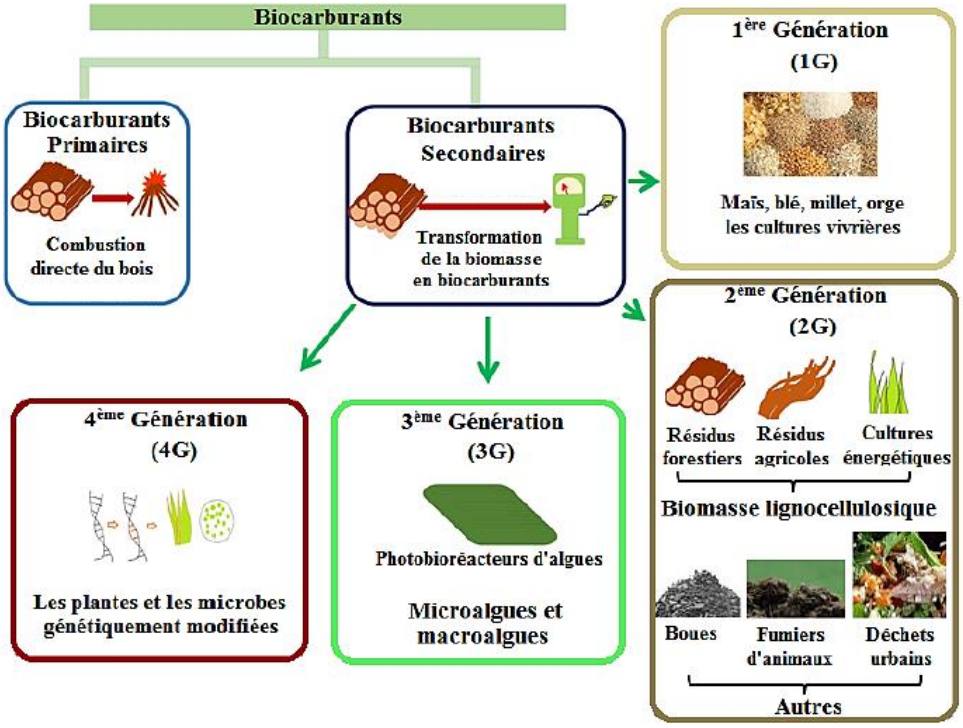

Figure II.5. Différentes générations du biogaz **(Djaafri., 2020)**.

II.4.5.1. Biogaz produit à partir de sucre / amidon (première génération)

Il est produit à partir de maïs et de canne à sucre en utilisant une technologie bien établie **(Sims et al, 2008).** Les étapes de la production de biogaz provenant des cultures riches en sucre et amidon sont présentées dans le (tableau II.4).

Tableau II.4. Les étapes de la production de biogaz de la biomasse de première génération.

Composant	Matière première	Procédé	Produit final
Sucre Amidon	canne -betterave - maïs- le blé	Fermentation-méthanisation	Biogaz

II.4.5.2.Biogaz produit à partir de sources non alimentaire (deuxième génération)

La matière première non alimentaire utilisée pour la production de biogaz de deuxième génération comprend les résidus forestiers, les déchets solides municipaux, les boues et les fumiers de bétail comme des résidus non comestibles. Les matériaux à base de lignine comme le bois, la sciure de bois, les feuilles mortes, les résidus d'élagage, l'écorce de riz, etc., ne sont pas appropriés pour la digestion anaérobie **(Schönhauser, 2011).**

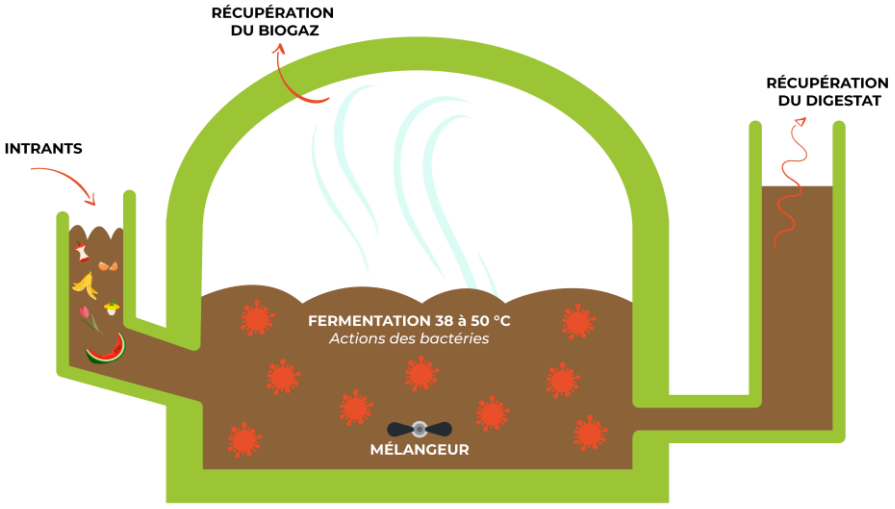

Figure II.6. La production de biogaz à partir de la biomasse de deuxième génération **(Euramétha, 2020)**

II.4.5.3.Biogaz produit à partir des algues (troisième génération)

Généralement la matière première utilisée pour la production de biogaz de troisième génération sont les algues. la production de biogaz à partir de cette biomasse(algues) présente certaines contraintes en raison de caractéristiques inhérentes à la biomasse algales.

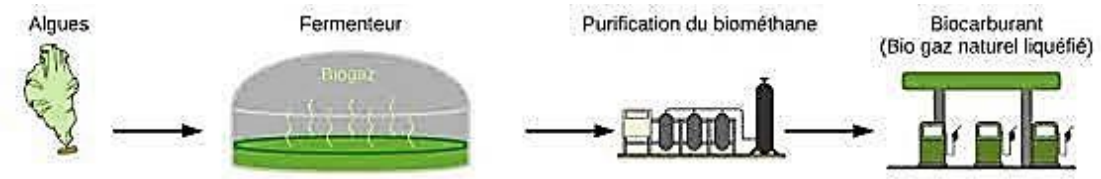

Figure II.7. La production de biogaz à partir de la biomasse de troisième génération. **(Saad et al., 2019).**

II.5. La méthanisation

II.5.1. Définition

La digestion anaérobie, également appelée méthanisation, est un processus qui convertit la matière organique en biogaz et en digeste. Cette transformation a lieu dans la chambre de fermentation sans accès d'oxygène et sous l'influence de bactéries anaérobies **(Orellana, Ricardo, 2019).**

La méthanisation est un procédé naturel de transformation de la matière organique par des bactéries en absence d'oxygène. C'est la "digestion anaérobie" qui conduit à la formation d'un biogaz riche en méthane et utilisable comme source d'énergie **(Belaidene, 2015).**

II.6. Les phase de dégradation biologique dans la méthanisation

La digestion anaérobie peut être divisée en quatre étapes principales, qui impliquent une communauté microbienne complexe à travers différentes classes de micro-organismes, à savoir : (1) l'hydrolyse; (2) acidogenèse ; (3) l'acétogenèse ; (4) la méthanogenèse:

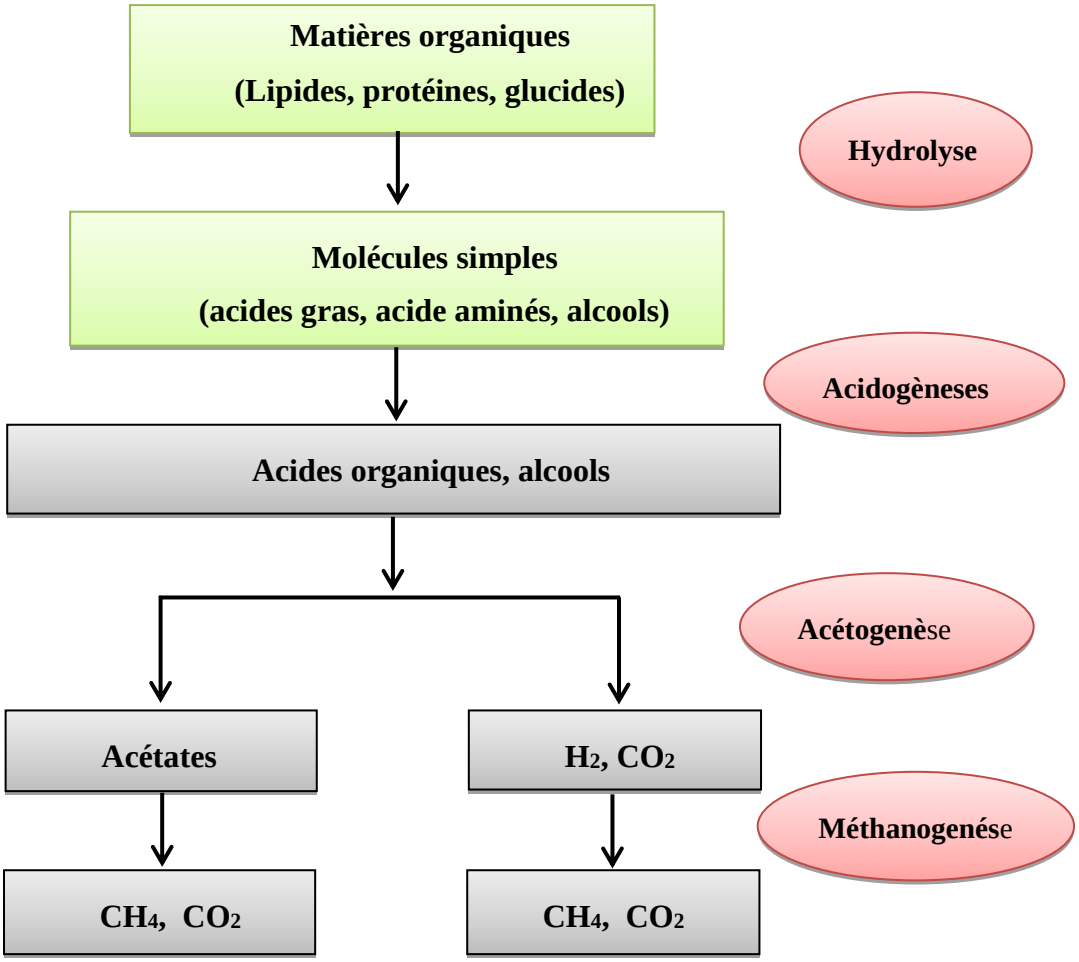

Figure II.8. Le processus de conversion de la matière organique lors de la méthanisation.

II.6.1.L'hydrolyse

Cette étape implique la dégradation de molécules organiques complexes en monomères. cette Les lipides sont décomposés en acides gras et en glycérol, les protéines sont décomposées en acides aminés, Peptides et chaînes courtes, les polysaccharides se dégradent en monosaccharides et Disaccharides, la cellulose devient finalement glucose et saccharose **(Bendjerad , Benkheira ,2020).** Cette phase permet aux microorganismes de type fermentatif d'incorporer des nutriments**.**

II.6.2. L'acidogènes

Au cours de l'étape d'acidogénèse, les monomères issus de l'étape d'hydro- lyse sont transformés en acides gras volatils (ex : acétique, propionique, buty- rique, valérique), en alcool

(ex : éthanol), en acides organiques (ex : acide lactique), en hydrogène (H_2) et en dioxyde de carbone (CO_2) **(Gwogon, 2012).**

II.6.3.L'acétogenése

L'acétogenèse est l'ensemble des réactions qui conduit à la production d'acétate. cette étape est réalisée par deux groupes microbiens qui consomment respectivement du CO_2 et de l'AGV. Les bactéries homoacétogènes ou acétogènes strictes produisent de l'acétate par réduction du dioxyde de carbone **(Moletta, 2008)**.

II.6.4. La méthanogénes

La méthanogenèse correspond à la phase biologique de production de méthane dans le système de dégradation anaérobie. Elle se déroule en activité anaérobie stricte, sous l'action de trois types de microorganismes méthanogènes, qui tirent de cette réaction l'énergie nécessaire à leur activité métabolique**(Khodja et Aboubekr , 2014).** Dans cette étape, du méthane se forme soit en décomposant l'acétate (environ 70 % de la production), soit par réduction du CO_2 par l'hydrogène (environ 30 % de la production) **(Gwogon, 2012).**

La transformation de l'hydrogène et le dioxyde de carbone en méthane selon la réaction suivante :

$4H_2 + CO_2 \rightarrow CH_4 + 2H2O$ (environ 30% de méthane produit..... (1)

De décarboxylation de l'acide acétique

$CH_3COOH + H_2OCH_4 \rightarrow H_2CO_3$ (environ 70% de méthane produit) ... (2)

La digestion anaérobie correspond donc à un enchaînement de réactions chimiques dépendantes les unes des autres.

II.6. Différents paramètres influençant la méthanisation

II.6.1Température

La température est l'un des principaux facteurs de la réaction de méthanisions. En fait, la température affecte l'activité microbienne, qui à son tour affecte la cinétique de réaction et les voies métaboliques. La digestion anaérobie est réalisée sous trois plages de température

- De 15 à 25°C : fermentation psychrophile .
- De 25 à 45°C : fermentation mésophile.
- De 55 à 65°C : la fermentation est dite thermophile.

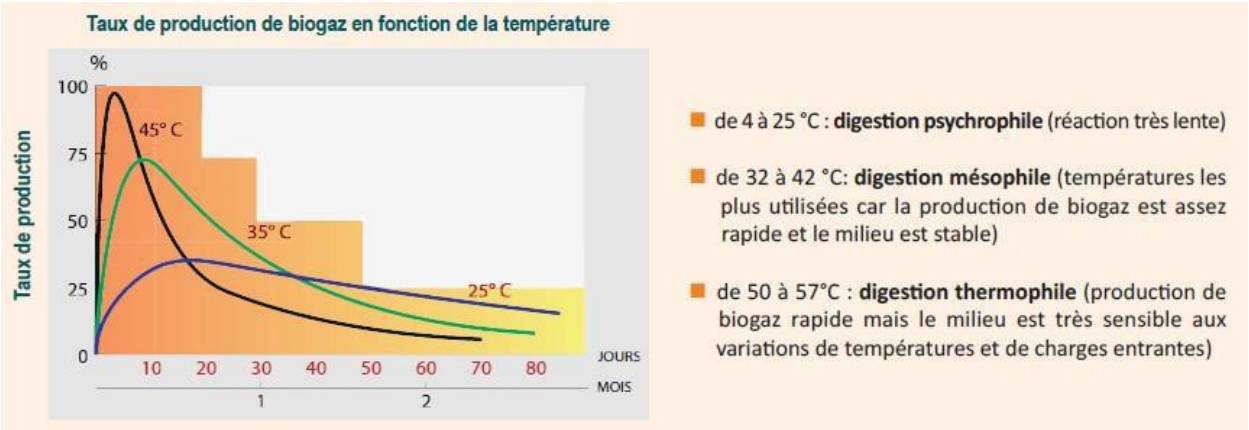

Figure II.9. Taux de production de biogaz en fonction de la température **(ADEME, 2010).**

II.6.2. Le pH

Le pH représente un facteur opérationnel principal très important dans la DA. Également, c'est un indicateur de bon fonctionnement d'un digesteur **(Dai *et al*., 2015 ; Souza *et al*., 2013).** Le pH dans le digesteur se situe entre 7 et 7,5 ce qui correspond aux plages favorables à l'acétogénèse et à la méthanogènes. La chute du pH en dessous de 5,0 est mortelle pour ces organismes **(Ostrem, 2004)** et même des valeurs proches de 6,0 causent souvent un arrêt du procédé **(United-Tech ,2017).**

Au cours de la DA, plusieurs types de micro-organismes sont impliqués avec différentes valeurs de pH optimales pour leur croissance et leur fonction. Pour optimiser le développement global de la DA, l'intervalle le plus adapté pour obtenir une production maximale de biogaz se situe entre 6,8 et 7,2 **(A. Ward et al., 2008).** D'autre part, une consommation excessive d'acide pour former du méthane Provoque une augmentation du pH et un ralentissement de la production d'acide **(Ostrem, 2004).**

II.6.3. Rapport C/N et substances nutritive

Le carbone et l'azote sont des éléments essentiels à la nutrition des microorganismes, ainsi que le phosphore et le soufre. Le carbone est primordial pour les bactéries en tant que source d'énergie et l'azote autant qu'élément de structure cellulaire.

Le rapport C/N est important pour la stabilité du procédé. Si ce rapport est trop grand, Le carbone est difficile à dégrader complètement. La recherche montre que le ratio idéal La fourchette se situe entre 20 et 30, 25 étant le ratio idéal **(Ostrem, 2004).**

II.6.4. Pression partielle en hydrogéne

L'hydrolyse est une étape clé du processus de digestion anaérobie, et c'est un substrat énergétique essentiel pour les méthanogènes. Il se forme à partir de produits acidogènes (AGV) lors de l'acidogogenèse, et cette faible pression partielle est apportée par des bactéries homoacétogènes et hydrophiles qui consomment de l'H2 lors de leur production **(Mottet, 2009).**

II.6.5. Humidité

Tous les micro-organismes ont besoin d'eau pour vivre. Selon Marach, la digestion anaérobie nécessite une humidité d'au 60 à 70%. De plus, c'est un vecteur de transport de matières solubles. Il dissout les nutriments et les substrats et assure leur diffusion des milieux poreux dans les cellules bactériennes **(Bollon , 2012).**

Des études montrent que les niveaux d'humidité sont supérieurs à 60% Augmenter la production de gaz, jusqu'à environ 80 %. Au-delà de ça Concentrée, la production s'est stabilisée à ce plateau. Ce principe est dans certains Enfouissement, méthanisation accélérée des matériaux par recyclage des lixiviats décomposer et augmenter la production de biogaz **(Price et Cheremisinoff, 1981; Yolo., 2008).**

II.6.6. La charge organique et le temps de séjour

Un paramètre important est la charge organique entrante. Correspond à la masse de matière organique entrante par unité volume de la chambre de fermentation et par unité de temps.

Le temps de séjour correspond au temps que le substrat restera théoriquement dans le cuiseur. Le temps de séjour est inversement proportionnel à la charge : moins il reste de substrat dans la chambre de fermentation, plus la charge est importante. Ces paramètres seront peser à la taille de l'installation.

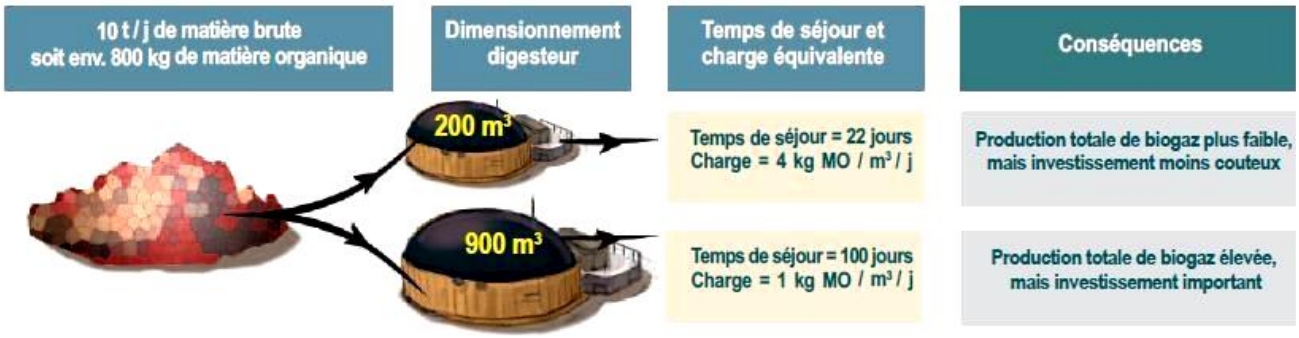

Figure II.10. Influence de la charge organique et le temps de séjour sur la production de biogaz **(ADEME, 2010).**

Il faut donc trouver le meilleur compromis entre production maximale de biogaz et échelle raisonnable pour limiter investir. La charge organique est généralement comprise entre 1 à 3 kg de matière organique par mètre cube de digesteur et par jour Digestion anaérobie pour un mélange infini. Une charge organique excessive peut causer l'acidification et l'arrêt du digesteur et de la réaction (la production d'acide ne pourra pas maintenir le taux d'acidification, qui s'enrichira de matière). A l'inverse, une charge trop faible ne permettra pas aux bactéries de se développer normalement **(ADEME, 2010).**

II.6.7. Absence des inhibiteurs

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

- **Oxygéne**

La présence d'oxygène contredit les conditions anaérobies. L'O_2 est toxique pour les organismes méthanogènes et favorise le développement d'organismes aérobies qui consomment des substrats moins longtemps que les bactéries méthanogènes ne peuvent en générer. De ce fait le milieu réactionnel doit être fortement réducteur, des valeurs de potentiel redox de -300 à -500 mV sont généralement admises **(Moletta, 2008).**

- **Métaux lourds**

Les métaux lourds bloquent le métabolisme et tuent les organismes en inactivant le groupe d'enzymes sulfhydryle par la formation de mercaptides. En revanche, il est possible d'éliminer les produits toxiques du support nutritif ou de les diluer jusqu'à ce qu'ils passent sous le seuil de toxicité **(Boutouta, 2012).**

- **L'azote ammoniacal**

L'ammoniaca est essentiel à la la digestion anaérobie, au-delà de 2 à 3 g/l, il devient toxique et inhibe les micro-organismes **(Dahou, 2018).**

Le processus d'ammoniation est caractérisé par la conversion partielle de l'azote organique en azote ammoniacal. Il fait partie de la minéralisation de la matière organique. Dans la première étape de la digestion anaérobie, les protéines sont hydrolysées en acides aminés, qui sont ensuite convertis en dioxyde de carbone, en azote ammoniacal et en AGV lors de l'acidification. L'azote

ammoniacal provient également de la lyse cellulaire après la mort microbienne ou l'hydrolyse de l'urée. Il est indispensable au métabolisme microbien et constitue un facteur important pour la croissance bactérienne. L'excès d'azote ammoniacal, non utilisé par les microorganismes, reste dans le milieu sous forme de mélange d'ammoniac (NH_3) et d'ammonium (NH_4^+), en équilibre acido-basique dépendant du pH et de la température **(Dahou, 2018).**

L'azote ammoniacal n'est ni utilisé ni converti lors de la digestion anaérobie, excepté pour la croissance des microorganismes. Il n'entre pas dans les voies métaboliques de dégradation de la matière organique en biogaz. L'azote non utilisé va donc se retrouver en excès dans le milieu. Ce phénomène va être accentué dans la méthanisation industrielle**(Bollon, 2012).**

- **Les sulfates**

Les sulfates qui peuvent être présents dans le substrat utilisé en alimentation, sont transformés en sulfure d'hydrogène (H_2S) par les bactéries sulfato-réductrices. Le (H_2S) est le produit de la dégradation des molécules contenant des composés soufrés ou lors de la réduction des ions sulfates. Il existe deux contre-indications lorsque des microorganismes réducteurs de sulfate sont présents:

Une inhibition compétitive pour le substrat, ici l'H_2, entre les microorganismes sulfato-réducteurs oxydant l'H_2 et les méthanogènes hydrogénotrophes.

Une inhibition des archées méthanogènes par la toxicité de l'H_2S, qui diffuse dans les cellules et dénature les protéines **(Mokhles , 2018).**

II.10.Digesteur

Le digesteur, cœur où se réalise la méthanisation, appelé aussi fermenteur ou bioréacteur anaérobie. Il existe plusieurs formes de digesteur (ovoïde, cylindrique, ou bien continental), généralement construit en béton avec une protection interne en résine époxy mais pour les digesteurs de grande taille, l'acier vitrifié s'avère souvent plus compétitif.

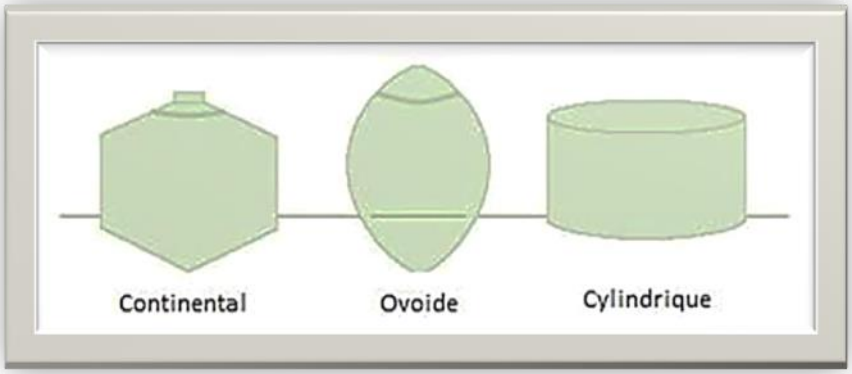

Figure II.11. Différentes formes de digesteurs **(Boutouta , 2012).**

Le digesteur est constitué d'une cuve fermée, étanche à l'air et de préférence isolée thermiquement de l'extérieur dans laquelle les microorganismes se côtoyant pour dégrader chimiquement et biologiquement les effluents organiques. Il peut être équipé d'un système de chauffage, d'un système d'agitation, d'un système de prélèvement et d'un système de mesure de teneur en gaz, de dispositifs permettant le contrôle de différents paramètres : la température, le pH, la pression…ect **(Boutouta, 2012).**

II.10.1.Classification des différents types de digesteurs

Le choix du système digestif dépend du type de déchets à étudier et à analyser et peut être classé comme suit :

1. Le mode de l'alimentation : batch ou continu ;
2. Le type de substrat : solide, semi solide ou liquide ;
3. Le nombre d'étapes : mono ou bi étapes.

Partie expérimentale

Chapitre III : Matériels et Méthodes

III.1. Matériels utilisés

III.1.1. Appareillage et Verreries

Appareillage

- Digesteur (bioréacteur type batch)
- Etuve type Memmert réglée à 105°C;
- Four à moufle ;
- Dispositif de meure de pH;
- Bain marie type Memmert;
- Balance de précision ;
- Agitateur magnétique ;
- Dispositif de mesure de volume du Biogaz ;
- Thermo-réacteur ;
- Plaque chauffante ;
- Thermomètre ;

Verreries

- Flacon de 250 ml ;
- Flacon de 1000 ml ;
- Pissette ;
- Tubes à essais ;
- Entonnoir ;
- Eprouvette graduée de 10 ml ;
- Eprouvette graduée de 200 ml ;
- Fiole jaugé de (250-500) ml.

III.1.2. Produits chimiques et réactifs

Tableau III.1: Produits chimiques et réactifs.

N°	Désignation	Formule chimiques	Etat physique
1	Acide sulfurique (95%)	H_2SO_4	Liquide
2	Hydroxyde de sodium	NaOH	Liquide
3	Bichromate de potassium(oxydant)	$K_2Cr_2O_7$	Liquide
4	Carbonate de sodium	Na_2CO_3	Solide
5	Féroïen	$C_{20}H_8Br_2HgNa_2O_6$	Liquide
6	Sulfate fer ammonium.(Sel de Mohr)	$(NH_4)_2Fe(SO_4)_2\ 6H_2O$	Liquide
7	Sulfate d'argent(catalyseur)	Ag_2SO_4	Liquide

III.2.Substrat d'étude

III.2.1. Le choix du substrat

- la matière choisie pour la réalisation de cette étude est les fruits de dattier du désert, qui sont riche en sucres simples facilement fermentescible.

Photo III.1 : Substrat utilisé.

III.2.2. Lieux de prélèvement

Le prélèvement d'échantillon est effectué au niveau de la région de Timyawin située au sud d'Adrar, à l'extrême-sud de l'Algérie, au sud-est du sahara de Tanezrouft. Elle s'éloigne de 150 km au sud de Bordj Badji Mokhtar, soit 1820 Km au sud d'Alger et 465 km au sud-ouest de Tamanrasset et 950 km au sud-est d'Adrar, cette région est un producteur important du dattier du désert.

Figure III.1. La situation géographique de la région de Timyawine en Algérie.

III.2.2. Prélèvement du substrat

Ce travail est une étude complémentaire de travail effectuée par **Ammar. M** et **Messoudi F.Z.** en **2020** sur le thème " Contribution à l'étude de la valorisation énergétique des fruits de *Balanites aegyptiaca* dans la région d'Adrar ".

Le substrat utilisé dans ce travail est le résidu issu après la production de bioéthanol, ce substrat obtenu à partir de la fermentation des fruits de dattier du désert.

III.3. L'obtention du substrat d'étude (Fermentation alcoolique)

III.3.1.Préparation de moût des fruits de dattier du désert

1. **L'imbibition :** Immergée les fruits séchés dans un cristallisoir contenant 500 ml d'eau chaude pendante 24 heures.

Photo III.2. Imbibition des fruits de dattier du désert.

2. **Dénoyautage :** La séparation de la pulpe du noyau est réalisée manuellement.

Photo III.3. Dénoyautages des fruits de dattier de désert.

3. Préparations de dilution

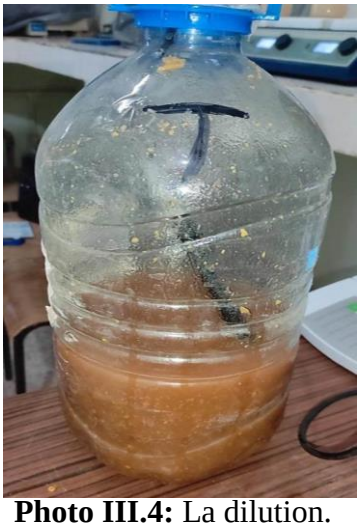

Photo III.4: La dilution.

4. Réactivation de la levure

Réactivation de la levure sèche est une étape très importante pour faciliter la dégradation des sucres pendant la fermentation et diminution du temps d'adaptation.

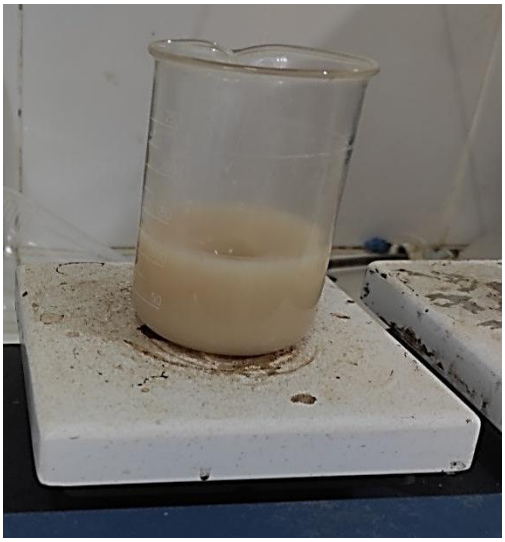

Photo III.5 : Réactivation de la levure**.**

5. La fermentation

Avant l'inoculum de la levure réactivée le pH de cette moût préparée est ajusté entre 4.3 et 4.7 par l'ajout d'acide sulfurique (H_2SO_4, 1N). Ce pH acide préjudiciable au développement des bactéries s'avère propice à la prolifération de levures **(Boulal, 2017).**

Après avoir inoculé le bioréacteur par la levure de boulangerie réactivée (1g/L) **(Fabienne, 1991),** le bioréacteur est plongé dans un bain-marie où la température est maintenue à 30±2°C. La fermentation est conduite en anaérobiose pendant 72 heures.

Toutefois, la fermentation est favorisée par une agitation due au mouvement des bulles du CO_2 dégagées. Pour suivre l'évolution de la fermentation, ils procèdent chaque 24 heures à des prélèvements pour effectuer les analyses physico-chimiques par alcoomètre et détecter l'odeur de l'alcool dans le mout. Après 72 heures, la fermentation est arrêtée.**(Ammar, Massoudi ,2020).**

Photo III.6: Fermentation.

6. Filtration

A la fin de la fermentation, le substrat fermenté est filtre pour obtenir le substrat (résidu).

Photo III.7 : Filtration.

Photo III.8 : Filtrat (résidu)

III.4. Production du biogaz

III.4.1. Description du dispositif utilisé (biogaz)

Les essais ont été réalisés par un réacteur de type batch. Ce réacteur de laboratoire, très simple, en verre, permettant d'assurer l'anaérobie du milieu de culture. Le réacteur est muni de deux trous, le premier pour le prélèvement des échantillons liquides à l'aide d'une seringue, et l'autre pour assurer le dégagement des gaz pour la mesure du volume de biogaz produit. Le volume total du réacteur est de 1L. Nous avons laissé un volume de 500 mL au-dessus du niveau du liquide pour protéger la sortie des gaz, et maintenir l'anaérobiose.

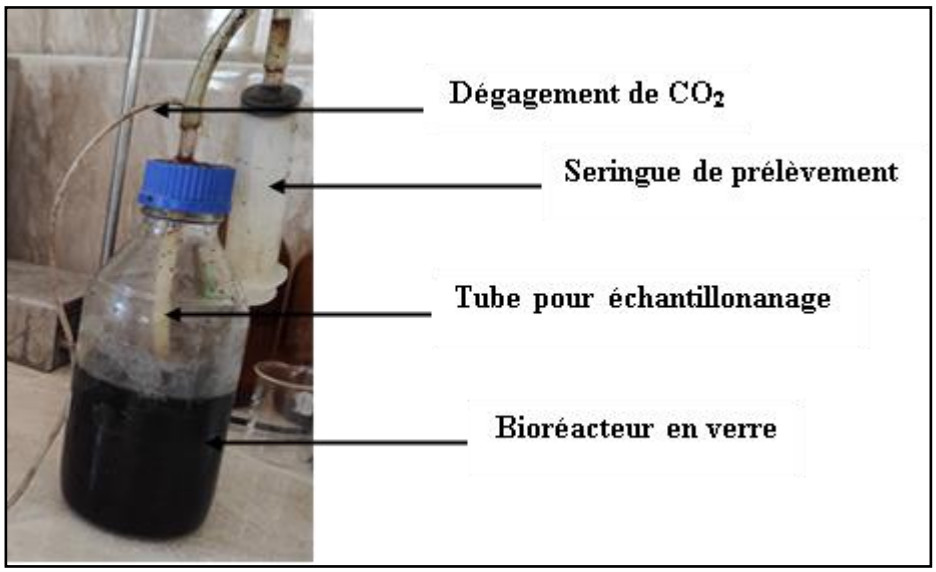

Figure III.2. Schéma du digesteur utilisé

III.4.2. Préparation du substrat de digestion anaérobie

III.4.2.1.Mode opératoire

- On a met 8.51 g dans le bioréacteur et on l'a remplis par l'eau de robinet jusqu'à 500 ml.
- Puis on place notre bioréacteur dans un bain marie à 37 °C.

III.4.2.2.Conditions du travailè

✓ Le réacteur est maintenu en condition mésophile (37 °C ± 2 °C) dans un bain marie réglé par un thermostat.

Photo III.9. Bioréacteurs dans un bain marie à 37°C.

III.5. Les analyses effectuées

III.5.1. Les paramètre de détermination du bilan de matière

III.5.1.1. Détermination de la matière sèche (MS) (Bensmail ,2013).

- **Matériels utilisés**
  - Etuve réglée à 105°C ;
  - Capsule ;
  - Dessiccateur ;
  - Balance électronique de précision ;
- **Méthode**

On pèse le substrat ensuite on le met dans l'étuve à 105°C.

La différence des poids, avant et après, correspond à la perte d'humidité et le reste 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 un creusé de masse connue soit (M) préalablement nettoyée et séchée, ensuite l'ensemble est placé dans une étuve à 105 °C. Le substrat est pesé chaque heure jusqu'à ce que le poids serra constant (M2).

Photo III.10. Détermination de la matière sèche à l'aide d'une étuve.

- **Expression des résultats**

La matière sèche est déterminée par la relation suivante :

$$\% \, MS = \frac{M_1 - [(M + M_1) - (M + M_2)]}{M_1} \times 100$$

Avec :

M : Masse de la capsule ;

M_1 : Masse de l'échantillon avant dessiccation ;

M_2 : Masse de l'échantillon après dessiccation.

III.5.1.2. Détermination de la teneur en matière organique (MO) (Bensmail ,2013).

- **Matériels utilisés**
  - Four à moufle ;
  - Creusé ;
  - Balance de précision ;
  - Dessiccateur ;

Photo III.11. Pèse du substrat à l'aide d'une Balance de précision.

- **Méthode**

L'échantillon pré séchés est incinéré à 550°C, la matière organique disparue et reste la matière minéral.

Pour déterminer la teneur en matière organique (MO), on introduit la masse de notre échantillon après séchage, dans un creusé préalablement nettoyé et séché (M), on place l'ensemble dans un four à moufle à 550°C pendant 2 heures. Après refroidissement, le creusé contenant la matière minérale est à nouveau pesées, soit (M1). La masse de la matière organique est obtenue par la différence entre la masse de la matière sèche et la masse de la matière minérale. ,

Photo III.12. Incinération de la matière organique à l'aide du four à moufle.

- **Expression des resultants**

Le calcul de la MO, s'obtient par la relation :

$$MO\ (\%) = \frac{(M+M1)-(M+M2)}{M1} \times 100$$

Avec :

M : masse de la capsule ;

M_1 : masse de l'échantillon après dessiccation ;

M_2 : masse de l'échantillon après calcination ;

III.5.2. Les paramètres suivis durant la digestion anaérobie

Les paramètres de contrôle de la digestion anaérobie permet de définir la nature et la surveillance l'écosystème et leurs normes à respecter pour que le processus fonctionne.

Les paramètres sont de deux types : ceux qui vérifient que les conditions de fonctionnement imposées soient réalisées (comme la température, la concentration en DCO…) et ceux qui permettent de contrôler l'état biologique de l'écosystème (le pH, la concentration en acides gras volatil...)

Pendant la durée de la digestion, nous avons les paramètres suivants :

- Le pH ;
- Titre Alcalimétrique Complet (TAC);
- Test des acides gras volatils (AGV) ;
- Demande chimique en oxygène (DCO)
- Le volume du biogaz ;
- L'inflammabilité.

III.5.2.1 Le pH (Boutouta, 2012)

Le pH est un facteur facile à mesurer, le changement du pH peut être un indicateur, et la cause du déséquilibre du processus. Puisque les micro-organismes peuvent fonctionner seulement dans une plage spécifique de pH.

- **Matériel**
  - pH-mètre;
  - Bécher.
- **Méthode**

La mesure de pH a été réalisée à l'aide d'un pH-mètre (**figure III.13**). Muni d'une électrode en verre. Après l'étalonnage, on émerge l'électrode dans l'échantillon et on lit directement la valeur de pH affichée sur l'écran.

Photo III.13. Mesure de pH à l'aide d'un pH mètre.

III.5.2.2.La détermination du Titre Alcalimétrique Complet (TAC) (Sow, 1990)

Le titre alcalimétrique complet permet de connaitre les doses de carbonates, d'hydroxydes et d'hydrogénocarbonates 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.

- **Matériels utilisés**
  - pH-mètre ;
  - Thermo-réacteur ;
  - Agitateur et un barreau magnétique ;
  - Burette ;
  - Bécher.
- **Méthode**

Pour déterminer le TAC, on prend 15 ml de notre échantillon et on le met dans un bécher. On mesure le pH initial, et à l'aide d'une burette, on ajoute de l'acide sulfurique (H_2SO4) 0,1 N jusqu'à atteindre une valeur de pH = 4.

selon les réactions suivantes **(Boutouta, 2012) :**

$$Ca(OH)_2 + H_2SO_4 \longrightarrow CaSO_4 + 2\,H_2O$$

$$2\,CaCO_3 + H_2SO_4 \longrightarrow Ca(HCO_3)_2 + CaSO_4$$

$$Ca(HCO_3)_2 + H_2SO_4 \longrightarrow CaSO_4 + 2\,CO_2 + 2\,H_2O$$

- **Expression des résultats**

On marque le volume obtenu, soit V. Le TAC s'exprime comme suit :

$$TAC = \frac{V \times 0,1 \times 1000}{25}\ (meq/l)$$

On exprime souvent le TAC en mg/l de $CaCO_3$, pour cela on utilise la relation suivante :

$$TAC = V \times 4 \times 50\ \ (mg/l)$$

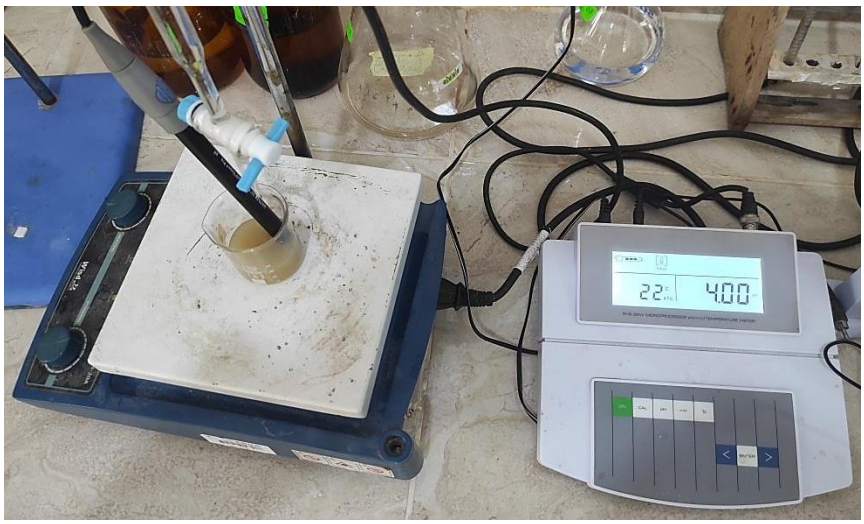

Photo III.14. Détermination de TAC.

III.5.2.3. La détermination des Acides Gras Volatils (AGV) (Boutouta,2012)

Le contrôle des acides gras volatils est une opération indispensable de la digestion anaérobie. Leur accumulation traduit un ralentissement de l'activité des bactéries méthanogènes et peut provoquer le blocage du processus de méthanisation, raison pour laquelle le suivi de la concentration des AGV lors de la digestion est très important.

- **Matériels utilisés**
  - pH-mètre ;
  - plaque chauffante ;
  - Agitateur et barreau magnétique ;
  - Burette ;
  - Bécher.

- **Méthode**

Pour déterminer la concentration totale en acides gras volatils, on continue d'ajouter de l'acide sulfurique à l'échantillon jusqu'à atteindre une valeur de pH =3,5, après on fait bouillir le liquide pendant 3 minutes, de manière à dégazer le dioxyde de carbone. La solution est ensuite refroidie à la température ambiante.

Photo III.15. L'ébullition de liquide sur la plaque chauffante.

Après le refroidissement et à l'aide d'une burette, on ajoute de la soude (NaOH) 0,1 N jusqu'à atteindre une valeur de pH = 4 et on marque le volume obtenu, soit V2. On continu d'ajouter la soude jusqu'à atteindre une valeur de pH = 7, on marque le volume, soit V3.

Expression des résultats

L'AGV est exprimé par la relation suivante :

$$AGV = \frac{(V_3 - V_2) \times 0,1 \times 1000}{25} \quad (meq/l)$$

Ou ;

$$\mathbf{AGV = (V_3 - V_2) \times 4 \times 0,06\ (eng/l)}$$

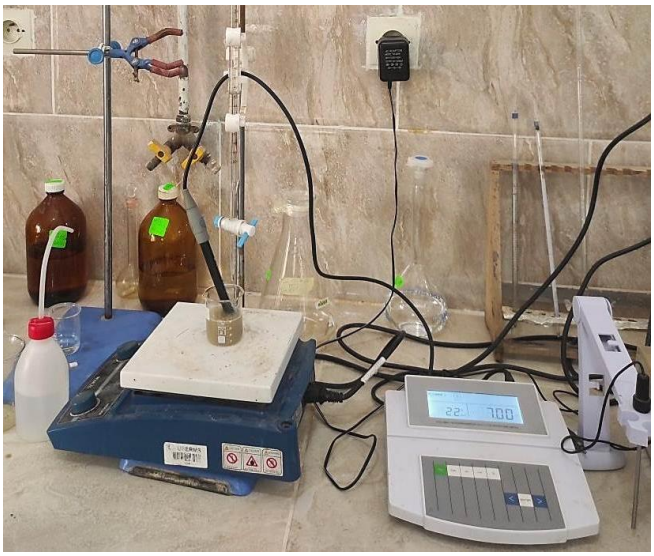

Photo III.16. Détermination des AGV.

III.5.2.4. Détermination de la DCO (la demande chimique en oxygène) (Wellinger et al., 2013)

- **Matériels utilisés**
  - pH-mètre ;
  - plaque chauffante ;
  - Agitateur et barreau magnétique ;
  - Burette ;
  - Bécher

- **Méthode**

Dans une série de 3 tubes on met 3ml de l'échantillon dilué.

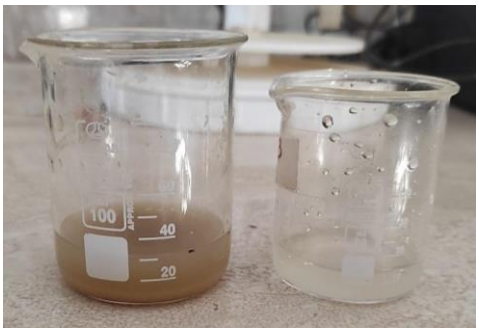

Photo.III.17. Dilution de l'échantillon.

Puis, on ajoute 2 ml de sulfate d'argent (Ag_2SO_4) comme catalyseur, et 4 ml de l'oxydant dichromate de potassium ($K_2Cr_2O_7$), Le mélange est porté à l'ébullition pendant deux heures dans le thermo-réacteur.

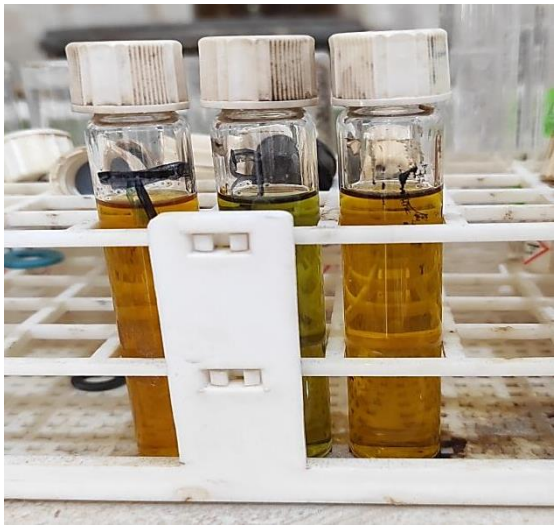

Photo III.18. Échantillons après l'ajout de catalyseur et d'oxydant.

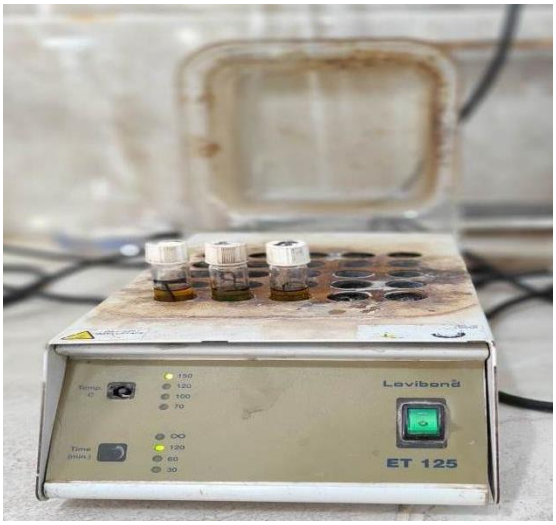

Photo III.19. L'échantillon dans le thermo-réacteur.

On retire les tubes et on les laisse refroidir. On verse chaque tube dans un erlenmeyer et l'excès de bichromate de potassium est dosé à l'aide d'une solution de sulfate fer ammonium (sel de Mohr) en présence de 2 gouttes de féroïen jusqu'à la coloration rose violé.

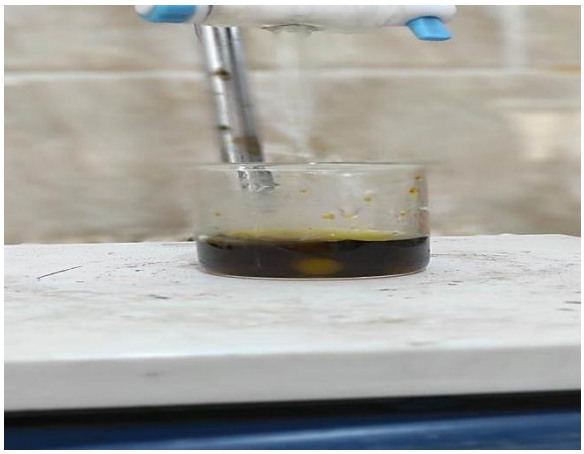

Photo III.20. Dosage d'échantillon par le sel de Mohr

- **Expression des résultats**

DCO= (VT-VE)*8000*T/Ve(mg d' O_2)

Avec :

VT : Volume de sel Mohr pour le témoin ;

VE : Volume de sel Mohr pour l'échantillon ;

Ve : volume d'échantillon ;

T : Titre de sel Mohr ;

III.5.2.5. Le volume de biogaz (Bouamoud , Kebier, 2021).

La production de biogaz est le but de la digestion anaérobie. Durant ce procédé le volume de biogaz était mesuré de façon régulière.

- **Matériel**
  - Éprouvette graduée ;
  - Bécher.
- **Méthodes**

Le biogaz produit est libéré dans un réservoir en plastique gradué. Le volume est mesuré à l'aide de ce même système .

Photo III.21. Dispositif de mesure du volume du biogaz produit.

III.5.2.6.L'inflammabilité du biogaz

Le test d'inflammabilité de biogaz, donne une idée sur le rendement énergétique de l'échantillon utilisé. Chaque fois, après la mesure de volume de biogaz, on passe à un test d'inflammabilité de ce dernier. Le biogaz est retiré à l'aide d'une seringue et subi à une flamme discontinue.

Photo III.22. Teste d'inflammabilité du biogaz produit.

Chapitre IV : Résultats et Discussion

Chapitre IV : Résultats et Discussion

La première partie de ce chapitre présente, le comportement des paramètres qui permettent d'évaluer le déroulement, la stabilité et la conduite du procédé. Ces paramètres sont le pH, le volume du biogaz, les acides gras volatils (AGV), l'alcalinité (TAC), ils ont été effectués deux fois par semaine pendant un temps de séjour de 45 jours.

IV.1 Caractérisation du substrat utilisé

Les résultats exprimés dans le tableau représentent la moyenne des analyses effectuées sur 500 g de fruits de *balanite*.

Tableau IV.1. Caractéristiques des fruits de dattier du désert utilisé dans la fermentation**.**

Caractéristique	**Valeur**
Poids de fruit (g)	500
Poids de la pulpe(g)	269
Poids de la graine(g)	231
Rapport pulpe fruit (%)	53.8
Rapport graine/fruit (%)	46.2
La couleur	Marron

Les principales caractéristiques physico-chimiques du substrat (résidu) utilisé dans cette étude, sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau IV.2. Caractéristiques de substrat utilisé.

Substrat utilisé	**Résidu de la fermentation**
Matière sèche (%)	71.51%
Matière organique (%)	85%

À la lumière de ces résultats, il apparait que le substrat utilisé contient en majeure proportion de ce qui le rend substrat de choix pour la digestion anaérobie. **(Bensamail, 2013).**

IV.2 Evolution des paramètres de fonctionnement

IV.2.1.Évolution du pH

La digestion anaérobie est fortement influencée par les variations de pH. Le potentiel hydrogène est l'un des paramètres les plus importants qui affecte la stabilité du processus.

(Wellinger et *al*., 2013) ont confirmé qu'un pH optimal et uniforme présente l'une des conditions de base qui doit être remplie pour permettre aux bactéries de dégrader efficacement le substrat. En effet, toutes les valeurs du pH mesurées, sont généralement comprises dans l'intervalle optimal de digestion, (6.5 – 7.5) **(Moletta, 2002 ; Angelidaki, 2004 ; Derbal, 2010 ; Haddad et Fawaz, 2012)**. Il permet en fait d'assurer une bonne stabilité du processus de digestion.

Une petite différence de valeur a été cependant observée au début de la digestion (figures IV.1). A partir des valeurs initiales comprises entre 7,1 et 7,52, le pH du milieu d'incubation avait considérablement diminué à 5,83 au cours de la deuxième semaine.

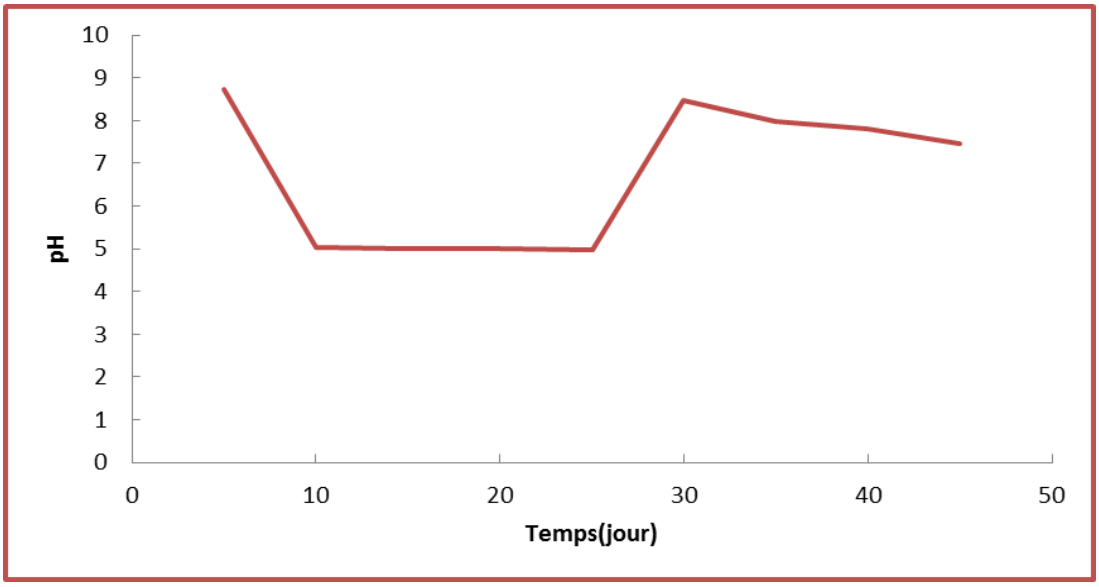

Figure IV.1. Évolution du pH en fonction de temps dans la méthanisation.

La courbe d'évolution du pH, peut être divisée en trois grandes parties ;

- **La première partie.**

Dans cette première partie, on observe une chute brutale du pH, Ceci est dû à la phase d'hydraulise puis acidogènes du milieu. Ce phénomène commence du 1er jusqu'au 10ème jour. (de 8.73 jusqu'à 5.03),

Cette chute peut s'expliquer par la décomposition de la matière organique et la production des acides gras volatils (AGV) et leurs accumulations dans le milieu **(Buyukkamaci et Filibeli, 2004 ; Raposo et al., 2006 ; Chanakya et al., 2009 ; Palacio-Barco, 2010).**

❖ **La deuxième partie**

Dans la deuxième partie, les valeurs du pH commencent à augmenter progressivement, ce qui se traduit par une alcalinisation du milieu. Cette augmentation du pH commence à partir du 11ème jour et se poursuit jusqu'au 30ème jour (de 5.04 jusqu'au 8.48).

Cela s'explique, d'une part par le début de la consommation des acides gras volatils (AGV) par les autres bactéries, et par l'augmentation de l'alcalinité du milieu, de l'autre part **(Raposo et al., 2006 ; Shahrakbah et al., 2006 ; Avulapati et al., 2013).**

❖ **La troisième partie**

Dans cette partie, nous observons une nette stabilité des valeurs du pH, à partir du 35ème jour jusqu'à la fin du processus (entre 7.97 et 7.46).

Durant cette phase, il y a une stabilisation du processus fermentaire, où les AGV produits sont simultanément consommés **(Raposo et al., 2006 ; Shahrakbah et al., 2006).**
Ces presque mêmes constatations ont été obtenues dans de nombreux travaux sur la production de biogaz **(Mlouki. I, Aissaoui, A, 2017 ; Dahou M. 2018 ; Bendjerad.F, Benkheira.R, 2020).**

IV.2.2. Évolution des acides gras volatils (AGV)

La concentration en acides gras volatils (AGV) est un paramètre clé dans les premières phases de la méthanisation. Leur évolution et leur suivi permet d'estimer l'état de dégradation du substrat. La variation de leurs concentrations dans le milieu de culture affecte directement l'alcalinité du milieu, à travers les valeurs du pH du milieu **(Ajay Kumar et al., 2011 ; Palacio-Barco et al., 2010).** Les résultats sont présentés par la **(Figure IV.2)**

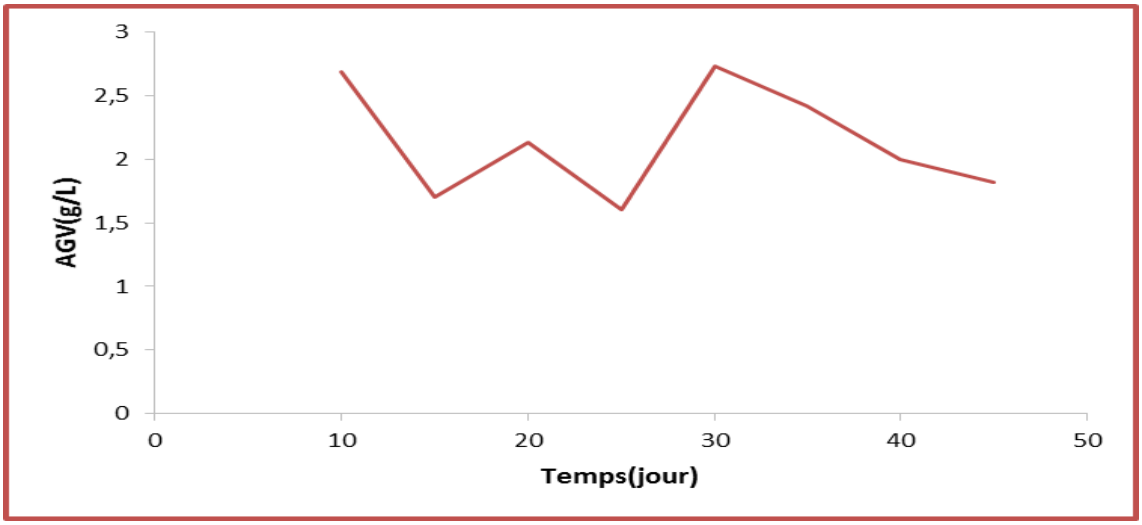

Figure IV.2. Évolution des AVG dans le digesteur.

Les résultats présentés dans la (figure IV.2) montrent qu'il y'a une variation permanente de la concentration des acides gras volatils. Cette courbe présente trois parties :

- **La première partie**

D'après la courbe, nous déduisons qu'au début de la réaction une perturbation de la concentration des acides gras volatils est présente dans le milieu. Cette perturbation débute du 1er au 20ème jour d'une valeur maximale de 1.61 g/L. Ce qui influe directement sur les valeurs du pH avec une acidification du milieu.

- **La deuxième partie**

Ce qui distingue cette deuxième partie, l'augmentation progressive de la concentration des acides gras volatils dans le milieu. Ceci est observé à partir du 21ème jusqu'au 28ème jour. Avec une valeur égale à 2.8 g/L.

Cette augmentation de la concentration en acides gras volatils peut s'expliquer par l'action des bactéries hydrolytiques et acidogènesses qui décomposent la matière organique **(Parawira et al., 2006 ; Zhu et al., 2010 ; Rasi et al., 2013).**

- **La troisième partie**

Durant cette phase de la digestion, La concentration des AGV diminue à partir du 30ème jour jusqu'à la fin du processus. On peut expliquer ce phénomène par la consommation continue des acides gras volatils par les bactéries méthanogènes sans qu'il n'y'ait pour autant un renouvellement de la source de production de ces acides **(Dahou, 2018).**

IV.2.3.La variation du titre alcalimétrique (TAC) du milieu

Le titre alcalimétrique représente l'alcalinité du milieu. Cette alcalinité est la capacité à neutraliser les acides en solution **(Dahou,2018)**

Une alcalinité élevée signifie que le procédé est apte à faire face aux fortes fluctuations du pH, qui pourraient provoquer à terme une acidification anormale du milieu de digestion **(Perez et al., 2006).** Inversement, si l'alcalinité est insuffisante, cela signifierait que le pouvoir tampon ne saurait faire face à une libération massive en AGV et à leur pouvoir acidifiant.

Pour assurer un fonctionnement optimal de la digestion il est recommandé à ce que l'alcalinité soit comprise entre 1 et 3 g/l **(Moletta, 2002 ; Derbal, 2010).**

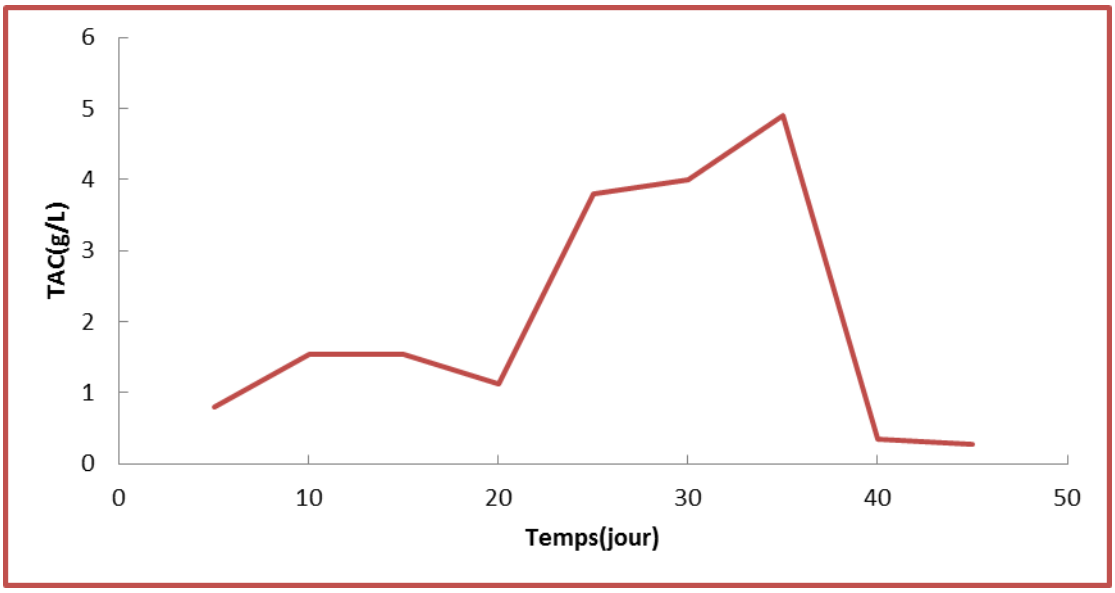

Figure IV.3. Évolution des TAC dans le digesteur.

Au début de la digestion anaérobie, nous avons notés des faibles valeurs du titre alcalimétrique (< 1 g/l). Après, on a observé une augmentation assez importante des valeurs du titre alcalimétrique atteinte jusqu'à 4.9 g/l.

IV.2.4. La variation du rapport AGV/TAC

Le rapport entre les acides gars volatils (AGV) et le titre alcalimétrique (TAC) a été rapporté comme étant un paramètre très important pour le contrôle de la stabilité des systèmes anaérobies **(Strohwald, 1991).**

Ce rapport doit être maintenu au-dessous de 0.25 pour pouvoir garantir un bon niveau du pouvoir tampon dans le bioréacteur. Avec un rapport proche de cette valeur, la possibilité d'une diminution brutale du pH à cause d'une augmentation subite des AGV, est très faible **(Strohwald, 1993).**

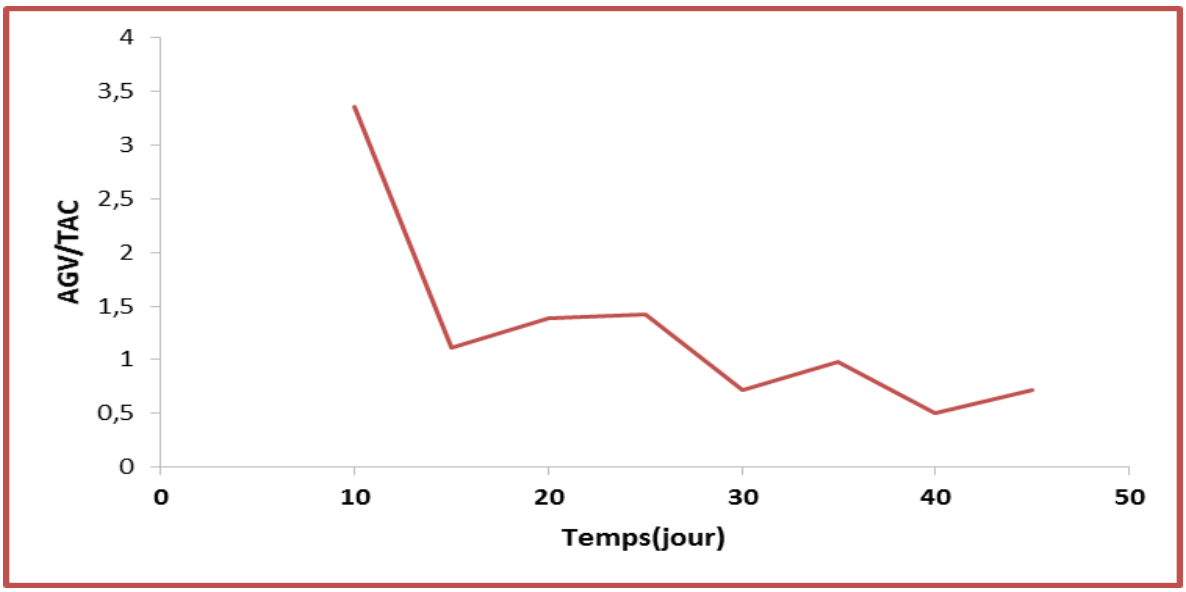

Figure IV.4. Variation du rapport AGV/TAC dans le digesteur.

La (figure IV.4) montre que le rapport AGV/TAC, pendant tout le processus de digestion est compris entre 1.1 et 3.4.

IV.2.5. Variation de la demande chimique en oxygène (DCO)

La demande chimique en oxygène permet d'exprimer le degré de pollution du substrat, cette pollution englobe la charge en matière organique et aussi la charge en matière minérale. Elle permet également d'évaluer la teneur du milieu en matière biodégradable.

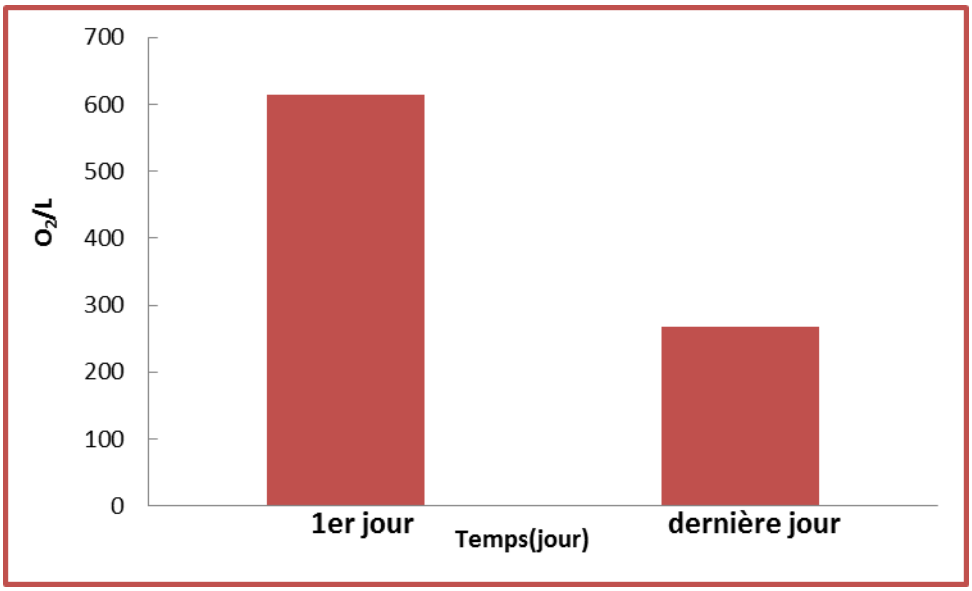

Figure IV.5. Variation de la DCO dans le digesteur.

La valeur de la DCO initiale était de 613.33 mg O_2/L. À la fin de la digestion, l'expérience enregistre une valeur de la DCO égale à 266.66 mg O_2/L, cela nous indique qu'il y'a une dégradation importante de la matière organique.

IV.2.6 La production du biogaz

La production du biogaz est le critère le plus sûr pour un bon déroulement de la digestion anaérobie. La figure, ci-après, présente les résultats de la production du biogaz.

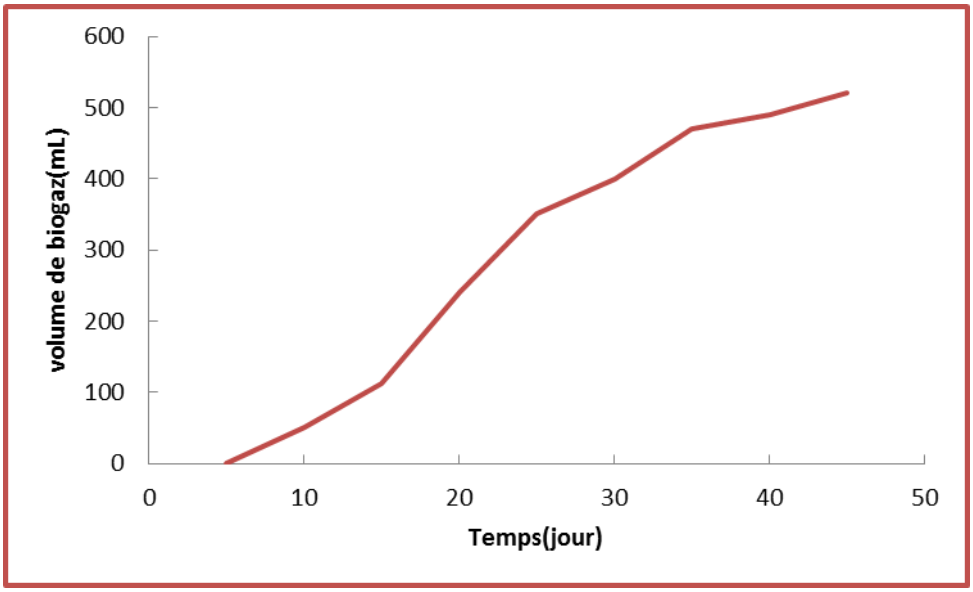

Figure IV.6. Evolution du volume de biogaz en fonction de temps dans le digesteur.

À partir de la figure ci-dessus, on peut diviser la production du biogaz en deux phases :

- **La première phase**

Non-production du biogaz est remarquée au début de la digestion anaérobie, à partir du 1er jusqu'à 5ème jour.

- **La deuxième phase**

À partir du 6ème jusqu'à la fin de processus, il y'a une production notable de biogaz en proportions variables avec un volume totale du 500 ml.

IV.2.7 L'inflammabilité du biogaz

C'est vrai que la production du biogaz est l'objectif principal de la méthanisation, mais la qualité de ce biogaz joue aussi un rôle très important pour la valorisation de ce substrat.

Dans notre étude, Nous avons remarqué qu'un volume significatif de biogaz est produit, néanmoins, ce biogaz n'est pas inflammable . Cela peut être expliqué par le faible pourcentage du méthane contenant dans notre biogaz. Pour que le biogaz devient inflammable, il doit contenir au moins 50% de son volume en méthane.

Photo IV.1. Vérification de L'inflammabilité du biogaz produit.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale

Dans le contexte de protection de l'environnement, les fruits de dattier du désert non commercialisé constitue une solution intéressante à grande échelle.

La digestion anaérobie est un processus utilisé pour produire une énergie renouvelable sous forme de biogaz qui pourra se substituer au gaz naturel pour de nombreuses applications (cogénération, chauffage, moteur à gaz, carburant automobile...).

Les résultats des analyses morphologiques des fruits du dattier de désert (*Balanites aegyptiaca)* montrent que la pulpe représente 53.8 % du fruit, c'est un pourcentage intéressant et encourageant pour son utilisation dans le processus de fermentation. Pour produire le biogaz comme un produit à haute valeur ajouté, nous savons que toute transformation industrielle a des déchets. Dans la plupart des cas, elle a un impact négatif sur l'environnement, donc ce que nous faisons aujourd'hui, c'est de valoriser ces déchets et les convertir en biogaz propre, où la demande pour celui-ci est très élevé. Il peut être utilisé comme substitut au gaz fossile.

L'augmentation de la production du biogaz à partir de la digestion anaérobie, peut se faire par plusieurs méthodes tout en jouant sur l'un des paramètres (pH, AGV, TA). Dans ce travail expérimental, Nous avons utilisé les résidus de la fermentation de dattier du désert comme substrat.

Pour cela, on a lancé une digestion anaérobie par un bioréacteur au laboratoire. Le fonctionnement de la digestion anaérobie été suivi par les paramètres suivant : le pH, les acides gras volatils, le titre alcalimétrique complet, le rapport AGV/TAC, ainsi que le volume du biogaz. En outre, le paramètre de processus de dépollution qui est la demande chimique en oxygène (DCO) est déterminé en amont et en aval.

Le travail expérimental a montré que la valorisation des résidus des fruits de dattier du désert (*Balanites aegyptiaca*) sucrés et sèches, en vue de leur éventuelle transformation en biogaz après fermentation est possible, au lieu de les perdre dans la nature ou consommer par les animaux.

Ces résultats obtenus durant cette étude reste à confirmer et à approfondir, concernant le prétraitement du substrat, pour se débarrasser des inhibiteurs qui peuvent affecter la qualité et le volume du biogaz.

Perspectives

Il y a des paramètres et des analyses qui peuvent donner plus d'informations sur ce biogaz produit, Par conséquent, des recherches supplémentaires devraient être menées dans ce domaine et sur ces matériaux locaux qui ne sont pas exploités pour la consommation humaine d'une part et d'autre part d'agrandir ce projet à l'échelle industrielle.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

Adeline M, (2019). Les nouveaux paysages de l'énergie solaire .Mémoire fin d'études**.** Institut d'Urbanisme et d'Aménagement Régional – Aix-en-Marseille. Aix-Marseille université. Ecole National Superieur de Paysage versailles Marseille **,** soutenu le 21/06/19 : Pp 20**.**

ADEME, (2010). L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie. La méthanisation comment se transforme la matière organique en énergie. Fiche Technique. Pp 6-10. **https://www.ademe.fr/**

Ajay Kumar J., Jianzheng L., Loring N. et Liguo Z, (2011). Research advances in dry anaerobic digestion process of solid organic wastes. African Journal of Biotechnology. **10**(65): 14242-14253.

Akourki A., Sodo Daka AR., Idrissa Sidikou D., Chaïbo I, (2019). Effets du tourteau des graines de Balanites aegyptiaca sur la consommation alimentaire et les performances zootechniques des cabris roux de Maradi Adamou. nt. J. Biol. Chem. Sci. 13(7): Pp 3355-3363.

Almansour E, (2011) Bilans énergétiques et environnementaux de filiéres biogaz : Approche par filiére-type. Présentée pour obtenir le titre de docteur de l' universite Bordeaux 1. Ecole doctorale de sciences physiques pour l' Ingénieur (SPI). Soutenu le : 19/12/2011. Pp 15**.**

Al-Thobaiti SA., Abu Zeid IM., (2018). Phytochmistry And Pharmaceutical Evaluation Of *Balanites aegyptiaca*: An Overview.

Amon T., Amon B., Kryvoruchko V., Bodiroza V, (2006). Optimising methane yield from anaerobic digestion of manure : Effects of dairy systems and of glycerine supplementation. Int. Congr. Ser. 1293, Pp 217–220. https://doi.org/10.1016/j.ics.2006.03.007

Angelidaki I., Sanders W, (2004). Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants. Reviews in Environmental Science and Biotechnology. **3**(2): 117-129.

Annie B. (1994) . La *balanites*, l'arbre intelligent du sahel.

Avulapati MM., Anand, TNC., Ravikrishna RV, (2013). Full Chemical Kinetic Simulation of Biogas Early Phase Combustion in SI Engines. *Energy & Fuels*. **27**: 197–207.

ATEE, 2022. La filière du biogaz **https://atee.fr/**

Baumer M, (1995). Arbres, arbustes et arbrisseaux nourriciers en Afrique occidentale. Ed. ENDA. Dakar. Pp, 260.

Belaidene M, (2015). Memoire De Master. Contribution A L'elaboratio, D'un Dispositif Produisant Du Bbiogaz-Methane. Ecole National Superieur D'hydroulique -ARBAOUI Abdellah. Departemant Alimantation En Eau Potable : Pp 92.

Bendjerad F., Benkheira R, (2020) Production de biogaz à partir des tourteaux des dattes dans la région d' Adrar. Mémoire de fin d'étude en vue de l' obtention du diplôme de master en génie chimique. Université Ahmed Draia Adrar. Faculte des sciences et de la technologie. Pp: 23_31.

Ben Brahim .Z, (2012). Production de l'éthanol par bio-fermentation des dérivés des dattes. Pp21 ,25.

Bensmail L, (2013). Contribution à la production du biométhane à partir des déchets ménagers de la ville de Béchar. Thèse de doctorat de l'Université de Béchar, Algérie.

Berhaut J, (1967). Flore du Sénega1.2éme éd. Ed. Clairafrique. Dakar. Pp, 485.

Boesewinkel FD, (1994). Ovule and seed characters of *Balanites aegyptiaca* and the classification of the linales-Geraniales-Polygala les assembly. Acta Bot .Neerl.Vol: Pp 15- 25.

Bollon J, (2012) Etude des mécanismes physique et de leur influence sur la cinétique de méthanisation en voie séche : essais expérimentaux et modélisation. Pour obtenir le grade de docteur. Ecole doctorale de chimie de lyon. Soutenu le : 07/02/2012.: Pp 54.

Booth FEM., Wickens GE, (1988). Non-timber uses of selected arid zone trees and shrubs in Africa. FAO. Conservation guide 19. Rome. Pp 18-27.

Bouamoud M., Kebier H, (2021). Valorisation Des Déchets Organique D'origine Agricole Par Digestion Anaérobie. Mémoire Pour l'obtention du diplôme de Master. Université de Ghardaia. Faculté des Sciences de Technologie.: Pp 42.

Boulal A, (2017). Contribution a l'étude de la microflore des dattes conservées par des méthodes traditionnelles (btana), et valorisation des dattes de faible valeur marchande. Oran :

Universite d'Oran 1 Ahmed ben bella. Date de soutenance 28/06/2017.

Bounaceur A, (2015). Etude et conception d'un système hybride de production d'énergie». Mémoire de Master Professionnel. Université de Kasdi Merbah d'Ouargla, soutenue le 07 / 06/ 2015. Pp, 1-43.

Boutouta I, (2012) Valorisation énergétique des déchets solides urbains de la ville de Blida. Mémoire présenté en vue de l'obtention de diplôme de Master. Université Saad Dahlab de Blida. Faculté des Sciences de l'Ingénieur.: Pp 8_16.

Brama T, (2001). Contribution á l'étude de la caractérisation et de la germination de *Balanites aegyptiaca* (L.) Del. Dans la région de Tamanrasset These. Doct écologique et environnement Univer Tlemcen Pp, 177.

Brar S.K., Dhillon GS., Soccol, CR, (2014). Biotransformation of Waste Biomass into High Value Bio chemicals. Springer, New York, NY.

Buyukkamaci N., Filibeli A, (2004). Volatile fatty acid formation in an anaerobic hybridreactor. *Process Biochemistry. **39**:1491–4.*

CESEAU C, (1964). Encyclopedie Du Monde Vegetal. (1964) -Tome 1, Paris,. Vol 3. édition Quillet.

Chanakya HN., Reddy BVV.,Jayant M, (2009). Biomethanation of herbaceous biomass residues using 3-zone plug flow like digesters – A case study from India. *Renewable Energy. **34**: 416–420*.

Chen X., Gu Y., Zhou X., Zhang, Y, (2014). Asparagus stem as a new lignocellulosic biomass feedstock for anaerobic digestion: Increasing hydrolysis rate, methane production and biodegradability by alkaline pretreatment. Bioresource Technology 164, 78–85. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.04.070

Chothani DL., Vaghasiya HU, (2011). A review on *Balanites aegyptiaca* Del (desert date): phytochemical constituents, traditional uses, and pharmacological activity. Pharmacognosy Reviews 5 :Pp 55-62.

Dai, B., Xu, J., He, Y., Xiong, P., Wang, X., Deng, Y., ... & Yin, Z, (2015). Acid inhibition during anaerobic digestion of biodegradable kitchen waste. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, *7*(2), 023118.

Dahou M. (2018). Recherche des conditions optimales de la production du biogaz à partir des boues de la station de lagunage de la ville d'Adrar. Thèse de Doctorat, Universite Kasdi Merbah Ouargla. Soutenue le 24/09/2018: Pp 192.

Dawider AM., Metwally MAF., ABDEL-GALIL A., Berghot M, (1985)– Balanites aegyptiaca grown in Sudan as a source for diosgenin. Ind. Journal of Pharm. Sci. 219p.

De La Farge B, (1995). Le Biogaz, Procédé de fermentation méthanique. Edition Masson, Pp, 237.

Depirre D., Gillet. H, (1991). L'arbre désertique source de vie.Bois et forêts des Tropiques Pp 43-50.

Derbal K, (2010). Digestion anaérobie des déchets solides mélangés avec les boues de station d'épuration. Thèse de Doctorat de l'Université de Mentouri, Constantine.

Djaafri M, (2020). Amélioration de la digestion anaérobie des déchets organiques dans un digesteur en continu.These de doctorat. universite abdelhamid ibn badis mostaganem algeria. departement de genie des procedes. Soutenue le :08/10/ 2020 : Pp 237.

Domenech S, (2016). Design of bioethanol green supply chain: Comparison between first and second generation biomass concerning economic, environmental and social criteria. Computers and Chemical Engineering 85: Pp 16–35.

Eurametha , (2020). https://eurametha.net/le-projet/.

Ferrer I., Vázquez F., Font X, (2010). Long term operation of a thermophilic anaerobic reactor: Process stability and efficiency at decreasing sludge retention time. Bioresour. Technol. 101, : Pp 2972–2980. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.12.006

Fortin M., Maynart G, (1997). Plantes médicinales du sahel. Ed. ENDA. Dakar. Série Etudes et Recherches, n° 187-188-189 p280.

Fredric S.D. (2019). Biogas Europe, https://www.methanisation.info/index.html

Gaussen H., Leroy JF., Ozenda P, (1982). Précis de Botanique. Tome II : végétaux supérieurs.2eéme édition revue et augmentée. Ed. Masson. Paris. Pp, 579.

Gnoula C., Mégalizzi V., De nève N., Sauvage S., Ribaucour F., Guissou P., Duez P., Dubois J., Ingrassia L., Le Franc F., Kiss R., Mijatovic T, (2008). Balanitin-6 and-7 :Diosgenylsaponins isolated from *Balanites aegyptiaca*(L.) Del. Display significant anti-tumor activity in vitroand in vivo. *Int J. Oncol.* Vol 32 : Pp, 5-15.

Gupta SC., Shenoy S., Kotecha M, (2012) Pharmacognostical and Phytochemical evaluation of Balanites aegyptica Del. Stem Bark. International Research Journal of Pharmacy 3:Pp 169 -173.

Gwogon MG, (2012). Etude de faisabilite sur la production de l'electricite a partir du biogaz a edea. Memoire redige pour l'obtention du master specialise en genie electrique energetique et energie renouvelable. La soutenu 28/03/2013.pp 11.

Haddad M. et Fawaz Z, (2012). Evaluation of microalgal alternative jet fuel using the AHP method with an emphasis on the environmental and economic criteria. Environmental Progress & Sustainable Energy. **32**(3): 721-733.

Hadri K ,Cheikh N., Boulal A, (2022). Ethanol Production by *Balanites Aegyptiaca* Fruits Valorization In The Adrar Region. The First International Conference on Renewable Energy

Advanced Technologies and Applications (ICREATA'21). October 25-27 2021, Adrar, Algeria. Pp50-51. ISBN: 978-999. http://icreata.net/ICREATA'21_Proceedings.pdf.

Hall JB., Walker DH, (1991). *Balanites aegyptiaca*: a monograph. Sch, Agi.for.Sc Univ. of Wales; Bangor: Pp65.

Hall JB, (1992). Ecology of a key African multipurpose tree species, *Balanites aegyptiaca* (Balanitaceae): the state-of-Knowledge.for .Ecol .Manage. Vol 50: Pp, 1-30.

Harman R., Sofowora EA, (1971). Biosynthesis of diosgenin in germinating seeds of Balanites aegyptiaca. Bd. 20. Heft.3. Hippokrates, Verlag GMBH. Stuttgart. Pp193-198.

Hess J, (2007). Modélisation de la qualité du biogaz produit par un fermenteur méthanogène et stratégie de régulation en vue de sa valorisation. Automatique / Robotique. Université Nice Sophia Antipolis. Français. tel-00257347

Hill D.T., Coob SA., Bolte JP., (1987). Using volatile fatty acid relationships to predict anaerobic digester failure. Transactions of the ASAE. 30,: Pp 496-501.

Kaboré-Zoungrana C., Diarra B., Adandedjan C., Savadogo S, (2008). Valeur nutritive de *Balanites aegyptiaca* pour l'alimentation des ruminants. Institut du Développement Rural. Université d'Abomey-Calavi : Pp 5**.**

Khodja FB., Aboubekr DJ, (2014). Etude sur la valorisation énergétique par conversion biomasse de boues résiduaires urbaines-cas de la station d'épuration ONA-Tlemcen. . Mémoire pour l'obtention du diplôme de master en génie mécanique. Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen. Faculté de technologie. Soutenu le : 23/06/2014. Pp 29.

Lauras E., Olea S, (1990). Valorisé le potentiel économique du Balanites aegyptiaca. Suppl. Sllva. Arb. for. Soc. Vol 15 : Pp, 8-9.

Lockett C, (2000). Energy and micronutrient composition of dietary and medicinal wild plants consumed during drought. Study of rural Fulani, Northeastern Nigeria. International Journal of Food Science and Nutrition 51: 195-208,

Luxereau A., Tubiana M J, (1994). Le *Balanites aegyptiaca*, arbre a usages multiples .In: Actes des deuxièmes journées de l'arbre. Marrakech: Pp, 48-53

Mango D., Costa GMD., Faria ACD., Tavares AMG., Lopes AJ., Jansen J. Marche EL, (2001). Méthanisation des effluents et déchets organiques : état des connaissances sur le devenir pathogène. Thèse pour obtenir le grade de docteur veterinaire de diplôme d'etat. L'université Paul-Sabatier de Toulouse.

Massoudi FZ., Ammar M, (2020). Contribution à l'étude de la valorisation énergétique des fruits de *Balanites aegyptiaca* dans la région d'Adrar. mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de Master.Université Ahmed Draïa Adrar: Pp 83.

Miret C., Chazara P., Montastruc L., Negny S., Domenech S, (2016). Design of bioethanol green supply chain: Comparison between first and second generation biomass concerning economic, environmental and social criteria. Computers and Chemical Engineering 85: Pp 16–35. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2015.10.008

Mlouki I. Aissaoui A, (2017). 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. Mémoire de fin d'étude en vue de l' obtention du diplôme de master en chimie de l'environnement. Université d' Adrar. Faculte des sciences et de la technologie. Soutenu le : 01/06/2017. Pp 19_ 35.

Moletta R, (2002). Procédés biologiques anaérobies, Dans Gestion des problèmes environnementaux dans les industries agroalimentaires. Technique et documentation. Éditions Lavoisier, Paris.

Moletta, R, (2008). Méthanisation de la biomasse.

Mottet A, (2009). Recherche d'indicateurs de biodegradabilité anaérobie et modélisation de la digestion anaérobie thermophile : applications aux boues secondaires d'épuration non traitées et prétraitées thermiquement. Pour obtenir le grade de Docteur de l'universite Montpellier II. Faculte des sciences et techniques du Languedoc. Soutenue le: 23 /10/ 2009.Pp 16.

Moletta R, (2013). La méthanisations, aspects généraux. L'eau, l'industrie, les nuisances Hors série méthanisation. : Pp 9 – 14.

Mokhles K, (2018). Caractérisation cinétique de la biodégradation de substrats solides et application à l'optimisation et à la modélisation de la co-digestion. Thèse pour obtenir le grade de docteur de l'université de Montpellier. Soutenu le : 21/06/2018. : Pp 16_17.

Nelson MC., Morrison M., Yu Z, (2011). A meta-analysis of the microbial diversity observed in anaerobic digesters. Bioresour. Technol. 102,:Pp 3730–3739.

https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.11.119

Niou K., Zerroud B, (2020). Contribution à l'étude des polysaccharides de *Balanites aegyptiaca*: Activités biologiques. Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master Académique. Département Des Sciences de la Nature et de la Vie.

Orellana N., Ricardo Ch, (2019). Valorisation par digestion anaérobie des déchets organiques ménagers de la ville de Cuenca, équateur. Master en sciences et gestion de l'environnement, à finalité spécialisée en énergies renouvelables. Pp 15.

Orwa C., Mutua A., Kindt R., Jamnadass R., Simons A, (2009). Agroforestree Database: a tree reference and selection guide. Version 4. Agroforestree Database: a tree reference and selection guide. Version 4.

Ostrem KM, (2004). Greening waste: Anaerobic digestion for treating the organic fraction of municipal solides wastes. Mémoire de Maitrise, Columbia University, Department of Earth and Environmental Engineering, New York.

Palacio-Barco E., Robert-Peillard F., Boudenne JL., Coulomb B, (2010). On-line analysis of volatile fatty acids in anaerobic treatment processes. *Analytica Chimica Acta.* ***668****: 74–9.*

Parawira W., Murto M., Zvauya R., Mattiasson B, (2006). Comparative performance of a uasb reactor and an anaerobic packed-bed reactor when treating potato waste leachate. Renewable Energy **31**: 893-903.

Parkan J, (1993). Le *Balanites*. Le Flamboyant, Pp10-11.

Perez MR., Rodriguez-Cano L., Romero I. et Sales D, (2006). Anaerobic thermophilic digestion of cutting oil wastewater: Effect of co-substrate. *Biochemical Engineering Jornal.* ***29****: 250-257.*

POITRAT, E, (2005). Les biocarburants en France et en Europe. *Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), Rhônalpénergie-Envi. Lyon, 29.*

Price EC., Cheremisinoff PN, (1981). Biogaz-Production & Utilisation. Michigan, USA. Ann Harbor Science. Pp 146**.**

Raposo, F., Banks, C.J., Siegert, I., Heaven, S. et Borja, R, (2006). Influence of inoculum to substrate ratio on the biochemical methane potential of maize in batch tests. *Process Biochemistry* ***41****: 1444–1450.*

Rasi, S., Seppl, M. et Rintala, J, (2013). Organic silicon compounds in biogases produced from grass silage, grass and maize in laboratory batch assays. Energy. **52**:137-142.

Ratsiresiarisaona K.M, (2015). Les énergies renouvelables : un levier du développement pour madagascar. Mémoire de Maitrise. universite d'antananarivo. Département Economie Option Administration. Soutenu le 14 Avril 2016 : Pp 11. https://doi.org/doi.org/10.1007/978-1-4614-8005-1

Rongead , (2014). *Balanites aegyptiaca* Pp. 2.

Sands MJS, (1983). Notes on Balanites from Somali Republic and Ethiopia. Kew Bulletin: Pp, 40.

Saidi, A., & Abada, B, (2007). La biométhanisation: une solution pour un développement durable. Rev. Energ. Ren.: CER, 7, 31-35

Dakar S, (2020). Fruit de dattier du désert.

https://twitter.com/save_dakar/status/1258717193086386177.

Schunck de Goldfiem J, (1942). Etude chimique de *Balanites ægyptiaca* (Del.).Vol 89 : Pp, 236.

Shahrakbah Y., Yoshihito S., Mohd A.H., Minato W., Sunderaj S, (2006). Start-up operation of semi-commercial closed anaerobic digester for palm oil mill effluent treatment. Process Biochemistry. **41**: 962–964.

Siegert,I., Banks,C, (2005). The effect of volatile fatty acid additions on the anaerobic digestion of cellulose and glucose in batch reactors. Process Biochem. 40,: Pp 3412–3418. https://doi.org/10.1016/j.procbio.2005.01.025

Silvestre, G., Rodríguez-Abalde, A., Fernández, B., Flotats, X., Bonmatí, A, (2011). Biomass adaptation over anaerobic co-digestion of sewage sludge and trapped grease waste. Bioresour. Technol. 102, 6830–6836. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.04.019.

Souza, T. S. O., Carvajal, A., Donoso-Bravo, Pana, M., Fdz-Polanco, F., (2013) ADM1 calibration using BMP tests for modeling the effect ofautohydrolysis pretreatment on the performance ofcontinuous sludge digesters. *Water research*, *47*(9), 3244-3254

Sow, A, (1990). Contribution à la conduite de la méthanisation dans des bioréacteurs a film mix fonctionnant à forts taux de charge. *Thèse de Doctorat de l'École Centrale, Paris*.

Strohwald, N.K.H, (1991). The application of the anaerobic digestion - ultrafiltration process to brewery effluent. *Water Research Commission Contract Report No. 338/1/9*.

Strohwald, N.K.H, (1993). An investigation into the application of the ADUF process to fruit processing effluent. *Water Research Commission Contract Report No. 460/1/93.*

Tayeau F., Faure F., Séchet-Sirat J, (1955). Etude sur le Soumpe (*Balanites aegyptiaca*).Valeur alimentaire de ses protéines. In: Journal d'agriculture tropicale et de botanique appliquée, vol. 2 (1-2) : Pp, 40-49.

Tiétiambou. F.R.S., Bazongo .P., Diallo A.D.A, Kouyaté .A.M, Lykke .A.M, Bassolé I.H.N., Ouédraogo A., (2015). Production de l'huile de *Balanites aegyptiaca*.Fiche technique. University of Ouagadougou, Université Pr. Joseph Ki Zerbo, Université Hassan 1er, Institut d'Economie Rurale, Sikasso, Mali.Pp 2 .

Tou I., Igoud S., Touzi A, (2001). Première approche de la caractérisation du biogaz produit à partir des déjections bovines, Centre de Développement des Energies Renouvelables, Bouzaréah, Alger. Vol. 5 (2002)123-128. Pp 128.

Uieted-Tech, (2017) Anaerobic digestion. In United-Tech. BZT Waste Digester,

http: // www.united-tech.com /wd-anaerobicdigestion.html

Von Maydell H.J, (1983). Arbres et arbustes du sol : leurs caractérisation et leurs utilisations. GTZ. Eschborn: Pp,531.

Von Maydell H. J, (1990). Trees and shrubs of the Sahel: their characteristics and

ses.GTZ. Eschborn. Pp 179 -182.

Wellinger A. Jerry,M., Baxter D, (2013). The biogas handbook, science, production and applications. Woodhead Publishing Limited, Cambridge. Pp, 476.
https://doi.org/10.1533/9780857097415.frontmatter

Yadav JP., Panghal M, (2010). *Balanites aegyptiaca* (L.) Del. (Hingot): A review of its traditional uses, phytochemistry and pharmacological properties. International Journal of Green Pharmacy 4:Pp 140-6.

County Y,(2008). Toward a Twenty-first Century Landfill Yolo County's Accelerated Anaerobic and Aerobic (Controlled Landfill Bioreactor) Composting Projects. In Site du Yolo County, Full-scale bioreactor, http: // www.yolocounty.org/Index.aspx.

Zegnouni A, (2010). Magister en Hydraulique Option : Mobilisation et protection des ressources en eau, Développement d'un modèle dynamique sous matlab pour un processus anaérobie de traitement des eaux. Soutenue, Janvier 2010: Pp, 9.

Zhu, J., Wan, C. et Li Y, (2010). Enhanced solid-state anaerobic digestion of corn stover by alkaline pretreatment. *Bioresource Technology. **101**:7523–8.*