

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

**UNIVERSITE d'ADRAR
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA MATIERE**



**MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU
DIPLOME DE MASTER EN CHIMIE DE L'ENVIRONNEMENT**

Thème

**VALORISATION ENERGETIQUE DES DECHETS DES DATTES A PARTIR DE LA
FERMENTATION ALCOOLIQUE SUIVI PAR LA DIGESTION ANAEROBIE**

Soutenu le : 05 juin 2018

Présenté par :

Mr. SOULIMANI Ahmed El-amine

Membres de jury :

Président :

Mr. HABCHI Abdelmadjid MAA à Univ.d'ADRAR

Encadré par :

Mr. ARROUSSI Abdelaziz MAA à univ.d'ADRAR

Examineur

Mr. RAHMOUNI Mostafa MAA à Univ.d'ADRAR

Année Universitaire 2017_2018

DEDICACES

A mon père
A ma mère
A mes Sœurs et mes
frères

A mes amies Elmakhfi A Aziz,
Dr Tebib Djaloule, Sassi
Khaled, Bendrihem Omar,
Bittate Youcef, Meknassi
Aek, Boutadara Aek,
Elkaraoui A Elkrim, L'word
Boudjamaa, Benali
Boudjamaa, Kaidi Kamel, et
Chef Achour ...

A tous les travailleurs d'URER et surtout khalafi
Mustapha.

A tous la famille
SOULIMANI

A mes collègues de travail

A tous ce qui m'ont soutenu

Je vous remercie pour vos prières, sans lequel je ne serais pas arrivé à bout de ce travail

REMERCIEMENT

Je remercie tous ceux qui ont contribué à ce mémoire

particulièrement :

⇒ Mon encadreur Monsieur Arroussi AbdElaziz qui n'ont ménagé aucun effort pour la réussite du mémoire.

⇒ A ceux qui ont été d'un grand soutien pour moi .Monsieur KHALAFI MUSTAPHA chef d'équipe de biomasse à 'l'unité de recherche en énergie renouvelable.

⇒ Mon père et ma mère, qui m'ont toujours apporté aide, soutien et conseils.

⇒ Enfin je remercie toute Mes collègues de travail à l'unité de recherche en énergie renouvelable en milieu saharien à Adrar.

ABREVIATION

AGV : Les acides gras volatiles

DCO : demande chimique d'oxygène

TAC : Titre alcalimétrique complet

MS : Matière sèche

MO : Matière organique

PCI : Pouvoir calorifique inférieur

PCS : Pouvoir calorifique supérieur

pH : Potentiel d'hydrogène

CPG : Chromatographe à phase gazeuse

LISTE DES TABLEAUX

Page	Titre	Numéro
15	les principaux avantages et inconvénients des biocarburants	1
18	La Production des dattes et le Nombre de palmier en Algérie	2
21	Caractéristiques mondial de bioethanol	3
31	Potentiel méthanogène des déchets	4
43	caractéristiques des substrats après la fermentation	5
44	caractéristiques du substrat avant la digestion	6
48	caractéristiques du substrat après la digestion	7

LISTE DES FIGURES

Page	Titre	Numéro
12	La filière des huiles végétales ou du biodiesel	1
12	La filière bioéthanol ou filière alcool	2
13	Biocarburants de deuxième génération tirés de déchets de l'agriculture et de l'exploitation forestière	3
14	Biocarburants de troisième génération tirés des cultures d'algues	4
20	Principales étapes de la fermentation alcoolique	5
21	Principales étapes de la digestion anaérobie	6
24	Vu d'ensemble de la technologie de méthanisation	7
26	Conception d'un réacteur à deux étapes	8
27	Taux de croissance des méthanogènes en fonction de la température	9
35	la procédure de la distillation	10
35	Diagramme de fabrication de l'éthanol	11
43	La cinétique du sucre et le degré d'alcoole	12
45	Evolution du pH au niveau de digesteur en fonction du temps	13
45	Evolution de la DCO en fonction du temps	14
46	Evolution des AGV en fonction du temps	15
47	évolution du volume de biogaz en fonction du temps	16
47	La cumule de biogaz	17

LISTE DES PHOTO

Page	Titre	Numéro
33	Le déchet des dattes	1
34	Le bain-marie et le réacteur de fermentation	2
37	La pâte de dattes avant la digestion	3
38	Le réacteur de digestion	4
38	a) Balance de précision, b)- Dessiccateur, c)- Etuve	5
39	Four a moufle	6
39	le pH-mètre	7
44	L'inflammabilité du bioalcoole après la distillation	8

SOMMAIRE

INTRODUCTION	8
I. Généralités sur les biocarburants	11
I. 1. Définition des biocarburants	11
I. 2. Différents biocarburants.....	11
I.3. Différentes générations de Biocarburants	11
I. 3.1. Les biocarburants de 1ère génération:	11
I. 3. 2. Les biocarburants de 2ème génération	12
I. 3.3. Les biocarburants de 3ème génération :	13
I. 4. Les avantages et inconvénients des biocarburants	14
II GENERALITE SUR LES DATTES	17
II.1 Production des dattes dans le monde et en Algérie	17
II.1.1 Production des dattes dans le monde	17
II.1.2 Production de la datte en Algérie.....	17
II.1.3 Production de la datte en Adrar	18
II.2 Procédure du Fermentation	18
II.2.1 Caractéristiques mondial de bioethanol	21
II.3 Principe de la digestion anaérobie	21
II.3.1 Aspects stœchiométriques	24
II.3.2 Classification des principales technologies de digestion anaérobie	24
II.3.3 Paramètres influençant la digestion anaérobie	27
II.3.4 Sous-produits de la méthanisation.....	30
II.3.5 Modélisation de la digestion anaérobie	32
III. MATERIELS ET METHODES	34
III.1 FERMENTATION	34
III.1.1 Matière végétale	34
III.1.2 Matériel biologique	34
III.1.3 Dispositifs utilisés pour la fermentation alcoolique.....	35
III.1.4 Méthodologie de travail	35
a-Préparation du moût de dattes.....	35
b-Procédé de la fermentation alcoolique.....	35
c-Distillation alcoolique.....	36
III.1.5 Techniques analytiques	37
a-Détermination du pH.....	37
b-Détermination de la densité.....	37
c-Dosage des sucres réducteurs.....	37
d-Dosage de l'alcool.....	37
III.2 DEGESTION ANAEROBIE	37
III.2.1 Origine du substrat utilisé :	37
III.2.2 Dispositifs utilisés pour la digestion anaérobie	38

III.2.3 Méthodologie de travail	38
III.2.4 Les paramètre suivis.	39
a-Détermination de la matière sèche (MS).	39
b-Le pH.	39
c-La détermination du titre alcalimétrique complet (TAC).	40
d-La détermination des acides gras volatils (AGV).	40
e-L'inflammabilité du gaz.	41
IV. RESULTATS ET DISCUSSIONS.	43
IV.1 Première partie : la fermentation alcoolique de déchet des dattes.	43
IV.1.1 Caractérisation du substrat utilisé :	43
IV.1.2 Evolution des paramètres de fonctionnement :	43
IV.2 Deuxième partie : digestion anaérobie de déchet des dattes	44
IV.2.1 Caractérisation du substrat utilisé :	44
IV.2.2 Evolution des paramètres de fonctionnement :	45
IV.2.3 Caractérisation du substrat après la digestion.	48
Conclusion Générale.	50
REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE	52



INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION

A cause du problème lié aux émissions de gaz à effet de serre et à la prochaine pénurie d'hydrocarbures, plusieurs pays recherchent des nouvelles sources d'énergie comme solution. Les biocarburants sont produits jusqu'à présent à partir de culture alimentaire, comme le tournesol, le soja, le colza, le blé, la betterave, la canne à sucre et d'autres produits alimentaires.

La palmeraie algérienne, qui représente le pivot de l'écosystème oasien à travers l'importance de sa production, génère à chaque campagne des quantités importantes de déchets. En effet, selon les statistiques du Ministère de l'agriculture, la production nationale a atteint 387.313 tonnes en 1998 dont 30 à 50 % sont constitués de déchets et des dattes de faible valeur marchande, soit environ 120.000 tonnes qui pourraient être valorisés [1].

Cependant, des milliers de tonnes de dattes restent non utilisées et peuvent dépasser les 30 % de la production, soit environ 120.000 tonnes qui pourraient être valorisées (récupérées et transformées), Les déchets de dattes cristallisent jusqu'à 65 % de sucres fermentescibles et représentent par conséquent un substrat de choix pour la production de nombreuses substances à forte valeur ajoutée entre autre l'alcool éthylique, substance énergétique stratégique et base de nombreuses industries [2].

En outre, il est utile de signaler que malgré l'importance de son potentiel phoenicicole, l'Algérie ne dispose d'aucune industrie de transformation de la datte. Il ne faut pas oublier que pour que cette industrie soit rentable, il est nécessaire de disposer d'un produit pouvant être obtenu en grande quantité et à un prix relativement bas et les dattes communes ainsi que les déchets répondent parfaitement à cette exigence [3].

La production de bioéthanol à partir des déchets des dattes en Algérie, est considérée comme réussie , réalisée par plusieurs chercheurs, mais la confusion vient peut-on exploiter les déchets des dattes dans plus d'un processus ?.

Notre recherche se concentre sur le processus de fermentation et après la séparation du bioéthanol, nous essayons d'utiliser les restes des dattes pour produire du biogaz par digestion anaérobie.

La méthodologie pour ce travail est articulée autour de trois axes principaux:

- La recherche documentaire : C'est une phase au cours de laquelle nous avons identifié et

Introduction Générale

localisé des sources d'information.

- Les manipulations : Nos manipulations ont commencé d'abord par la fermentation alcoolique suivie par une digestion anaérobie.
- Les traitements de données : C'est un exercice d'analyse, d'interprétation et discussion des données obtenues expérimentale.



CHAPITRE I : GENERALITE SUR BIOENERGIE

I. Généralités sur les biocarburants

I. 1. Définition des biocarburants

Les biocarburants sont des sources énergétiques issues des matériaux biologiques qu'ils distinguent des autres sources d'énergie non fossiles, à l'instar de l'énergie des vagues, et l'éolienne. De plus, quel que soit la forme des biocarburants (solide, liquide, ou gazeuse), il est clair que c'est une énergie durable, et renouvelable puisqu'elle est d'origine végétale et animale, et donc elle peut être remplacée après une courte période [4].

I. 2. Différents biocarburants

Les dix biocarburants cités par la CE (Directive 2003/30/CE) sont: le bioéthanol, le biodiesel (esters d'Huile Végétale), le biogaz, le bio-méthanol, le bio-diméthyléther (bio-DME), le bio-Ethyle-tertio-butyl-éther (bio-ETBE), le bio-Méthyl-tertio-butyl-ether (bio-MTBE), les biocarburants synthétiques, le bio- hydrogène, et les huiles végétales pures [5].

Les deux principaux biocarburants candidats prêts à un développement industriel sont l'éthanol (principalement utilisé en Europe sous forme d'éthyl-tertio-butyl-éthter ou ETBE) et l'ester méthylique d'huile végétale (EMHV) ou biodiesel [6].

I.3. Différentes générations de Biocarburants

I. 3.1. Les biocarburants de 1ère génération:

Il existe deux grandes filières :

Le biodiesel est obtenu à partir de plantes oléagineuses (colza, tournesol, soja...) ou de graisses animales ou d'huiles alimentaires usagées. Il est obtenu par L'estérification, c'est-à-dire la transformation des corps gras en esters méthyliques d'acides gras (EMAG) par une réaction chimique de transestérification en présence d'un catalyseur (**figure.1**). Cette technologie permet de produire à partir d'une tonne d'huile et 110 kg de méthanol, 970 kg de biodiesel et 108 kg de glycérine [7].



Figure.1 : La filière des huiles végétales ou du biodiesel [7].

Le **bioéthanol** est obtenu à partir de plantes sucrières ou de céréales (figure.2). Il est utilisé en mélange dans les essences :

Soit de manière systématique dans les supercarburants SP95-E10 (jusqu'à 10 % en volume), SP95 et SP98 (jusqu'à 5% en volume).

Soit à haute teneur dans le carburant super éthanol E85, qui contient entre 65 et 85% en volume d'éthanol. Ce carburant est disponible en stations-service depuis 2007 et est destiné à des véhicules dédiés, appelés véhicules à carburant modulable. L'éthanol carburant a surtout été développé dans deux pays ; le Brésil et les Etats-Unis [5].

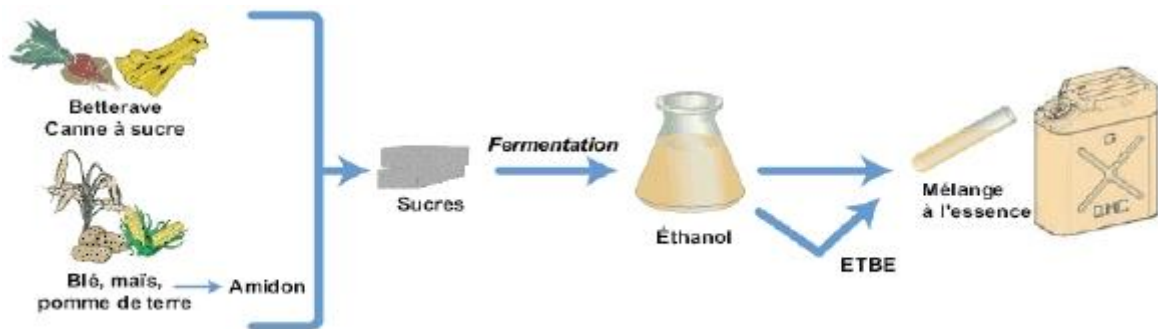


Figure.2 : La filière bioéthanol ou filière alcool [7]

I. 3. 2. Les biocarburants de 2ème génération

Issus de la transformation de la lignocellulose contenue dans les résidus agricoles (paille) et forestiers (bois), ou dans des plantes provenant de cultures dédiées (taillis à croissance rapide) (figure.3). Les nouveaux procédés cherchent à améliorer le bilan énergétique en utilisant toute la

plante. Pour cela les résidus de sylviculture, les déchets organiques, des cultures comme la luzerne ou le miscanthus sont exploités. Ces procédés permettraient en outre de limiter le problème d'usage des surfaces agricoles, d'exploiter un éventail de culture beaucoup plus large que celui de la gamme alimentaire et d'obtenir de meilleurs bilans énergétiques et environnementaux que la première génération [8].

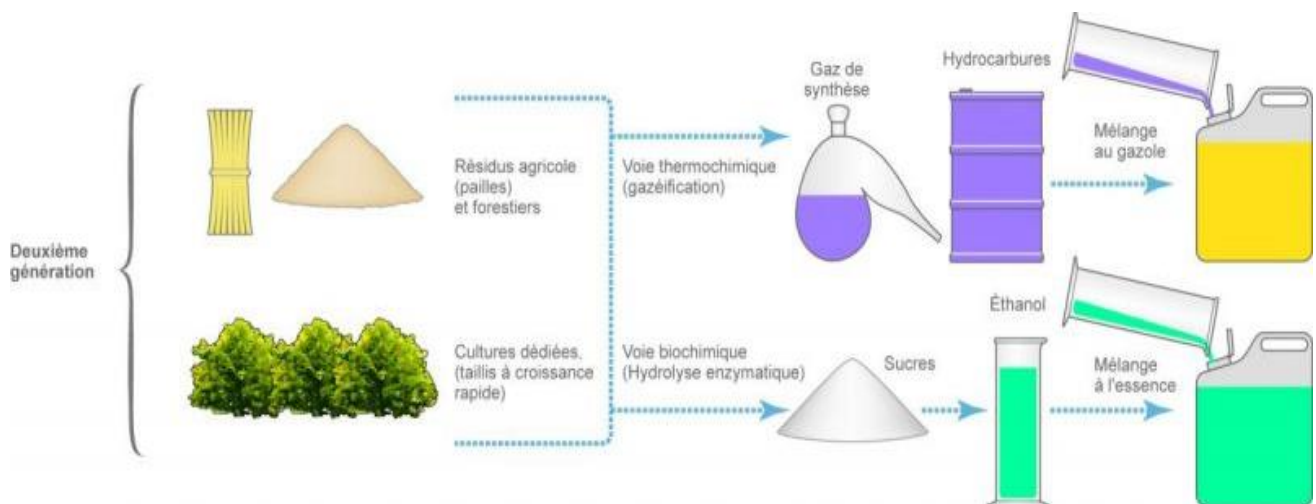


Figure.3: Biocarburants de deuxième génération tirés de déchets de l'agriculture et de l'exploitation forestière [9].

I. 3.3. Les biocarburants de 3ème génération :

les micro-algues

Ils sont obtenus à partir de la production de lipides ou d'hydrogène par des micro-organismes (figure 4). Le soufre est un élément chimique nécessaire au processus de formation des protéines. Lorsque l'algue *Chlamydomonas reinhardtii* est privée de soufre, la photosynthèse diminue et elle met en place une autre voie énergétique : la production d'hydrogène. On peut cultiver les micro-algues avec deux procédés différents : l'utilisation d'une photo bioréacteur ou de bassins extérieurs. Les rendements prévus sont 3 à 30 fois supérieurs aux espèces oléagineuses (notamment car le taux de photosynthèse est plus important). Les biocarburants de 3ème génération sont un enjeu énergétique important .

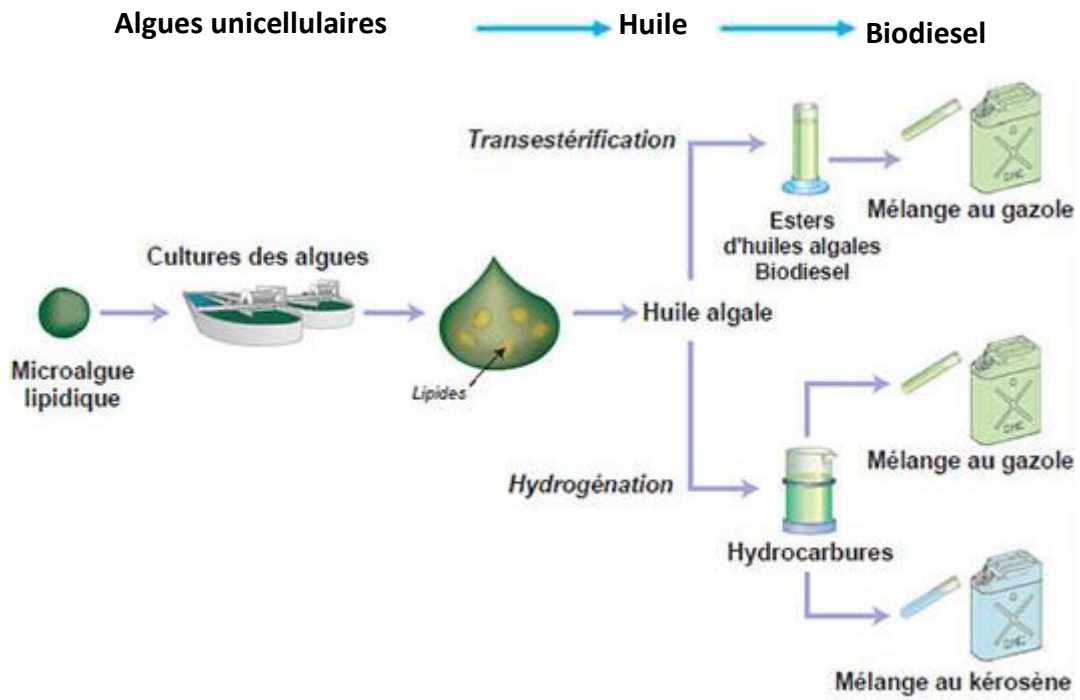


Figure.4: Biocarburants de troisième génération tirés des cultures d’algues [10]

I. 4. Les avantages et inconvénients des biocarburants

Les principaux avantages et inconvénients des biocarburants se résument dans le tableau suivant.

Tableau1: les principaux avantages et inconvénients des biocarburants [10]

LES AVANTAGES	LES INCONVENIENTS
<ul style="list-style-type: none"> - Renouvelables - Limitent les émissions de gaz à effet de serre (GES) et les consommations d'énergie non renouvelable. - Emettent moins de polluants tels que le soufre (à l'origine des pluies acides), les suies, les particules fines. - Ils permettent de diversifier les sources de production d'énergie et de réduire la dépendance à l'or noir et de valoriser des ressources domestiques. 	<ul style="list-style-type: none"> - L'augmentation de la demande en biocarburants a eu pour conséquence le renchérissement des cours mondiaux des céréales et des oléagineux. - Ils sont gourmands en énergie, coûteux à cultiver, à collecter et à transformer. - ils instaurent une concurrence redoutable entre cultures énergétiques et cultures alimentaires. - Le développement des biocarburants issus de cultures énergétiques peuvent être une menace pour les écosystèmes et les puits



CHAPITRE II: GENERALITES SUR LES DATTES

II GENERALITE SUR LES DATTES

II.1 Production des dattes dans le monde et en Algérie

II.1.1 Production des dattes dans le monde

La production mondiale de dattes est d'environ 7 millions de tonnes par année et a plus que doublé depuis les années 1980. Cela place la datte au 5^{ème} rang des fruits les plus produits dans les régions arides et semi-arides. D'après la F.A.O (Food and Agriculture Organization), la production mondiale de dattes est estimée à 7.62 millions de tonnes en 2010. Les principaux pays producteurs de dattes les plus importants sont : l'Egypte, l'Iran, l'Arabie Saoudite, les Emirats arabes, l'Irak, le Pakistan et l'Algérie et le Soudan. Selon les données de la FAO, l'Algérie serait le quatrième producteur mondial de dattes. Du point de vue quantitatif, la production algérienne représente 7% de la production mondiale, mais du point de vue qualitatif, elle occupe le premier rang à la variété Deglet- Nour, la plus appréciée mondialement (FAO, 2010).

II.1.2 Production de la datte en Algérie

L'Algérie est l'un des plus importants pays producteurs de dattes. La production est estimée à 1.1 million des tonnes (Ministère de l'Agriculture, du Développement Rural et de la Pêche. **MADRP 2017**). Actuellement, la palmeraie algérienne est constituée de plus de 18.6 millions de palmiers répartis à travers 09 wilayas sahariennes : Biskra, El-Oued, Ouargla, Ghardaïa, Adrar, Béchar, Tamanrasset, Illizi et Tindouf (MADRP 2015).

Wilaya	Production (tonne)	Total palmier	Espace (he)
Biskra	407790	4315100	42910
El-Oued	247400	3788500	36680
Ouargla	129630	2576600	21980
Adrar	91030	3799000	28330
Ghardaïa	56500	1246500	10850
Bechar	30050	1639800	14120
Tamanrasset	10940	688900	7000
Khenchela	6820	124400	770
Tébessa	2050	61800	820
Laghouat	1620	37300	320
Illizi	1560	129100	1250
Batna	1400	28700	190
El-Bayad	1030	63900	640
Naama	1020	50600	510
Tindouf	840	45200	430
Djelfa	680	10100	100
La somme	990360	18605100	166900

Tableau 2: La Production des dattes et le Nombre de palmier en Algérie (MADRP 2015).

II.1.3 Production de la datte en Adrar

Selon le bilan de campagne phoenicicole de la Direction des Services Agricoles (DSA, 2017) pour l'année 2017 à Adrar, il existe 2.600.000 palmiers dattier avec une production d'environ 780.000 quintaux, plus du 200.000 palmiers Qui a été affecté par la maladie de Boufroua, Mais les intérêts de la Direction traitaient Presque 120.000 palmiers, alors le produit devient à propos de 816.000 quintaux .

II.2 Procédure du Fermentation

La fermentation est une réaction biochimique qui se produit dans des milieux dépourvus

d'oxygène et qui transforme une substance organique sous l'effet d'enzymes, aussi appelées ferments.

Ces enzymes sont produites par des micro-organismes invisibles à l'œil nu comme les levures, les bactéries, les champignons et les moisissures.

Ce phénomène est scientifiquement connu depuis le dix-neuvième siècle, mais a été exploité par l'homme depuis la Haute Antiquité. Il est même l'un des plus anciens procédés de conservation des aliments.

Un exemple bien connu de ferment est le levain des boulangers qui provoque la fermentation et donc la levée de la pâte à pain. Ce levain naturel se fabrique tout simplement à base de farine et d'eau qu'on laisse reposer plusieurs jours. Dans le cas des yaourts et des laits fermentés, les ferments utilisés sont les fameux ferments lactiques comme *Lactobacillus bulgaricus*.

Il existe **différents types de fermentations** :

- la **fermentation alcoolique** qui permet de produire de l'alcool à partir de jus de fruits (les dattes à cette expérience) ; sous l'effet des enzymes, le sucre des fruits est transformé en éthanol et en bulles de dioxyde de carbone.



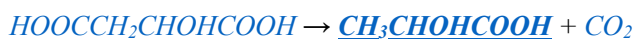
- la **fermentation lactique** qui intervient dans la fabrication du yaourt, du fromage, mais aussi de la choucroute et du pain au levain.



- la **fermentation acétique** qui donne le vinaigre.



- la **fermentation malolactique** qui intervient notamment dans la fabrication du vin.



Le bioéthanol :

L'éthanol CH_3-CH_2-OH est le produit de la fermentation des sucres. Le bioéthanol est l'éthanol élaboré à partir de la biomasse. Il est obtenu par la fermentation des sucres fermentescibles contenus dans la biomasse en présence d'une levure, *Saccharomyces cerevisiae* qui est l'une des levures utilisées lors de la fermentation des sucres. Le bioéthanol

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 celluloseux tels que les résidus agricoles (la paille ou les cannes de maïs), les résidus forestiers, cultures énergétiques,
- microalgues

Le bioéthanol contient 35% d'oxygène, ce qui permet une réduction d'émission de matière particulaire. L'utilisation de bioéthanol réduit de 7% la quantité de CO₂ émise par rapport à l'essence. Par ailleurs, le bioéthanol se caractérise par un indice d'octane très élevé.

Un fort indice d'octane indique une résistance élevée à la détonation provoquée par un allumage prématuré assurant une haute performance du moteur, notamment sur le plan de la puissance développée. L'éthanol joue à ce titre le rôle des dérivés du plomb autrefois présents dans l'essence.

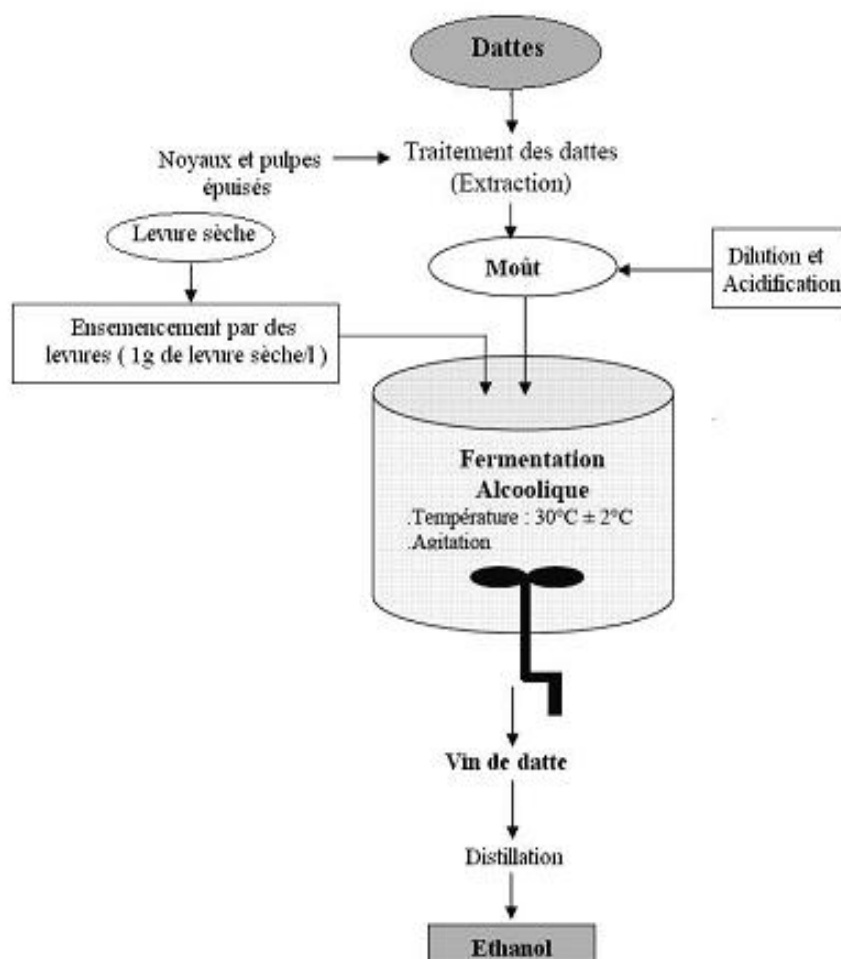


Figure 5: Principales étapes de la fermentation alcoolique [11]

II.2.1 Caractéristiques mondial de bioethanol

	Éthanol	Essence (standard)
Formule chimique	C_2H_5OH	C_7H_{16}
Rapport H/C	3	2,29
Masse molaire (g/mol)	46,07	102,5
Densité (kg/m ³)	794	735-760
Chaleur latente de vaporisation (kJ/kg)	854	289
Distillation (°C)	78,4	30-190
PCI (pouvoir calorifique inférieur) massique (kJ/kg)	26805	42690
PCI volumique (kJ/L)	21285	32020
Rapport stœchiométrique	8,95	14,4
RON (indice d'octane recherché)	111	95
MON (indice d'octane moteur)	92	85

Tableau 3: Caractéristiques mondial de bioethanol

Les **avantages** de l'éthanol sur l'essence sont les suivants :

- une bonne aptitude au mélange avec l'essence,
- un très bon indice d'octane,
- et un rapport H/C plus important (pour rappel, à isoénergie, plus le rapport H/C est important, plus les émissions de CO₂ sont faibles),
- un impact moindre de la combustion sur l'environnement (réduction du CO₂ émis et des hydrocarbures consommés).

Les principaux **inconvénients** de l'éthanol par rapport à l'essence ont trait :

- au Pci (Pouvoir calorifique inférieur) : celui de l'éthanol est inférieur de 1/3 par rapport à celui de l'essence,
- à l'augmentation de la tension de vapeur (en mélange à l'essence entre 0 et 40 %),
- et aux risques de démixtion en présence d'eau (séparation des phases essence et alcool).

II.3 Principe de la digestion anaérobie

Le processus de digestion anaérobie est composé de trois grandes étapes qui sont menées à terme par différents groupes de microorganismes. Chacune de ces étapes produit des extrants qui deviendront des intrants pour les prochaines étapes, jusqu'à la formation du biogaz [12]. Les différentes étapes microbiennes de la digestion anaérobie sont illustrées à la Figure 6.

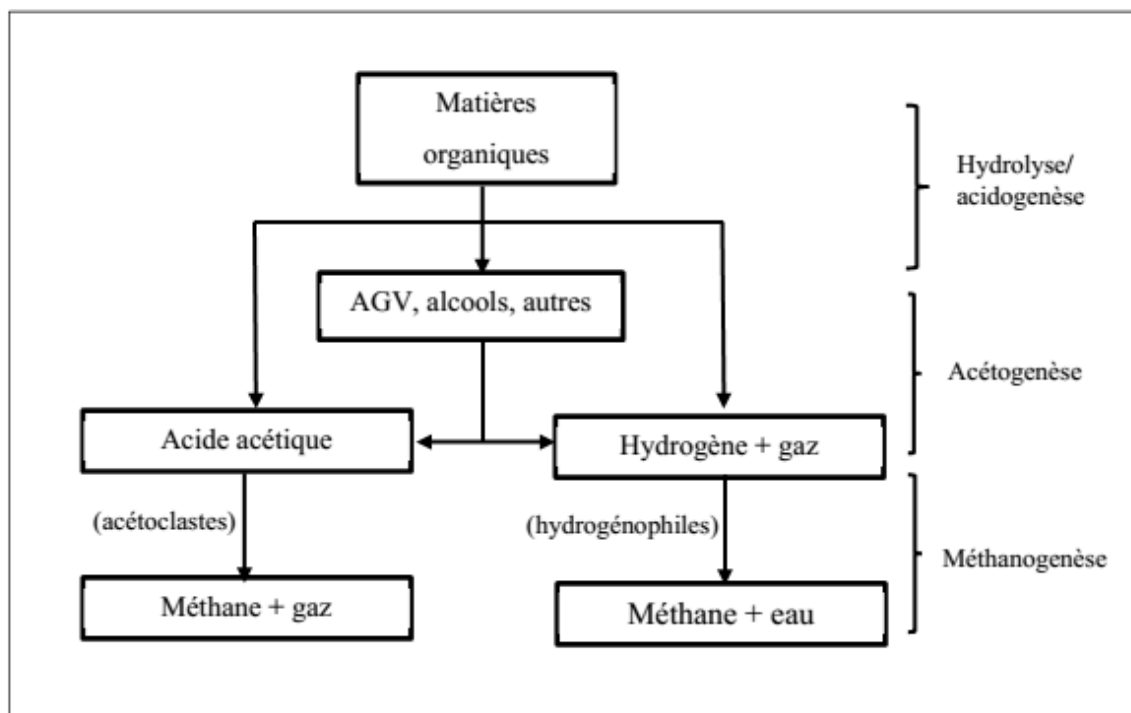
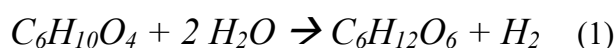


Figure 6: Principales étapes de la digestion anaérobie [13]

• L'hydrolyse et l'acidogénèse

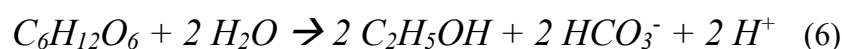
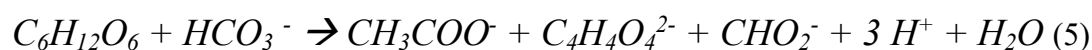
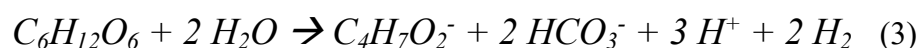
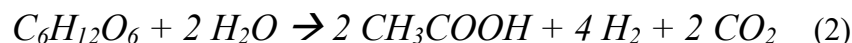
La matière organique présente dans les résidus alimentaires se compose en général de carbohydrates (cellulose, l'hémicellulose, l'amidon, etc.), de protéines et de lipides (huiles et graisses). Durant les premières étapes de la méthanisation, les bactéries acidogènes produisent des enzymes extracellulaires qui décomposent ces substrats organiques complexes en monomères par hydrolyse. Cette transformation permet de rendre assimilable le substrat par les bactéries et facilite la pénétration des molécules à travers les parois des cellules [14]; [15]; [16]. L'étape d'hydrolyse est considérée comme l'étape limitante dans le processus global de méthanisation des matières complexes par rapport aux autres étapes [17]; [18]. Les bactéries de la phase d'hydrolyse ont un métabolisme de type anaérobie strict ou facultatif [19]; [20].

Le mélange de matière organique résiduelle peut être représenté approximativement par la formule chimique $C_6H_{10}O_4$ et la réaction d'hydrolyse peut être écrite comme suit [21] :



Par la suite, une dégradation des composés monomères en acides organiques, en alcools, en hydrogène et dioxyde de carbone par l'action de bactéries fermentatives acidogènes a lieu [22]. Comme son nom le suggère, la phase acidogénèse se traduit donc souvent par une acidification

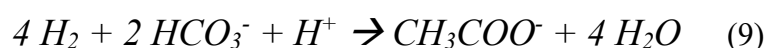
du milieu [23]. Elle est généralement rapide en raison du fort taux de croissance des bactéries mises en jeu [20]; [24]. Les principaux produits issus de la dégradation des monosaccharides sont les suivants : l'acide acétique, l'acide butyrique, l'acide lactique, l'acide formique, les alcools (éthanol, méthanol), l'hydrogène et le dioxyde de carbone. Les réactions métaboliques de ces produits sont les suivantes [25]:



• L'acétogénèse

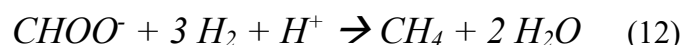
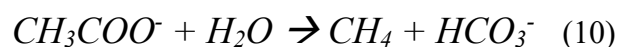
L'étape d'acétogénèse permet la transformation des acides issus de la phase d'acidogénèse en acétate, en hydrogène et en dioxyde de carbone, par l'action de différents groupes de bactéries.

Il s'agit de bactéries acétogènes productrices obligées d'hydrogène, et les bactéries homoacétogènes [26] suivant les réactions suivantes [25] :



• La méthanogénèse

Cette étape représente la dernière phase de la méthanisation. Elle permet de transformer l'hydrogène, le dioxyde de carbone et l'acétate en méthane. Les bactéries impliquées dans ces réactions sont classées parmi les bactéries anaérobies strictes [27]. Elles se divisent en deux populations bactériennes : les méthanogènes acétoclastiques utilisant les acétates pour produire du méthane, et les méthanogènes hydrogénoclastiques réduisant le dioxyde de carbone ou l'acide formique avec le dihydrogène [28]. Les équations suivantes montrent la production du biogaz [29]:



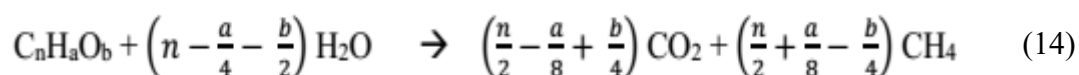
II.3.1 Aspects stœchiométriques

La dégradation de la matière organique dans des conditions anaérobies peut être schématisée d'une manière générale selon l'équation suivante [30]:



Les microorganismes (μ) transforment la MO en méthane, en gaz carbonique ainsi que différents gaz à l'état de trace (NH_3 , H_2S , CO). Une partie de la MO est utilisée pour la synthèse et la croissance de la biomasse ($\eta\mu$) et une autre partie reste sans dégradation (MOrésistante)

En considérant une dégradation complète (minéralisation) d'un composé organique de formule brute $C_nH_aO_b$, la quantité de biogaz produite en digestion anaérobie peut être exprimé suivant l'équation de Buswell [31] :



À partir de cette équation bilan et en connaissant la composition élémentaire du composé organique, il est possible de déterminer la stœchiométrie maximale de la réaction.

II.3.2 Classification des principales technologies de digestion anaérobie

Il existe sur le marché une grande variété de procédés et de type de digesteur. Le choix de la technologie doit prendre en considération plusieurs paramètres, tels que la capacité nécessaire, la composition de la matière à traiter et l'utilisation du produit final. Cependant, presque toutes les stations de traitement comprennent un pré et un post traitement comme l'illustre la Figure 7.

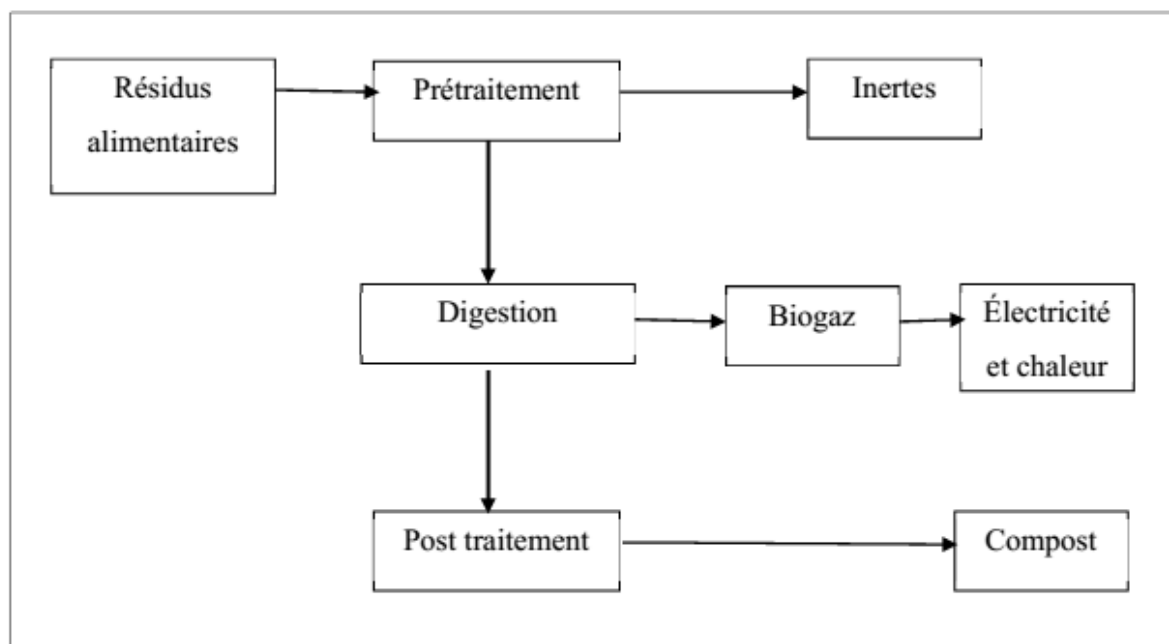


Figure 7: Vu d'ensemble de la technologie de méthanisation

Le prétraitement a pour objectif d'éliminer les matériaux indésirables (inertes, plastiques, métaux.) et d'homogénéiser le substrat avant son introduction dans le digesteur (broyage). Le prétraitement fait appel à différents types de procédés (tri gravimétrique, granulométrie, magnétique, etc...). Le post traitement quant à lui permet de déshydrater le digestat, de compléter sa maturation, de traiter les eaux excédentaires et de purifier le biogaz. Les familles de technologies peuvent être divisées selon différents critères d'opération. Ces critères sont les suivantes :

- **Teneur en matière sèche**

Les digesteurs peuvent être classés selon la concentration en eau du substrat à traiter. Le procédé à voie humide, utilisé principalement pour la méthanisation des matières résiduelles ayant une teneur en matière sèche (siccité) entre 5 et 18%. Le deuxième procédé est à voie sèche, il est utilisé principalement pour le traitement des résidus solides dont la teneur en matières sèches est comprise entre 20 et 50 %. La consistance du milieu de fermentation à voie sèche est pâteuse ou semi-solide [15]; [19].

- **Température d'opération**

La température constitue un facteur important pour la digestion anaérobie [25]. Selon l'apport en chaleur qui est fourni au système, cette température est maintenue constante

pendant toute la réaction. Il existe trois plages de température dans lesquelles la digestion anaérobie est possible. La famille des psychrophiles fonctionne dans un intervalle de température qui varie entre 15 et 25°C. C'est la méthode la moins coûteuse, mais, la moins efficace à cause des faibles rendements en biogaz [26] La famille des mésophiles est caractérisée par une gamme de température allant de 25 à 45°C avec un optimum situé aux alentours de 35°C. C'est le mode le plus utilisé, à cause de sa bonne production en biogaz [15]. Finalement, la famille des thermophiles fonctionne avec des températures variant entre 45 et 65°C avec un optimum d'environ 55°C. Ce mode est de plus en plus utilisé pour le traitement de des résidus solides [32].

• Mode d'alimentation

Il existe trois modes d'alimentations en digestion anaérobie. Les digesteurs en mode continu sont alimentés continuellement, avec une quantité entrante de matières équivalente à celle évacuée. Toutes les étapes de la digestion anaérobie se déroulent sans interruption ce qui entraîne une production constante de méthane [33].

La deuxième catégorie est le digesteur en mode discontinu (batch). Dans ce type de réacteur, l'alimentation se produit en séquence. Lorsque le dégagement du biogaz chute ou devient nul, le réacteur est vidé et un nouveau lot y est introduit. Le dernier type est le semi continu (fedbatch). C'est une combinaison du continu et du discontinu. Son alimentation se fait progressivement sans retirer le digestat avant la fin du processus [26]; [34]; [35].

• Nombre d'étapes

Deux grandes catégories peuvent être retrouvées, soit le procédé à une étape où toutes les réactions de la digestion se font dans un seul réacteur [36], soit le procédé à deux étapes comme l'illustre la Figure 8. Dans ce dernier cas, la phase hydrolyse /acidogénèse est réalisée dans un premier réacteur où la matière organique transformée est placée en série avec un second réacteur dans lequel se réalisent la phase acétogénèse et la phase méthanogénèse [26].

L'avantage de ce système est la plus grande stabilité biologique qu'elle offre pour les matières très rapidement dégradables comme les fruits et légumes [37]; [38].

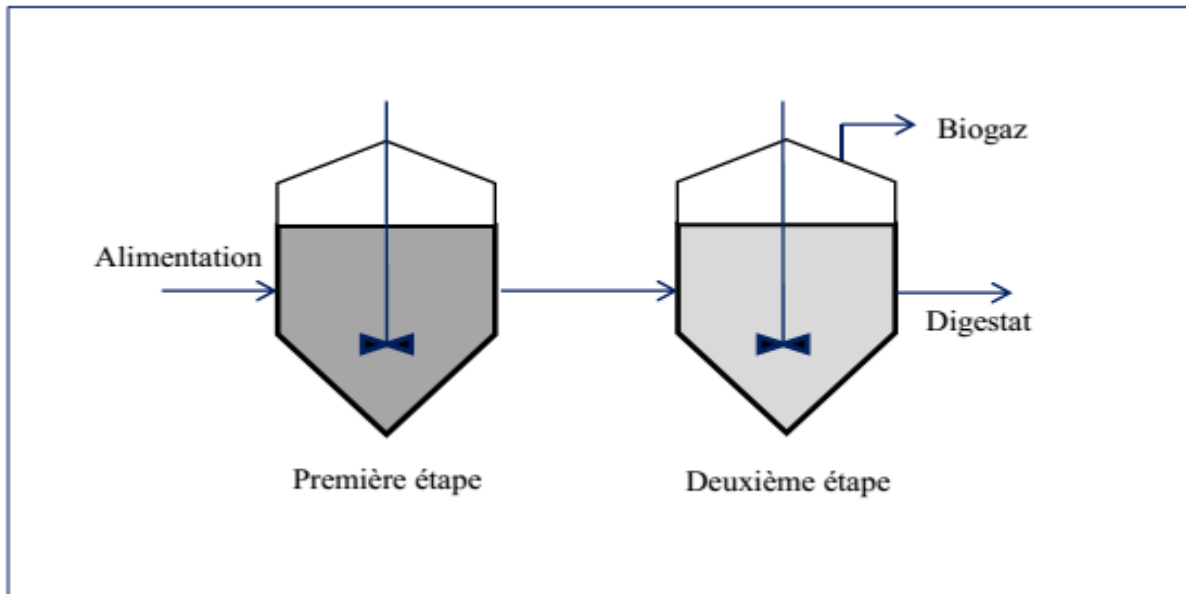


Figure 8: Conception d'un réacteur à deux étapes

II.3.3 Paramètres influençant la digestion anaérobie

• Température

La température a un effet important sur les processus biochimiques et physico-chimiques de la digestion anaérobie [39]. Une augmentation de la température se traduit par une modification de l'activité enzymatique ce qui a pour effet de modifier la vitesse d'hydrolyse de la matière selon la loi d'Arrhenius [40]. De plus, la variation de température entraîne une modification des voies métaboliques et des rendements due à des variations des conditions thermodynamique et des populations bactériennes (fig. 9).

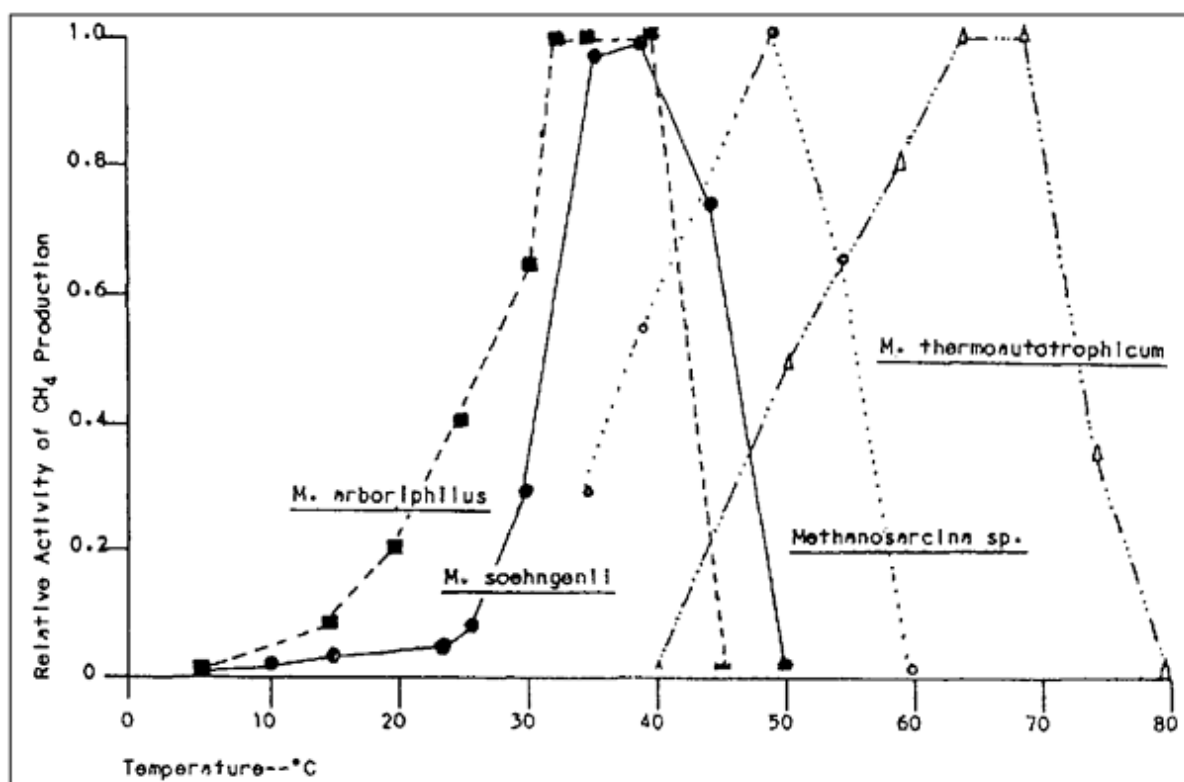


Figure 9: Taux de croissance des méthanogènes en fonction de la température [41]

La température affecte les équilibres des espèces chimiques présentes dans les milieux, comme l'azote ammoniacal et les AGVs, par son action sur les équilibres acides-bases, sur l'équilibre liquides / gaz ainsi que la dissolution des solides [42]. En industrie, une variation de température (panne de système de chauffage par exemple), peut induire une baisse, réversible, de la production de méthane. Cependant, une variation répétée de température peut entraîner des modifications répétées des communautés microbiennes ainsi que des étabolismes réactionnels, générant des problèmes beaucoup plus complexes.

• Acidité du milieu (pH)

Le pH joue un grand rôle dans le fonctionnement biochimique et physico-chimique des milieux de digestion anaérobie. Les bactéries anaérobies sont sensibles aux variations de pH. Le contrôle accru de ce paramètre est essentiel pour le bon fonctionnement d'un digesteur [19]. L'accumulation d'acides gras volatils (AGVs) lors d'une surcharge du réacteur implique une chute rapide du pH à des valeurs inférieures à 5,0 ce qui entraîne une inhibition du processus de méthanisation [43].

Des valeurs de pH supérieures à 7,5 induites notamment par l'accumulation d'ammoniac entraînent une inhibition microbienne et des risques de précipitation de composés minéraux.

Même si le pH optimal du processus de méthanisation se situe entre 6,5 à 7,5, chaque microorganisme possède un domaine de pH dans lequel il se développe de façon optimale [44]. Les bactéries hydrolytiques et acidogènes ont un bon fonctionnement dans une plage de pH entre 5,0 et 6,5, ce qui n'est pas le cas des bactéries acétogènes et méthanogènes qui atteignent un fonctionnement optimal dans un milieu proche de la neutralité [45].

• Acides gras volatils (AGVs)

Les AGVs sont des acides à courtes chaînes carbonées (1 à 6 atomes) produits lors de l'acidification des matières organiques solubles en présence de bactéries acidogènes. Ils sont consommés durant la deuxième étape de la digestion par les bactéries acétogènes et méthanogènes. La détermination de la concentration des AGVs permet de s'assurer que les réactions de dégradation se déroulent correctement. En effet, la principale cause d'acidification du milieu se situe au niveau de l'accumulation d'AGVs due à une surcharge organique ou une fluctuation de la température [46]. Selon la littérature, dans la digestion des déchets solides, et en particulier dans les digesteurs fonctionnant par voie sèche, des taux d'AGVs supérieurs à 5000 mg/L peuvent être constatés sans affecter le rendement de dégradation [26]; [47].

• Taux de matière sèche (MS)

Pour se développer correctement, les micro-organismes présents dans le réacteur ont besoin d'une quantité d'eau élevée. Ainsi, une teneur en humidité de 50 % dans le milieu réactionnel semble être un minimum pour permettre le développement des populations bactériennes. Elle constitue le vecteur de transport des matières solubles. Elle dissout les nutriments ainsi que les substrats et assure leur diffusion depuis les milieux poreux jusqu'aux cellules bactériennes [19].

• Produits azotés

Les résidus alimentaires sont riches en protéines [48]. Au cours de la DA, ces protéines sont hydrolysées en acides aminés et convertis par les bactéries acidogènes en azote ammoniac (sous forme libre non ionisée NH_3 ou ionisée NH_4^+) [39]. À faible concentration, l'azote peut neutraliser les AGVs, ce qui aide à maintenir un pH neutre [26].

Il est généralement admis qu'une concentration entre 50 et 200 mg/L est stimulante

pour la digestion anaérobie [49]. Cependant des concentrations se situant entre 1 500 et 3 000 mg/L sont toxiques pour la population bactérienne [50]. Il faut noter que la forme libre de l'ammoniac est considérablement plus toxique que l'ammonium. De plus, la concentration toxique due à l'ammoniac dépend fortement de la température et du pH qui modifient l'équilibre du couple ammoniac- ammonium [49].

• Temps de séjour hydraulique (TSH)

Le temps de séjour ou de rétention est la durée moyenne durant laquelle la matière réside dans le bio digesteur avant d'être extraite sous forme de gaz ou de digestat. Le temps de rétention est dépendant du type de microorganismes qui contrôle la biométhanisation et du type de procédé utilisé. Pour la digestion anaérobie de matières organiques résiduelles municipales le temps de rétention est de 12 jours pour les réactions thermophiles et de 15 à 20 jours pour les réactions mésophiles [16].

• Charge volatile appliquée (CVA)

C'est la quantité de substrat qui peut être introduite dans le digesteur. Elle est exprimée en kg de matière volatile par m³ de digesteur et par jour (kg MV/m³/jour). Il est important de contrôler ce paramètre pour éviter des problèmes de surcharge organique qui provoquent l'acidification du milieu. Le fait de fixer la charge permet d'évaluer le TSH. De même, l'augmentation de la charge pour une concentration fixe peut se traduire par une diminution du TSH et par conséquent du volume du réacteur [25]. Les valeurs de référence dépendent du type de procédé considéré et oscillent entre 2 et 12 kg MV/m³/jour.

Toutefois, il existe généralement une valeur de la charge, pour une taille de digesteur donnée, qui donne une production maximale de biogaz et au-delà duquel la production de gaz n'évolue plus proportionnellement à une augmentation de ce paramètre [19].

II.3.4 Sous-produits de la méthanisation

Lors de la transformation de la matière organique, il y a une formation de biogaz et de digestat. Si le biogaz a une importante fonction comme source d'énergie, le digestat, quant à lui, peut être utilisé comme amendement des sols.

• Biogaz

Le biogaz contient principalement du méthane et du gaz carbonique. La proportion de ces deux gaz dépend de la nature du substrat, et précisément de la proportion Carbone-

Hydrogène-Oxygène-Azote (CHON). Un substrat riche en C et H produit une forte proportion de méthane, jusqu'à 90 %. Un substrat moyennement riche, comme la cellulose, produit un biogaz contenant 55 % de méthane et 45 % de gaz carbonique. Le biogaz contient aussi d'autres produits générés par la dégradation de la matière organique : composés soufrés et composés azotés en très faible concentration [37].

La productivité en biogaz dépend étroitement de la composition du substrat. Des tests normalisés appelés potentiel méthane (BMP) permettent de déterminer la quantité maximale de méthane qu'un composé est susceptible de produire lors de sa dégradation [51]. Comme le montre le tableau 4, toute la matière organique ne possède pas le même potentiel méthane.

Composé	Potentiel méthanogène indicatif (Nm ³ CH ₄ /kg MV)
Déchets de cuisine	0.546
Ordures ménagères	0.2 – 0.24
Bio déchets (collecte sélective ou tri manuel)	0.36 – 0.4
Bio déchets (tri mécanique)	0.23 – 0.26

Tableau 4: Potentiel méthanogène des déchets [19]

Outre un usage direct dans le procédé, plusieurs utilisations peuvent être envisagées pour le biogaz. La conversion du biogaz en électricité dans une génératrice électrique produit de l'électricité qui est le plus souvent exportée par le réseau public et de la chaleur (eau chaude, vapeur, air chaud). La première des utilisations de la chaleur sur une unité de méthanisation est le chauffage des digesteurs. Le reste de la chaleur est valorisé autrement en agriculture pour le chauffage des bâtiments d'élevage et séchage de foin et de bois, en industrie dans le procédé de fabrication utilisant de la chaleur et dans le résidentiel pour l'eau chaude sanitaire et le chauffage [15].

Une autre utilisation importante du biogaz est sa purification pour son emploi comme gaz naturel. Le biogaz produit pourrait aussi être injecté dans le réseau de gaz naturel. Pour ce faire, il doit être convenablement épuré afin de ne pas présenter aucun risque pour la santé publique, l'environnement et la sécurité des installations [29].

• Digestat et éluat

Le digestat est la matière digérée. Il se présente, en sortie de digesteur, sous la forme d'un produit humide : liquide, pâteux ou solide. Il contient la matière organique non

biodégradable (lignine), les matières minérales (azote) et l'eau. C'est un produit désodorisé (réduction de la matière fermentescible) et assaini (destruction des germes pathogènes).

Selon la destination du produit final, le digestat peut être épandu directement à la sortie du digesteur, ou subir une séparation de phase afin d'obtenir une fraction solide, riche en matière organique et en phosphore. Il est utilisable comme amendement et une fraction liquide, riche en ammoniac, est utilisable comme engrais azoté liquide. Les déchets non valorisables quant à eux (susceptibles de contenir des éléments contaminants) peuvent être stockés en centre d'enfouissement, ou être incinérés.

II.3.5 Modélisation de la digestion anaérobie

Comme déjà mentionné auparavant, la digestion anaérobie est un processus complexe qui nécessite un contrôle précis. Afin d'améliorer la compréhension du système et de prédire son comportement face à différentes conditions opérationnelles, des modèles mathématiques ont été développés. La modélisation a gagné une importance croissante dans le domaine de la méthanisation depuis les années 1970 [52].

Modèle cinétique de la biométhanisation

Dans le but de décrire l'évolution temporelle ou non de la dégradation anaérobie, différents modèles dynamiques ont été développés. Dans le cas de la digestion anaérobie, la cinétique de premier ordre est souvent employée et particulièrement pour la phase d'hydrolyse. Cependant, les modèles cinétiques ne prennent pas en considération l'aspect physique de la digestion anaérobie, à savoir que la transformation du substrat en produits se fait grâce à la présence de population bactérienne. C'est pourquoi, des modèles biologiques ont été développés.

Modèle biologique de la méthanisation

Les phases de la digestion anaérobie (mis à part la phase hydrolyse) sont considérées comme des étapes métaboliques. Les cinétiques biologiques reposent sur deux principes : une consommation du substrat et une croissance bactérienne.



CHAPITRE III: MATERIELLES ET METHODES

III. MATERIELS ET METHODES

III.1 FERMENTATION

III.1.1 Matière végétale

A la base de les données de la DSA, nous avons choisi le variétés des déchet des dattes communes le plus dominante (Hmira) et faible valeur marchande dans la région d'Adrar pour faire la fermentation alcoolique; après la fermentation on a utilisé cette pâtes de dattes pour faire la digestion.



Photo 1: Le déchet des dattes

III.1.2 Matériel biologique

La levure de boulangerie sèche, *Saccharomyces cerevisiae* est utilisée. Elle est conservée dans un endroit frais et sec. Cette souche est utilisée pour la production d'éthanol .

III.1.3 Dispositifs utilisés pour la fermentation alcoolique

Les dispositifs utilisés sont présentés par les deux photographies suivantes:



Photo 2: Le bain-marie et le réacteur de fermentation

III.1.4 Méthodologie de travail

a- Préparation du moût de dattes

Après lavage, l'imbibition des dattes est faite à l'aide d'une eau chaude (90 à 95 °C) afin de faciliter le dénoyautage. Le broyage des pulpes est effectué par la suite. L'eau d'imbibition riche en sucre sera utilisée comme eau de dilution du moût.

Les dattes -ainsi traitées- sont ensuite diluées à raison de 200 g de pulpes pour 800 ml d'eau. Le pH du moût est ajusté entre 4.3 et 4.7 par l'acide sulfurique (H_2SO_4 , 1N).

Ce pH acide préjudiciable au développement des bactéries s'avère propice à la prolifération des levures [53].

b- Procédé de la fermentation alcoolique

Après ensemencement du milieu par la levure de boulangerie *Saccharomyces cerevisiae* (1 g/l) [54], le bio réacteur est plongé dans un bain-marie où la température est maintenue à 30 ± 2 °C. La fermentation est conduite en anaérobiose pendant 72 heures [2].

Toutefois, la fermentation est favorisée par une agitation due au mouvement des bulles du CO_2 dégagé.

Pour suivre l'évolution de la fermentation, on procède chaque 24 heures à des prélèvements pour effectuer les analyses physico-chimiques et détecter l'odeur de l'alcool dans le moût. Après 72 heures, la fermentation est arrêtée.

Au cours de la fermentation, nous avons suivi:

- L'acidité du moût à l'aide d'un pH mètre
- Le taux du glucose
- Le degré alcoolique

c- Distillation alcoolique

A la fin de la fermentation, le vin de dattes obtenu est distillé afin d'extraire l'éthanol. La température de distillation est de l'ordre de 78 °C [2].

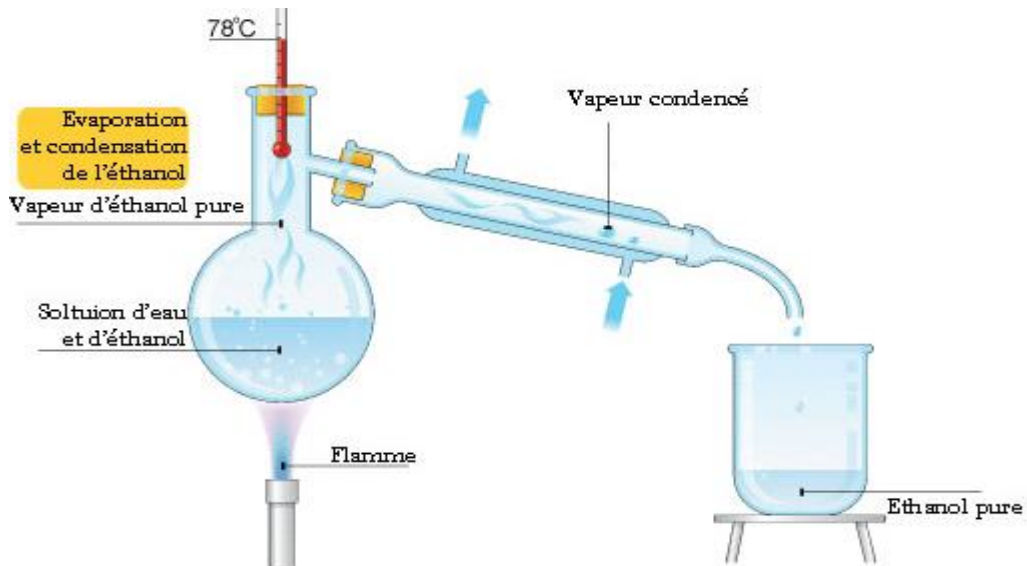


Figure 10: la procédure de la distillation

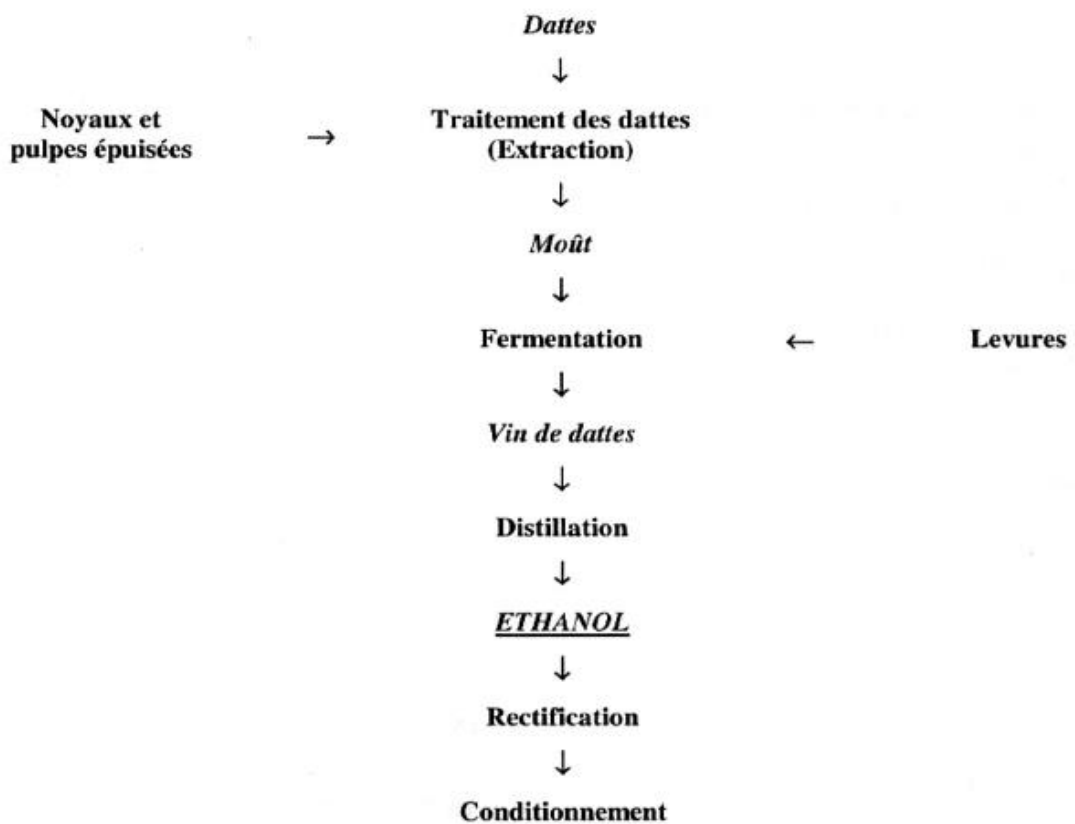


Figure 11: Diagramme de fabrication de l'éthanol [2]

La figure 11, représente le diagramme des différentes étapes de fabrication de l'éthanol

III.1.5 Techniques analytiques

a- Détermination du pH

La détermination du pH, est essentielle pour le contrôle du moût, avant et au cours de la fermentation. La détermination du pH s'effectue par une lecture directe à l'aide d'un pH-mètre.

b- Détermination de la densité

La densité est le rapport entre la masse d'un corps et celle d'un même volume d'eau (densité de l'eau = référence = 1). La densité a été déterminée en utilisant un pycnomètre de capacité 10 cm³.

c- Dosage des sucres réducteurs

Les sucres réducteurs sont dosés par titrimétrie par la liqueur de Fehling. Le principe de la méthode consiste à faire réagir un excès de solution cupro-alkaline sur les sucres. Ces derniers sont séparés par décantation de l'oxyde cuivreux, puis traités par une solution de sulfate ferrique (0.02N). Le titrage se fait à l'aide d'une solution de permanganate de potassium (0.015N). Un tableau donne la correspondance entre le volume versé de permanganate de potassium et la masse de glucose [55].

d- Dosage de l'alcool

Le dosage de l'alcool au cours de la fermentation est effectué par aérométrie. La méthode consiste à distiller le jus alcoolisé, puis mesurer, à la température ambiante, le degré du distillat à l'aide d'un alcoomètre (gradué de 0 à 100°) [56].

III.2 DEGESTION ANAEROBIE

III.2.1 Origine du substrat utilisé :

Les substrats utilisés dans ce travail pour l'alimentation des digesteurs, sont constitués Principalement de pâtes de dattes.



Photo 3: La pâte de dattes avant la digestion

III.2.2 Dispositifs utilisés pour la digestion anaérobie

Le réacteur utilisé est présenté par la photographie suivante:



Photo 4: Le réacteur de digestion

III.2.3 Méthodologie de travail

Après le processus de fermentation, nous avons voulu hydrolyser: on a placé la pate avec de concentration de 8% de matière sèche par litre dans solution NaOH 1,2% pendant 5 jours à 35°C. Ensuite, on a ajouté 100 ml d'inoculum dans le mélange (matière sèche+ NaOH). Ces déchets ont été introduits dans un digesteur de capacité d'un litre. Le digesteur est fermé hermétiquement pour assurer l'anaérobiose, puis il est plongé dans un bain marie réglé à 35 °C \pm 2 °C [57] [58].

Le volume du biogaz formé est mesuré à l'aide de la méthode de liquide déplacé, ensuite il est normalisé dans les conditions de température et de pression [59].

III.2.4 Les paramètres suivis

a- Détermination de la matière sèche (MS) [60] :

La teneur en matière sèche

La matière sèche est déterminée après dessiccation d'1g de chaque échantillon dans une étuve à 105°C jusqu'à poids constant. La différence de poids correspond à la perte d'humidité et le résidu représente donc la teneur en matière sèche.

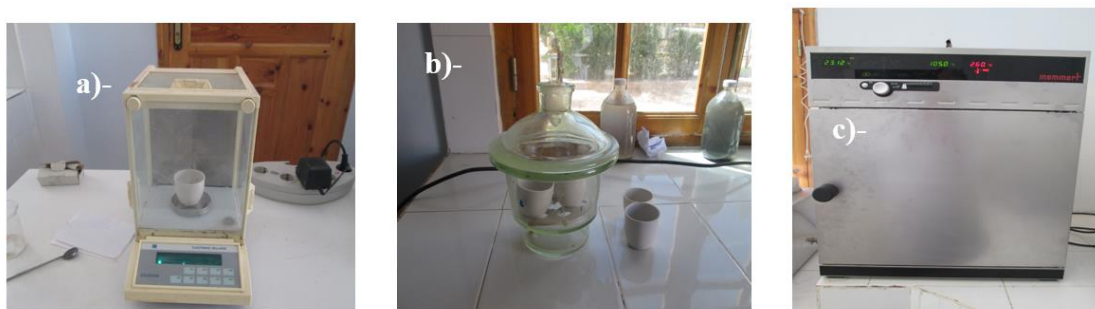


Photo 5: a) Balance de précision, b)- Dessiccateur, c)- Etuve

La teneur en matière organique et minérale

La matière minérale correspond au résidu obtenu après incinération d'1g de chaque échantillon sec dans un four à moufle à 550°C pendant 6 heures. La perte de poids correspond à la matière organique et le résidu aux cendres.



Photo 6: Four a moufle

b- Le pH

Le pH est un facteur facilement mesurable et le plus important pour le processus de méthanisation, il donne une idée sur l'acidité ou l'alcalinité du milieu, en outre, les

microorganismes ne peuvent se développer (fonctionner) que dans une plage spécifique de pH.



Photo 7: le pH-mètre

c- La détermination du titre alcalimétrique complet (TAC) [61] :

Le titre alcalimétrique complet permet de connaître les doses de carbonates d'hydroxydes et d'hydrogencarbonates alcalins ou alcalino-terreux, responsables du pouvoir tampon du fermenteur vis-à-vis des acides organiques et acides gras volatils.

Cette alcalinité permet au pH de rester aux alentours de la neutralité malgré la présence d'acides.

Méthode :

1- A l'aide d'une burette au 1/10 ml, verser H₂SO₄ 0,1 N jusqu'à pH = 4, soit V ml

$$TAC = \frac{V \times 0,1 \times 1000}{25}$$

$$= V \times 4, \text{ en meq.l-1}$$

Ou :

$$TAC = V \times 4 \times 0,05, \text{ en g.l-1 de CaCO}_3$$

d- La détermination des acides gras volatils (AGV) [62] :

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

Méthode :

- 1- On verse ensuite H₂SO₄ 0,1 N jusqu'à pH=3,5. Faire alors bouillir le liquide à pH=3,5 pendant 3 minutes exactement. Laisser refroidir.
- 2- Porter le liquide refroidi sous les électrodes du ph-mètre et verser sous agitation avec une burette au 1/10 NaOH 0,1 N jusqu'à pH=4, soit V₂ le volume obtenu.
- 3- Continuer à verser jusqu'à pH=7 et soit V₃ le nouveau volume.

$$\boxed{\text{Acidité volatile} = \frac{(V_3 - V_2) \times 0,1 \times 1000}{25}}$$

$$= (V_3 - V_2) \times 4, \text{ en meq.l}^{-1}$$

Ou :

$$\text{Acidité volatile} = (V_3 - V_2) \times 4 \times 0,06, \text{ en g.l}^{-1}$$

D'acide acétique.

Calculer AGV/TAC

il faut qu'il soit < 0,5

e- L'inflammabilité du gaz :

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 est soumis à une flamme discontinue d'un briquet.



CHAPITRE IV: RESULTATS ET DISCUSSIONS

IV. RESULTATS ET DISCUSSIONS

IV.1 Première partie : la fermentation alcoolique de déchet des dattes

IV.1.1 Caractérisation du substrat utilisé :

Les principales caractéristiques physico-chimique du substrat utilisé dans cette étude, sont présentées dans le tableau suivant :

substrat utilisé	Déchet des dattes (hmira)
Matière sèche (%)	92.00
Matière organique (%)	97.36

Tableau 5: caractéristiques des substrats avant la fermentation

IV.1.2 Evolution des paramètres de fonctionnement :

a- Evolution du sucre et le degré alcoolique :

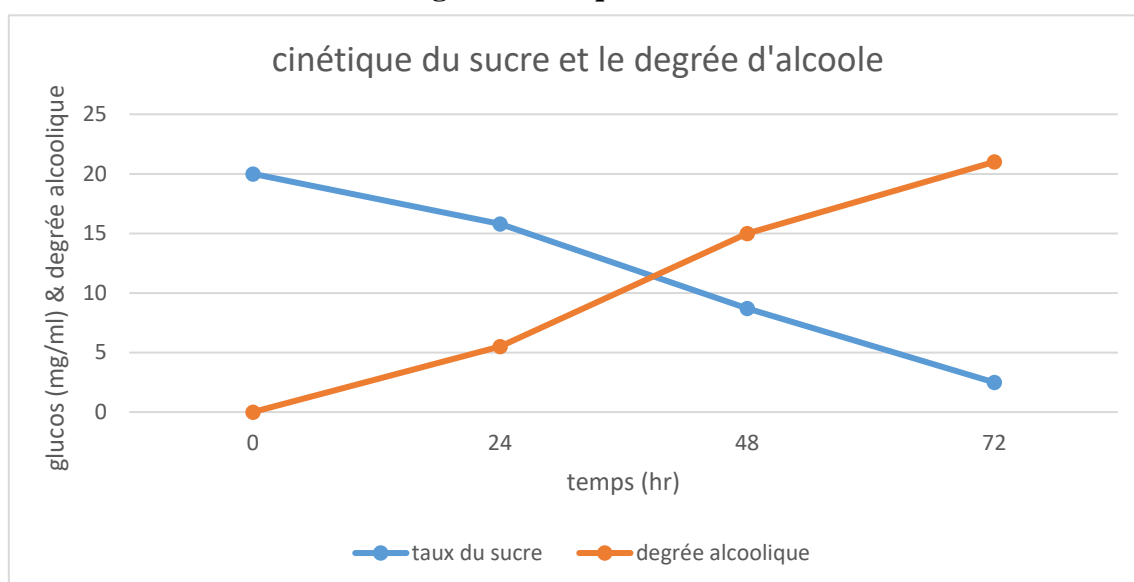


Figure 12: La cinétique du sucre et le degré d'alcoole

On observe aussi sur la figure 12 que le glucose est diminué mais n'a pas été consommé totalement par la levure, cela peut être dû à l'arrêt de la croissance du *Saccharomyces cerevisiae* par accumulation des substances toxiques [63] et [64], ce qui indique que les acides gras, en particulier l'acide octanoïque et l'acide décanoïque, formés par les levures à la concentration de quelques milligrammes par litre, deviennent toxique pour cette dernière, aussi l'effet glucose et l'alcool dans le milieu devient inhibiteur.

Après la distillation l'alcool produit au niveau du laboratoire a les caractéristiques

suivantes: volatil, inflammable, limpide et possédant une odeur piquante et amélioré jusqu'à 92° 93°.



Photo 8: L'inflammabilité du bioalcool après la distillation

IV.2 Deuxième partie : digestion anaérobie de déchet des dattes

IV.2.1 Caractérisation du substrat utilisé :

Les principales caractéristiques physico-chimique du substrat utilisé dans cette étude, sont présentées dans le tableau suivant :

substrat utilisé	La pâte des dattes (hmira)
Matière sèche (%)	12.32
Matière organique (%)	93.83
PH	6.78

Tableau 6: caractéristiques du substrat avant la digestion

IV.2.2 Evolution des paramètres de fonctionnement :

a- Evolution du pH :

D'après cette figure, nous avons constaté qu'il avait une chute de pH de 6,78 jusqu'à une valeur minimale proche de 6,25. Cette chute est expliquée par la dégradation de la matière organique et la formation des acides organiques et les acides gras volatils.

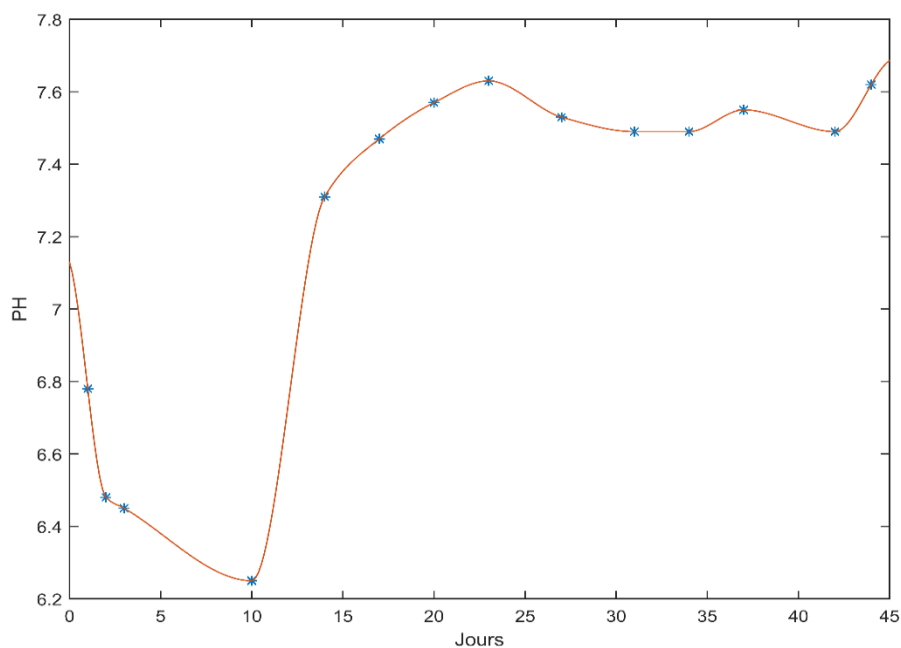


Figure 13 : Evolution du pH au niveau de digesteur en fonction du temps.

b- Evolution du DCO

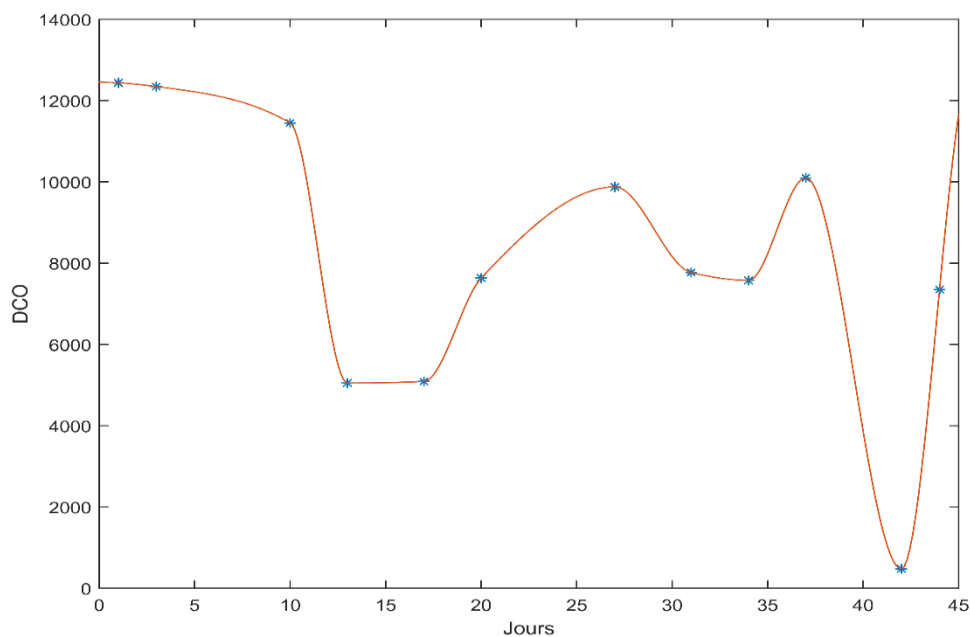


Figure 14 : Evolution de la DCO en fonction du temps.

La figure montre clairement qu'il y a une réduction de la charge organique, cela est bien illustré par la diminution de la demande chimique en oxygène (DCO).

Les mêmes ordres de grandeur ont été rapportés par Yacob *et al.* [65] et Parawira [66].

c- Evolution des AGV

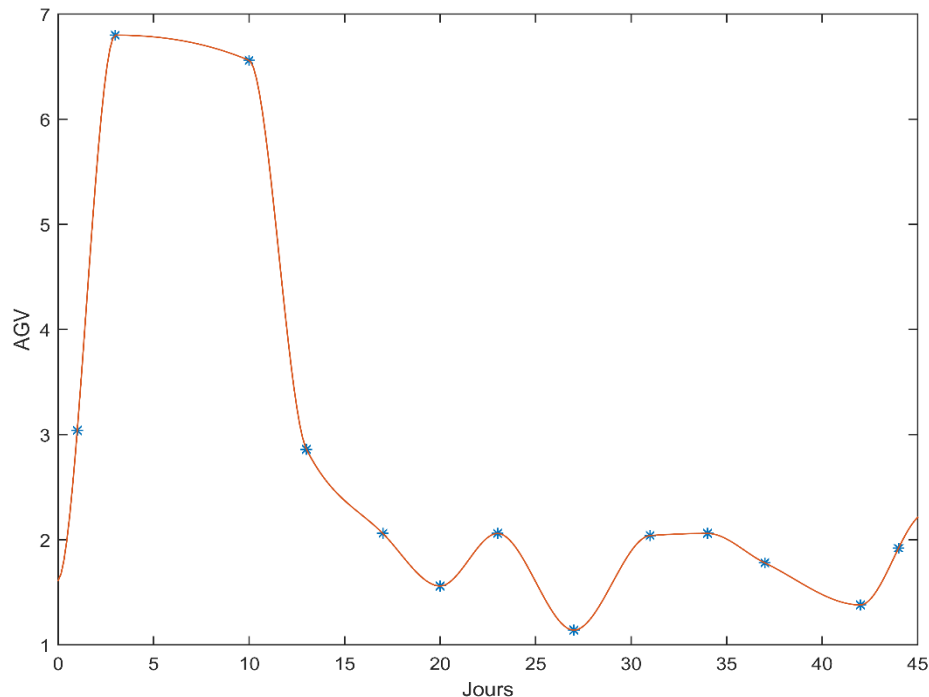


Figure 15: Evolution des AGV en fonction du temps

La concentration en acides gras volatils (AGV) est un paramètre caractéristique des premières phases de la méthanisation et le suivi de son évolution permet d'estimer l'état de dégradation du substrat, et la variation de leur concentration dans le milieu affecte directement l'alcalinité et la valeur du pH du milieu.

De nombreuses observations liées à la digestion anaérobie suggèrent que les acides gras volatils (AGV), comme l'un des paramètres les plus importants pour le contrôle précis de la digestion anaérobie, ont une corrélation directe avec la performance du digesteur.

Comme on peut le voir sur la figure 15 les valeurs des AGV augmentent à 6,8.

Cette phase de la production des AGV correspond à la phase "hydrolyse acidogène" [67]. Après cette augmentation, soit une diminution des AGV a été observée, qui est due à la consommation des AGV par des bactéries qui correspondent à la phase "d'acétogène".

d- Evolution du volume de biogaz et le biogaz Cumulé

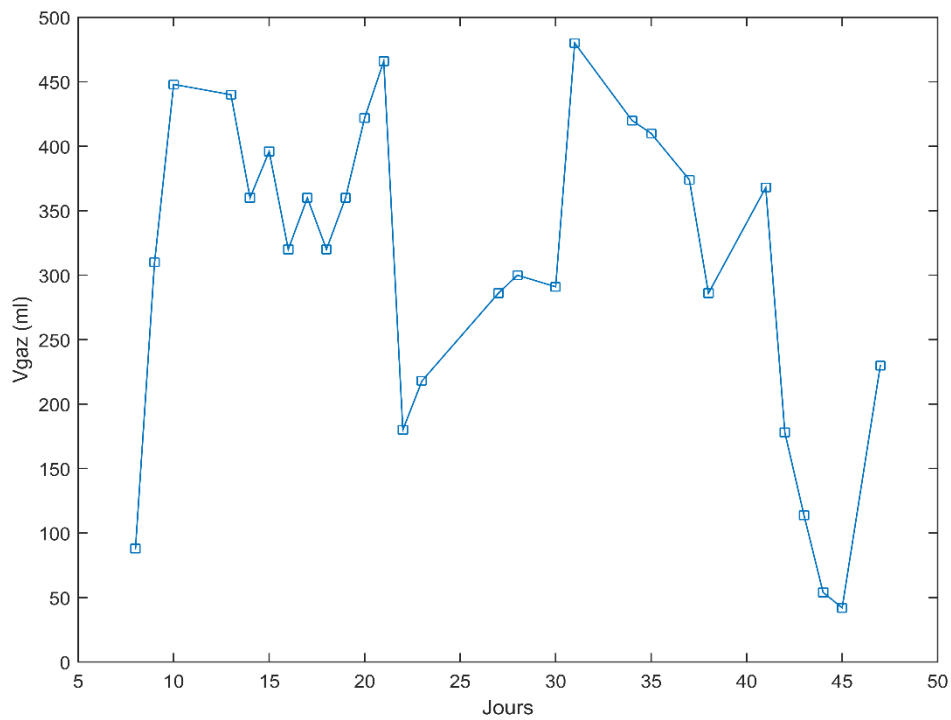


Figure 16 : évolution du volume de biogaz en fonction du temps.

La production du biogaz a été mise en évidence par la mesure du volume du gaz formé. D’après la figure 16, nous avons constaté que la phase méthanogènes ce déclenche dès les 8eme jours du lancement de l’expérience.

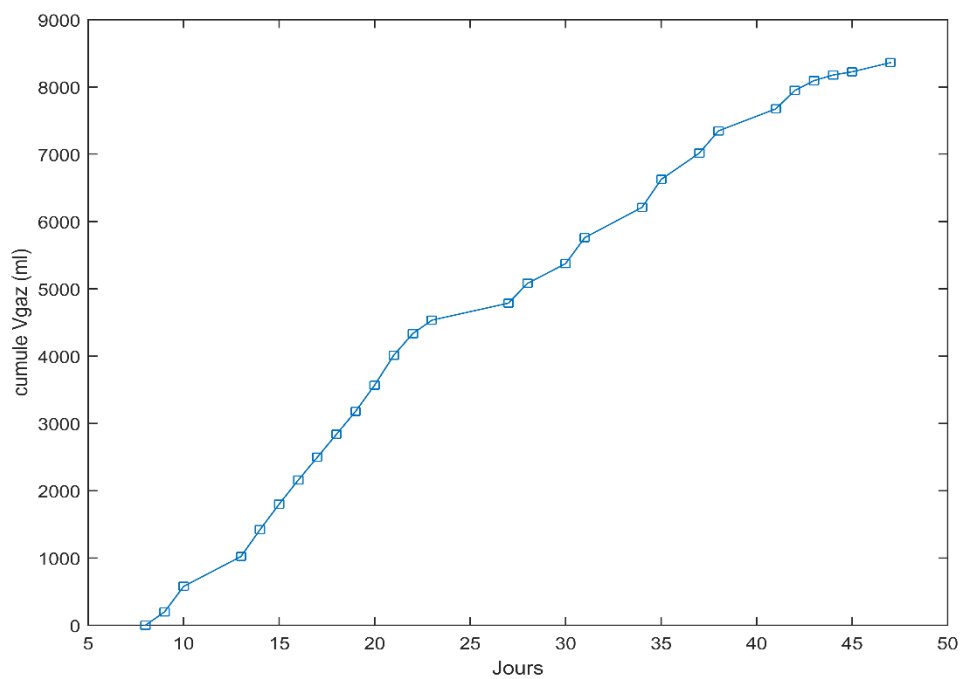


Figure 17 : La cumule de biogaz

D'après cette figure 17 on peut constater que les déchets produisent un volume total de 8521 ml durant 47 jours

IV.2.3 Caractérisation du substrat après la digestion

substrat après la digestion	La pâte des dattes (hmira)
Matière sèche (%)	1.2
Matière organique (%)	51.07
pH	6.62
Rendement de gaz (ml/g)de MO	247.25

Tableau 7: caractéristiques du substrat après la digestion

D'après le tableau 7 la masse transformée à 51,07 g de MO et les volumes de biogaz total produit durant la méthanisation est égal à 8521 ml. Donc on aboutit un rendement de 247,25 ml/g de MO.



CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale

D'après les résultats que nous avons obtenus expérimentalement, nous permettent de constater les points suivants :

Les substrats utilisés (déchets des dattes Hmira) peuvent devenir énergétiquement intéressant.

Pour le processus de **fermentation**:

- Les déchets des dattes riches en sucre, constituent un substrat favorable pour le lancement de fermentation (la mise en marche), car ils sont facilement biodégradable et permet une production du bioéthanol sur les normes.
- L'évolution du sucre et le degré alcoolique était un paramètre déterminant afin de suivre l'activité de la levure.
- Le rendement en bioéthanol (92°) produit est de 360 ml/kg de déchets des dattes (Hmira).

Pour le processus de **digestion anaérobie** :

- L'évolution du pH était un paramètre déterminant afin de suivre les différentes étapes de biométhanisation.
- Le début de la production des AGV et leurs accumulations dans le milieu provoque une acidification, c'est-à-dire l'évolution du pH vers des valeurs acides et aussi une production du biogaz presque nulle.
- La production du méthane à bien commencée depuis le 8eme jour de la digestion anaérobie.
- Le rendement en biogaz produit est de 247,25 ml/g de matière organique de déchets des dattes fermenté.

Alors nous avons prouvé que nous pouvions bénéficier une double valorisation à partir une même substrat, donc une source d'énergie renouvelable considérable. Cela ouvre un large champ de recherche pour plus d'exploitation des matières les plus fermentés utilisés dans le monde (canne à sucre, maïs...).



REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

Reference Bibliographique

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] [E.M. Messar, '*Le Secteur Phoenicicole Algérien – Situation et Perspectives à l'Horizon 2010*', Proceedings du Séminaire Méditerranéen: Le Palmier Dattier dans l'Agriculture d'Oasis des Pays Méditerranéens. Options Méditerranéennes, N°28, 1996.]
- [2] [F. Kaidi et A. Touzi, '*Production de Bioalcool à Partir des Déchets de Dattes*', Revue des Energies Renouvelables, NS: Biomasse Production et Valorisation, pp. 75 – 78, Alger 20-21 juin 2001]
- [3] [A. Touzi, '*Valorisation des Produits et Sous-produits de la Datte par les Procédés Biotechnologiques*', Proceedings du Séminaire Méditerranéen : Le Palmier Dattier dans l'Agriculture d'Oasis des Pays Méditerranéens. Options Méditerranéennes, N°28, 1996.]
- [4] [Scragg Alan.H, '*bio fuels Production, application and développement*', CAB International 2009]
- [5] [Poitrat. E, '*les biocarburants en France et en Europe (ADEM)*', Lyon 2005]
- [6] [Colonna Pau, '*la chimie verte*', Edition TEC et DOC 2006]
- [7] [Sall Hamath, '*programme spécial biocarburant*', Nouvelle Orientation De La Politique agricole 2007]
- [8] [Ballerini Daniel, '*les Biocarburants état des lieux, perspectives et enjeux du développement*', IFP publications, Editions TECHNIP 2006]
- [9] [Ndiaye Doudou, '*le monde dans l'ère des biocarburants, définition, enjeux et facteurs de succès pour l'Afrique*', AGROVISION No4 2007]
- [10] [Touati Lounis, '*Valorisation des grignons d'olive Etude de cas: Essai de valorisation en Biocarburant*', magister 2013]
- [11] [A. Boulal*, B. Benali, M. Moulai et A. Touzi, '*Transformation des déchets de dattes de la région d'Adrar en bioéthanol*', Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°3 (2010) 455 – 463]
- [12] [Yong, Zihan, Yulin Dong, Xu Zhang et Tianwei Tan, '*Anaerobic co-digestion of food waste and straw for biogas production*', Renewable Energy, vol. 78, p. 527-530 2015]
- [13] [Cresson, R, R Escudie, H Carrere, JP Delgenes et N Bernet, '*Démarrage de procédés intensifs de méthanisation et formation du biofilm*', Montpellier, 44 p 2006]
- [14] [Lachance, Marie-Pier, Frédéric Pelletier, Stéphane Lemay et P Eng 2010, '*Développer un cadre d'analyse et identifier l'intérêt technico-économique de produire du biogaz à la ferme dans un contexte québécois*',]
- [15] [Ostrem, Karena. 2004, '*Greening Waste: Anaerobic digestion for treating the organic*

Reference Bibliographique

fraction of municipal solid wastes', Columbia University]

[16] [Zaher, U., Cheong, D-Y., Wu, B. et Chen S. 2007, '*Producing energy and fertilizer from organic municipal solid waste*', Washington State University]

[17] [Juanga, Jeanger P. 2005, '*Optimizing dry anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste*', Asian Institute of Technology]

[18] [Mumme, Jan, Bernd Linke et Rainer Tolle. 2010, '*Novel upflow anaerobic solid-state (UASS) reactor*', *Bioresource Technology*, vol. 101, n° 2, p. 592-599]

[19] [Moletta, René. 2011, '*Le traitement des déchets*', Éd. Tec & Doc/Lavoisier]

[20] [Olivier, Franck. 2003, '*Tassement des déchets en CSD de classe II: du site au modèle*', Université Joseph-Fourier-Grenoble I]

[21] [Kothari, Richa, AK Pandey, S Kumar, VV Tyagi et SK Tyagi. 2014b, '*Different aspects of dry anaerobic digestion for bio-energy: An overview*', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 39, p. 174-195]

[22] [Montero, B., J. L. Garcia-Morales, D. Sales et R. Solera. 2008, '*Evolution of microorganisms in thermophilic-dry anaerobic digestion*', *Bioresource Technology*, vol. 99, n° 8, p. 3233-3243]

[23] [Horiuchi, J. I., T. Shimizu, K. Tada, T. Kanno et M. Kobayashi. 2002, '*Selective production of organic acids in anaerobic acid reactor by pH control*', *Bioresource Technology*, vol. 82, n° 3, p. 209-213]

[24] [Damien, Alain. 2004, '*Guide du traitement des déchets*']

[25] [Moletta, René, et Willy Verstraete. 2011, '*La méthanisation dans la problématique énergétique et environnementale*', *La méthanisation* (2e ed.), p. 1]

[26] [De La Farge, Bertran. 1995, '*Le biogaz : procédés de fermentation méthanique*']

[27] [Balet, Jean-Michel, '*Gestion des déchets : aide-mémoire* 2004]

[28] [Liu, Dawei, Dapeng Liu, Raymond J. Zeng et Iriani Angelidaki. 2006, '*Hydrogen and methane production from household solid waste in the two-stage fermentation process*', *Water Research*, vol. 40, n° 11, p. 2230-2236]

[29] [Moletta, René. 2008, '*Méthanisation de la biomasse*', *Techniques de l'ingénieur. Bioprocédés*, n° BIO5100]

[30] [Tchobanoglous, George, Hilary Theisen et Samuel Vigil. 1993, '*Integrated solid waste management: engineering principles and management issues*', McGraw-Hill, Inc]

[31] [Shelton, Daniel R, et James M Tiedje. 1984, '*General method for determining anaerobic biodegradation potential*', *Applied and environmental microbiology*, vol. 47, n° 4, p.850-857]

Reference Bibliographique

- [32] [Kamali, Mohammadreza, Tânia Gameiro, Maria Elisabete V Costa et Isabel Capela. 2016, '*Anaerobic digestion of pulp and paper mill wastes—An overview of the developments and improvement opportunities*', *Chemical Engineering Journal*, vol. 298, p. 162-182]
- [33] [Donoso-Bravo, A, S I Pérez-Elvira et F Fdz-Polanco. 2010, '*Application of simplified models for anaerobic biodegradability tests. Evaluation of pre-treatment processes*', *Chemical Engineering Journal*, vol. 160, n° 2, p. 607-614]
- [34] [Donoso-Bravo, Andres, Johan Mailier, Cristina Martin, Jorge Rodriguez, Cesar Arturo Aceves-Lara et Alain Vande Wouwer. 2011, '*Model selection, identification and validation in anaerobic digestion: A review*', *Water Research*, vol. 45, n° 17, p. 5347- 5364]
- [35] [Amarante, João Alberto Lima, '*biométhanisation des déchets putrescibles municipaux—technologies disponibles et enjeux pour le québec* ». Université de sherbrooke, 99 p 2010]
- [36] [Perron, Francois. 2010, '*Potentiel énergétique et gains environnementaux générés par la biométhanisation des matieres organiques résiduelles au québec*',]
- [37] [Mao, Chunlan, Yongzhong Feng, Xiaojiao Wang et Guangxin Ren. 2015, '*Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion*', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 45, p. 540-555]
- [38] [Vandevivere, P, L De Baere et W Verstraete. 2002, '*Types of anaerobic digester for solid Wastes*',]
- [39] [Batstone, Damien J, Peter Frode Pind et Irini Angelidaki, '*Kinetics of thermophilic, anaerobic oxidation of straight and branched chain butyrate and valerate*', *Biotechnology and Bioengineering*, vol. 84, n° 2, p. 195-204 2003]
- [40] [Mata-Alvarez, J, S Macé et P Llabrés. 2000, '*Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives*', *Bioresource Technology*, vol.74, n° 1, p. 3-16]
- [41] [Marchaim, Uri. 1992, '*Biogas processes for sustainable development*', *Food & Agriculture Org.* 95-96]
- [42] [Batstone, Damien J, J Keller, Irini Angelidaki, SV Kalyuzhnyi, SG Pavlostathis, A Rozzi, WTM Sanders, H Siegrist et VA Vavilin, '*The IWA Anaerobic Digestion Model No 1(ADM 1)* ', *Water Science & Technology*, vol. 45, n° 10, p. 65-73 2002]
- [43] [Muha, Ivo, Simon Zielonka, Andreas Lemmer, Mandy Schonberg, Bernd Linke, Alfio Grillo et Gabriel Wittum. 2013, '*Do two-phase biogas plants separate anaerobic digestion phases? - A mathematical model for the distribution of anaerobic digestion phases among reactor stages*',]

Reference Bibliographique

- [44] Xie, S, Y Ma, PJ Strong et WP Clarke. 2015,'*Fluctuation of dissolved heavy metal concentrations in the leachate from anaerobic digestion of municipal solid waste in commercial scale landfill bioreactors: the effect of pH and associated mechanisms*', Journal of hazardous materials, vol. 299, p. 577-583]
- [45] [Dai, Xiaohu, Xiaoshuai Li, Dong Zhang, Yinguang Chen et Lingling Dai. 2016,'*Simultaneous enhancement of methane production and methane content in biogas from waste activated sludge and perennial ryegrass anaerobic co-digestion: The effects of pH and C/N ratio*', Bioresource technology, vol. 216, p. 323-330]
- [46] [Pullammanappallil, Pratap C, David P Chynoweth, Gerasimos Lyberatos et Spyros A Svoronos. 2001,'*Stable performance of anaerobic digestion in the presence of a high concentration of propionic acid*', Bioresource technology, vol. 78, n° 2, p. 165-169]
- [47] [Lacour, Joaneson. 2012 ,'*Valorisation de la fraction organique de résidus agricoles et autres déchets assimilés à l'aide de traitements biologiques anaérobies*', INSA de Lyon]
- [48] [Chen, Ye, Jay J Cheng et Kurt S Creamer. 2008,'*Inhibition of anaerobic digestion process: a review* ', Bioresource technology, vol. 99, n° 10, p. 4044-4064]
- [49] [Liu, T, et S Sung. 2002,'*Ammonia inhibition on thermophilic aceticlastic methanogens* ', Water Science & Technology, vol. 45, n° 10, p. 113-120]
- [50] [Yenigün, Orhan, et Burak Demirel. 2013,'*Ammonia inhibition in anaerobic digestion: a Review*', Process Biochemistry, vol. 48, n° 5, p. 901-911]
- [51] [Mata-Álvarez, Juan. 2003,'*Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes*', International Water Assn]
- [52] [Rakotoniaina, Volana Astérie. 2012,'*Co-methanisation des déchets fermiers et alimentaires: expérimentation et modélisation*'],]
- [53] [M.D. Ould El Hadj, '*Etude Comparative de la Productivité d'Alcool Brut de Dattes selon les Variétés*', Recherche Agronomique, N°9, pp. 91 – 99, Institut National de la Recherche Agronomique, Algérie, 2001.]
- [54] [D. Fabienne, '*Génie Fermentaire*', Edition Doin Editeurs, pp. 226 - 229, Paris, 1991.]
- [55] [C.L. Audigie, J. Figarella et F. Zonszain, '*Manuel d'Analyses Biochimiques*', 270 p., Ed. Doin, Paris, 1980.]
- [56] [D.J. Nadhim, '*Production d'Ethanol à partir des Sucres de Dattes*', Séminaire sur les Dattes, pp. 115 – 130, 4-5 Décembre, Bagdad, Irak, 1982.]
- [57] [T. Mandal and N.K. Mandal, '*Comparative Study of Biogas Production from Different Waste Materials*', *Energy Conversion and Management*, Vol. 38, N°7, pp. 679 – 683, 1997]

Reference Bibliographique

- [58] [M. Henze and P Harremoes, '*Anaerobic Treatment of Wastewater in Fixed Film Reactors - a Literature Review*', Water Science and Technology, Vol. 15, pp. 91 – 101, 1983.]
- [59] [T. Chaslerie, '*Techniques de Bioconversion: la Biométhanisation*', Rapport, IUT, 2002.]
- [60] [A. Serine, '*Etude des prétraitements microbiologiques des résidus agro-alimentaires lignocellulosiques en vue de leur valorisation en alimentation animale*', Thèse de Magister, Université Mentouri, Constantine, 2010]
- [61] [A. Sow, '*Contribution à la conduite de la méthanisation dans des bioréacteurs a filmmix fonctionnant à forts taux de charge*', Thèse de Doctorat, Ecole Centrale, Paris, 1990.]
- [62] [C. Berthe, '*Etude de la matière organique contenue dans des lixiviats issus de différentes filières de traitement des déchets ménagers et assimilés*', Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences et Techniques, Limoges, 2006.]
- [63] [A. Meyer, '*Cours de Microbiologie Générale*', Ed. Doin Editeurs, 1988.]
- [64] [A. Sasson, '*Nourrir Demain les Hommes*', 765 p., Ed. UNESCO, Pays Bas, 1986.]
- [65] [S. Yacob, Y. Shirai, M.A. Hassan, M. Wakisaka and S. Subash, '*Start-up Operation of Semi-Commercial Closed Anaerobic Digester for Palm Oil Mill Effluent Treatment*', Process Biochemistry, Vol. 41, N°4, pp. 962 – 964, 2006.]
- [66] [W. Parawira, M. Murto, R. Zvauya and B. Mattiasson, '*Comparative Performance of a UASB Reactor and an Anaerobic Packed-Bed Reactor when Treating Potato Waste Leachate*', Renewable Energy, Vol. 31, N°6, pp. 893 – 903, 2006.]
- [67] [Rasi S, Seppl M, Rintala J. *Organic silicon compounds in biogases produced from grass silage, grass and maize in laboratory batch assays*. Energy. 2013; 52 :137-142]

الخلاصة

خلال السنوات الماضية شهد الإيثانول الحيوي و الغاز الحيوي تطوراً ملحوظاً، وهما عبارة عن وقود يتم الحصول عليهما من خلال تخمر النباتات السكرية و الهضم اللاهوائي للمركبات العضوية على التوالي، كما أن إنتاجها يؤدي إلى التقليل من انبعاث الغازات المسببة للاحتباس الحراري .
في هذا العمل قمنا بإنتاج الإيثانول الحيوي إنطلاقاً من التمر غير صالح للاستهلاك، ثم استعملنا البقايا الناتجة من التخمر في إنتاج الغاز الحيوي عن طريق عملية الهضم اللاهوائي.
تحصلنا على مردود يساوي 360 مل من الإيثانول الحيوي 92° بالنسبة لـ 1 كغ من التمر غير صالح للاستهلاك، و 247,25 مل من الغاز الحيوي بالنسبة لـ 1 غ من المادة العضوية .
الكلمات المفتاحية : التمر غير قابل للاستهلاك، الإيثانول الحيوي، الغاز الحيوي، التخمر، الهضم اللاهوائي.

Résumé

Durant les années passé, le bioéthanol et le biogaz ont connus un développement remarquable sont des carburants obtenus à partir de la fermentation des plants sucrier et la digestion anaérobie des composés organique respectivement, L'avantage majeur de ces biocarburants c'est la diminution des gaz à effet de serre.

Dans ce travail, nous nous somme intéressé a la production du bioéthanol a partir des déchets de datte, ensuit nous avons utilisé la patte des déchets de datte fermenté pour la production du biogaz par la procédé de la digestion anaérobie.

Nous avons obtenu on rendement de 360 ml de bioéthanol de 92° pour 1 kg de datte, et 247,25 ml de biogaz pour 1gr de matière organique.

Mots clés : déchet de datte, fermentation, digestion anaérobie, biogaz, bioéthanol.

Resume

During the past years, bioethanol and biogas have a significant development, they are fuels obtained from the fermentation of sugar plants and anaerobic digestion of organic compounds respectively, The major advantage of these biofuels is the reduction of gases Global Warming effect.

In this work, we are interested in the production of bioethanol from date waste, then we used the residues from fermentation in the production of biogas through anaerobic digestion.

We obtained a yield of 360 ml of bioethanol of 92 ° for 1 kg of date, and 247,25 ml of biogas for 1 gr of organic matter.

Key words: date waste, fermentation, anaerobic digestion, biogas, bioethanol.