



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique
Université de Blida1
Département des énergies renouvelables



MEMOIRE DE MASTER
Spécialité : Energies renouvelables.
Option : Habitat bioclimatique.

**Valorisation énergétique des macroalgues
sahariennes d'eau douce par Co-fermentation
alcoolique avec les palmes sèches de palmier dattier
(*Phoenix dactylifera* L) de la variété *H'mira***

Présenter par :

✓ **BOURAOUI MUSTAPHA ELBACHIR**

Devant le jury composé de :

- Pr Hamid A/Elkader.....Président.
- Mme Guebli wassila.....Examineur.
- Dr Djaafri Mohammedpromoteur
- Mme FERRADJI F/Z.....Co promotrice.

Blida, Septembre 2021

Remercient

En premier lieu, nous exprimons nos profonds remerciements au DIEU « **Allah** » le tout-puissant pour la force, le courage et la volonté pour accomplir ce travail.

Nous tenons à remercier nos familles, pour le soutien continu qu'elle m'a apporté tout aux longs de ces années d'études.

Nous tenons à exprimer ma très grande considération et ma vive reconnaissance à Mes encadreurs Monsieur le Docteur Djaafri Mohammed Maître de recherche au niveau de l'URER.MS d'Adrar et Mme Docteur Ferradji enseignante au niveau de l'université de blida1 au département des énergies renouvelables, pour leur patience, ses précieux conseils, suivi et orientation toute au long de ce projet de fin d'étude.

Nous exprimons nos profonds remerciements à tous les membres de l'équipe bioconversion de l'URERMS d'Adrar et surtout Dr. Kaidi Kamel, Mme Bella S. Melle Salem F. Mr. Djaber Abdelkrim et Mr. Khellafi Mostefa.

Nos remerciements sont adressés aussi à Mr. Dr. Mouhadjer Samir Directeur de l'URERMS. D'Adrar, Mr Dr. Laarbi Amine Directeur de division DCTT au niveau de l'URERMS d'Adrar et à tous les responsables, les chercheurs et les personnels de l'URERMS d'Adrar.

Nous tenons à remercier Monsieur Professeur HAMID.A président de la spécialité énergie renouvelable et habitat bioclimatique à l'université de Blida1.

Nous adressons également nos plus vifs remerciements aux membres de jury pour avoir examiné avec attention ce travail.

Nos sentiments de reconnaissance et nos remerciements vont également à toute personne qui a participé de près ou de loin, directement ou indirectement à la réalisation de ce travail.

DEDICASE

JE REMERCIE TOUT D'ABORD ALLAH DE
M'AVOIR

AIDÉ À RÉALISER CE TRAVAIL

JE DÉDIE CE MODESTE TRAVAIL À MES
TRÈS

CHERS PARENTS À MES FRÈRES ET MES
SŒURS

À TOUTE MA FAMILLE

À MES AMIS ET MES COLLÈGUES DE LA
PROMOTION À TOUTE PERSONNE QUI ME
CONNAÎT

À CELUI QUI M'À ENCOURAGÉ ET
SOUTENU DANS MES MOMENTS LES
PLUS DIFFICILES

ملخص:

تمثل الطحالب الكبيرة في المياه العذبة الصحراوية مصدراً هاماً للكتلة الحيوية المتجددة. يتم استغلال هذه الكتلة الحيوية بشكل سيئ للغاية محلياً على الرغم من وفرتها وهذه المزايا. كما أن نفايات اللجنوسليلوز التي تنتج سنوياً عن طريق نخيل التمر (*Phoenix dactylifera L.*) تشكل مورداً متجدداً هاماً للكتلة الحيوية الصحراوية. يهدف هذا العمل إلى دراسة استرجاع الطاقة من الطحالب الكبيرة في المياه العذبة الصحراوية بتقنية التخمير الكحولي المشترك مع النخيل الجاف لنخيل التمر (*Phoenix dactylifera L.*) من صنف H'mira من أجل إنتاج وقود حيوي نظيف وهو الإيثانول الحيوي. يمكن استخدام هذا الأخير "كوقود حيوي" مخصص لمحركات البنزين أو في مستحضرات التجميل أو حتى الأدوية والورنيش والمواد اللاصقة والدهانات.

وبعد ان قمنا بعملية التخمير والتقطير فمضى بإنتاج هذا النوع من الوقود بدرجة 7 و pH الذي يساوي 3.5 وحجم يساوي 100 مل بعد ذلك قمنا بالبحث عن مولد كهربائي يعمل بالبيوإيثانول.

الكلمات المفتاحية: الإيثانول الحيوي، الكتلة الحيوية الطحلبية، التخمير الكحولي، النخيل الجاف، نخيل التمر، صنف حميرة.

Résumé :

Les macroalgues dans l'eau douce du désert représentent une source importante de biomasse renouvelable. Cette biomasse est très mal exploitée localement malgré son abondance et ces avantages. Les déchets de lignocellulose produits annuellement par le palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*) constituent une ressource renouvelable importante pour la biomasse du désert. Ce travail vise à étudier la valorisation énergétique des macroalgues dans les eaux douces du désert en utilisant la technique de co-fermentation par fermentation alcoolique avec le palmier dattier sec (*Phoenix dactylifera L.*) du cultivar H'mira afin de produire un biocarburant propre, le bioéthanol. Ce dernier peut être utilisé comme « biocarburant » destiné aux moteurs à essence ou dans les cosmétiques, ou encore les médicaments, les vernis, les colles et les peintures.

Après avoir fait la fermentation et la distillation, j'ai pu produire ce type de carburant avec un degré de 7, un pH de 3,5 et un volume de 100 ml, puis j'ai cherché un générateur électrique qui fonctionne au bioéthanol.

Mots clés : bioéthanol, biomasse algale, fermentation alcoolique, palmier sec, palmier dattier, cultivar Humira.

Abstract:

Abstract: Macroalgae in desert freshwater represent an important source of renewable biomass. This biomass is very poorly exploited locally despite its abundance and these advantages. The lignocellulose waste produced annually by the date palm (*Phoenix dactylifera* L.) constitutes an important renewable resource for desert biomass. This work aims to study the energy recovery of macroalgae in fresh desert water using alcoholic fermentation co-fermentation technique with dry date palm (*Phoenix dactylifera* L.) of H'mira cultivar in order to produce a clean biofuel, bioethanol. The latter can be used as a "biofuel" intended for gasoline engines or in cosmetics, or even medicines, varnishes, adhesives and paints.

After we did the fermentation and distillation process, I could produce this type of fuel with a degree of 7, a pH of 3.5 and a volume of 100 ml. Then I searched for an electric generator that works with bioethanol.

Key words: bioethanol, algal biomass, alcoholic fermentation, dry palm, date palm, Humira cultivar.

Abréviations :

Bio-ETBE : bio-Ethyle- tertio-butyl-éter

Bio-DME : bio-diméthyléter

Bio-MTBE : bio-Méthyl-tertio-butylether

CE : Comité Européenne

CO₂ : Dioxyde de Carbone

°C : Degré Celsius

DSA: Direction des Services Agricoles

DME : Diméthyléter

ETBE :Ethyl-Tertio-Butyl-Ether

EMHV : Ester Méthylique d'Huile
Végétale

L: Litre

O : Oxygène

pH : Potentiel d'Hydrogène

T :température

V : Volume

INRAA : Institut National de la
Recherche Agronomique d'Algérie

g : gramme.

ml : millilitre.

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1. Photo de macroalgue	3
Figure 1.2. Photo de micro algue	4
Figure 1.3. Les grands groupes des macroalgues	6
Figure 1.4: Productivité en huile des microalgues par rapport à d'autres plantes oléagineuses	7
Figure 2.1: Biocarburants de première génération	10
Figure 2.2: Biocarburants de deuxième génération	11
Figure 2.3: Biocarburants de troisième génération	12
Figure 2.4 : Structure de la molécule d'éthanol	15
Figure 2.5: Distribution de la production mondiale de bioéthanol	17
Figure 2.6 : Utilisation potentielle du bioéthanol	18
Figure 3.1. Répartition de la production de dattes dans la Wilaya d'Adrar	23
Figure 3.2. Palmier dattier (palmes sèche)	24
Figure 3.3 : macroalgue d'eau douce « bassin ».	25
Figure 3.4 : broyage macroalgue et palme sèche	26
Figure 3.5. Préparation des dilutions	26
Figure 3.6. Prétraitement à la vapeur	27
Figure 3.7. Ajustement pH du moût	27
Figure 3.8. Réactivation de la levure	28
Figure 3.9. Dispositif expérimental de la fermentation alcoolique	29
Figure 3.10: Filtration de moût fermenté.	29
Figure 3.11: Montage de la distillation alcoolique	30
Figure 4.1: Evolution de pH lors d'une fermentation alcoolique.	31
Figure 4.2. Evolution du degré alcoolique pendant la fermentation	32
Figure 4.3. Evolution du degré alcoolique pendant la fermentation.	32
Figure 4.4. Evolution de la densité en fonction du temps de fermentation.	33
Figure 4.5. Extrait de bioéthanol	35

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Différentes générations de biocarburants et les procédés de transformation pour chaque génération	13
Tableau 2.2 : Propriétés physiques et chimique de l'éthanol	15
Tableau 2.3 : Avantages et les inconvénients du bioéthanol	19
Tableau 3.1 : Statistique de production de palmier dattier en Adrar	23
Tableau 4.1 : les résultats finaux	34

SOMMAIRE

Remerciement.	
Dédicace.	
Résumé.	
Abréviations	
Liste des figures.	
Liste des Tableaux.	
Introduction générale	1
• Chapitre 01 : Généralité sur la biomasse.	
1.1 Introduction	3
1.2. Définition des macroalgues	3
1.3 Définition des microalgues	4
1.4 Les grands groupes des macroalgues	4
1.5 La biomasse algale pour la production de la bioénergie	6
1.6 Production de bioéthanol	6
1.7 Production de biodiésel	6
1.8 Production de bio hydrogène	7
1.9 Production de Le biométhane	8
1.10 Conclusion	8
• Chapitre 02: Biocarburant.	
2.1 Introduction	9
2.2 Définition des biocarburants	9
2.3 Différents biocarburants	9
2.3.1 Les Biocarburant de 1 ^{ère} génération	9
2.3.2 Les biocarburants de 2 ^{ème} génération	10
2.3.3 Les biocarburants de 3 ^{ème} génération	11
2.4 Avantages et inconvénients des biocarburants	13
2.4.1 Les avantages	13
2.4.2 Les inconvénients	14
2.5 Utilisation des biocarburants comme énergie renouvelables	14
2.5.1 Bioéthanol	15
2.6. Définition et Propriétés du bioéthanol	15
2.7 La production de bioéthanol dans le monde	16
2.8. Production de bioéthanol à l'échelle nationale	17
2.9. Utilisation du bioéthanol	18
2.10. Les avantages et les inconvénients du bioéthanol	18
2.11 Obtention du bioéthanol	20
2.11.1 Distillation du bioéthanol	20
2.11.2Rectification	20
2.12 Conclusion	21
• Chapitre 03 : Matériels et méthodes.	
3.1 Introduction	22

3.2 La biomasse utilisée	22
3.2.1 Palmier dattier en Algérie	22
3.3 Production bioéthanol	24
3.4 Matériel biologique	25
3.4.1 Processus de production de bioéthanol	25
3.5 Préparation de l'inoculum (microorganismes)	28
3.6. Fermentation alcoolique	28
3.7 Distillation alcoolique	29

• **Chapitre 04 : Résultats et discussion.**

4.1 Introduction	31
4.2 l'évolution du pH	31
4.3 Indice de réfraction	32
4.4 Degré alcoolique	32
4.5 Densité	33
4.6 : Les résultats finaux	34
4.7 Production d'éthanol en fermenteur de 20 litres	34
4.8 Valorisation énergétique	35
Conclusion générale	39

BIBLIOGRAPHIE

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

L'utilisation actuelle des sources d'énergie a générée des problèmes environnementaux, et a provoqué la pollution dans l'air, l'eau et la terre durant les années. Ces effets négatifs ont augmenté l'intérêt de développement de nouvelles technologies pour obtenir des énergies propres, Principalement à travers l'utilisation des sources d'énergie renouvelables [1]. Ainsi que les majeures ressources conventionnelles d'énergie comme le charbon, le pétrole et le gaz naturel sont au bord de l'extinction et il est estimé que l'épuisement des ressources du pétrole pourrait être dans une cinquantaine d'année [2].

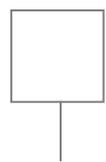
Les énergies renouvelables sont d'importance croissante, répondant aux soucis environnementaux par rapport à l'utilisation des énergies fossiles. Le bois et d'autres formes de biomasse sont l'un des principales ressources d'énergie disponibles. Contrairement aux autres énergies renouvelables, on peut produire la chaleur et l'électricité. La biomasse représente la seule source des combustibles liquides, solides et gazeux, elle est unique car elle est la seule qui est constituée de matière organique parmi les énergies renouvelables [3].

Les bioénergies constituent une réelle opportunité pour répondre à nos besoins énergétiques quine cessent de croître. Elles sont considérées comme une voie prometteuse pour les énergies renouvelables surtout que les énergies fossiles commencent à se raréfier. Les biocarburants tels que le bioéthanol qui appartient à cette famille d'énergies renouvelables, serait un bon substitut aux énergies fossiles s'il peut être produit conformément aux données industrielles et économiques exigées par les populations et sociétés contemporaines. Le bioéthanol est l'éthanol d'origine biologique et agricole obtenu par fermentation du sucre extrait de la plante sucrière ou par hydrolyse enzymatiques de l'amidon contenu dans les céréales. Il est utilisé comme biocarburant dans les « moteurs à essence » [4].

Les biocarburants sont des vecteurs d'énergie qui emmagasinent l'énergie tirée de la biomasse. L'éventail des sources de biomasse qui peuvent servir à produire de la bioénergie sous une variété de formes est large, tous peuvent servir à produire de l'électricité, de la chaleur, à congénère de la chaleur et de l'électricité ainsi que d'autres formes de bioénergie.

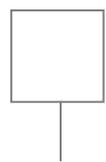
Ce travail comporte deux parties :

- **La première partie** de ce mémoire présente une synthèse bibliographique divisée en deux chapitres distincts.



- ✚ Chapitre 01 : Généralité sur biomasse algale et elles peuvent être principalement classées en deux catégories : les macroalgues” et ”les microalgues”, la biomasse algale pour la production de la bioénergie
- ✚ Chapitre 02 : Les biocarburants, Définition, générations, et enfin le biocarburant utilisé « bioéthanol », ses propriétés et ses utilisation
- **La deuxième partie** est divisée en deux chapitres:
 - ✚ Chapitre 03 : Matériel et méthode est basé sur la nature de travail au niveau de laboratoire URER-MS Adrar.
 - ✚ Dans chapitre 04 : on va parler l’ensemble des résultats obtenus et utilisation de la bioéthanol.

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



CHAPITRE 01 :
GENERALITE SUR BIOMASSE
ALGALE

Chapitre 01: Généralité sur biomasse algale

1.1. Introduction :

Les algues sont des organismes photosynthétiques qui se développent dans des habitats variés, majoritairement des environnements aquatiques, et qui sont capables de convertir l'énergie lumineuse et une source de carbone, le dioxyde de carbone (CO_2), en un ensemble de matières organiques ou "biomasse". En fonction de leur taille, elles peuvent être principalement classées en deux catégories : les macroalgues" et "les microalgues". [5]

1.2. Définition des macroalgues :

Les macro-algues sont des algues multicellulaires de taille proche du centimètre et qui croissent le plus souvent dans des bassins naturels d'eau douce ou d'eau salée.

Les microalgues ont une taille de l'ordre du micromètre et sont considérées comme des algues unicellulaires qui se développent en suspension principalement dans des solutions aqueuses [5].



Figure 1.1. Photo de Macroalgue [6].

1.3 Définition des microalgues :

Les microalgues sont des micro-organismes de formes et de tailles variées, allant de quelques à plusieurs dizaines de micromètres [7], photosynthétiques, eucaryotes (ex : algues vertes, rouges et brunes) ou procaryotes (Ex : cyanobactéries). Elles peuvent être unicellulaires ou multicellulaires. Elles ont la capacité de se développer rapidement dans des milieux et elles peuvent croître dans des conditions extrêmes (espèces halophiles dans les milieux très salés, espèces thermophiles dans les milieux très chauds). Les microalgues sont présentes dans quasiment tous les écosystèmes terrestres, et il en existe une grande variété d'espèces 50 000 à 1 million d'espèces estimées pour 30000 étudiées [8].

La majorité des microalgues croissent à une température de 25-35°C avec un pH neutre. [9]

La figure suivante montre les microalgues.

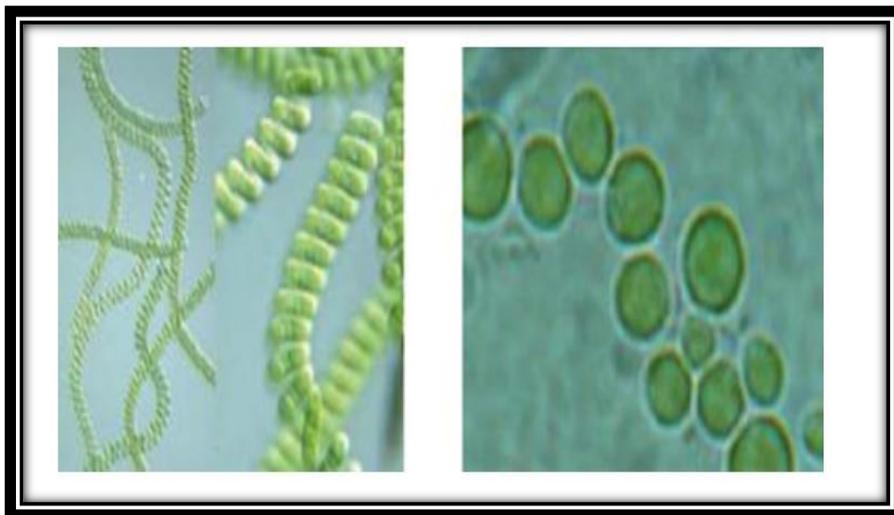


Figure 1.2. Photo de micro algue [10]

1.4 Les grands groupes des macroalgues :

Les algues diffèrent en couleur, taille et fonction résultant en plusieurs types :

✓ **Les algues vertes (Chlorophycées) :** Elles sont de formes très variées, uni-ou pluricellulaires. Leurs plastes sont colorés en vert par les chlorophylles, auxquelles sont associés des carotènes et des xanthophylles. La photosynthèse permet la formation d'amidon, comme pour les plantes supérieures, la plupart des algues vertes vivent en eau douce ou en milieux marins, mais certaines espèces peuvent également se développer sur terre. Elles jouent un rôle important dans l'oxygénation des eaux, favorisant ainsi la vie animale [11].

✓ **Les algues rouges (Les Rhodophytes) :** Elles montrent une originalité particulière avec leur pigments surnuméraires rouges(Phycoérythrine) et bleus (Phycocyanine) qui viennent masquer la chlorophylle. Les proportions relatives entre les différents pigments, conjuguées avec la forme du thalle, donnent à la lumière du jour toutes les couleurs imaginables depuis le brun noirâtre jusqu'au rose très clair en passant par les rouges pourpres et les orangés.

De plus, pour une même espèce, la couleur varie en fonction de l'exposition aux rayons lumineux, souvent les individus qui se développent aux forts éclaircissements montrent des couleurs délavées, où dominent les jaunes orangés en raison de la forte concentration en pigments caroténoïdes photo protestants. [12].

✓ **Les algues brunes (Chromophytes):** est une algue monolithique. On la trouve dans l'eau douce et salée caractérisée par sa couleur brune or brunâtre. Elle ne comporte pas de paroi cellulaire et est entourée d'une croûte de silice appelée nanoparticules en raison de sa petite taille, qui ne dépasse pas 50 micromètres [11].

✓ **Les algues bleues (Cyanobactéries) :** Les cyanobactéries, ou cyanophycées, ou encore algues bleues (leurs anciens noms), sont des bactéries photosynthétiques, c'est-à-dire qu'elles tirent parti, comme les plantes, de l'énergie solaire pour synthétiser leurs molécules organiques. Pour capter cette lumière, elles utilisent différents pigments, des phycocyanines (de couleur bleu-vert) ou la chlorophylle.

Leur photosynthèse, comme celle des plantes, produit du dioxygène (la molécule d'oxygène), à la différence des autres bactéries photosynthétiques (chlorobactéries et rhodobactéries), qui utilisent le soufre à la place de l'eau. Cette production d'oxygène dans les cyanobactéries de l'océan a probablement été à l'origine de Grande Oxydation, ce brutal enrichissement de l'atmosphère en dioxygène il y a 2 milliards d'années [11]



Figure 1.3. Les grands groupes des macroalgues [13]

1.5 La biomasse algale pour la production de la bioénergie :

La valorisation de la biomasse algale peut se traduire par la production d'énergie sous forme d'électricité et/ou de chaleur par combustion directe, ou sous forme de bio éthane ou de biocarburant. Cependant, cette valorisation ne sera concurrentielle qu'avec une forte productivité de biomasse, une possibilité de récolte mécanique simple et un cout de production plus réduit que les procédés mettant en œuvre d'autre types de biomasse [14].

1.6 Production de bioéthanol :

Généralement, l'éthanol est produit à partir de matière première riche en sucre ou en amidon. Certaines micro-algues disposent d'une paroi cellulaire composée de polysaccharides et d'autres peuvent contenir jusqu'à 50% d'amidon. Elles peuvent donc être utilisées comme matière première dans le processus de production d'éthanol. Des micro- algues comme Chlamydomonas peuvent aisément donner lieu à une production d'éthanol ou d'autres alcools grâce à l'auto-fermentation de leur amidon [15].

1.7 Production de biodiésel :

Nous avons vu que, cultivées dans des conditions dites « de stress », certaines espèces de microalgues peuvent accumuler des taux importants de lipides et plus spécifiquement des triglycérides par réaction de transestérification avec un alcool conduisent à des esters utilisables dans les moteurs à combustion. En plus de l'argument de productivité, les

microalgues possèdent un atout majeur par rapport aux autres solutions : la non-concurrence avec les cultures alimentaires [15].

La figure suivante donne l'importance des microalgues dans la production de bioénergie :

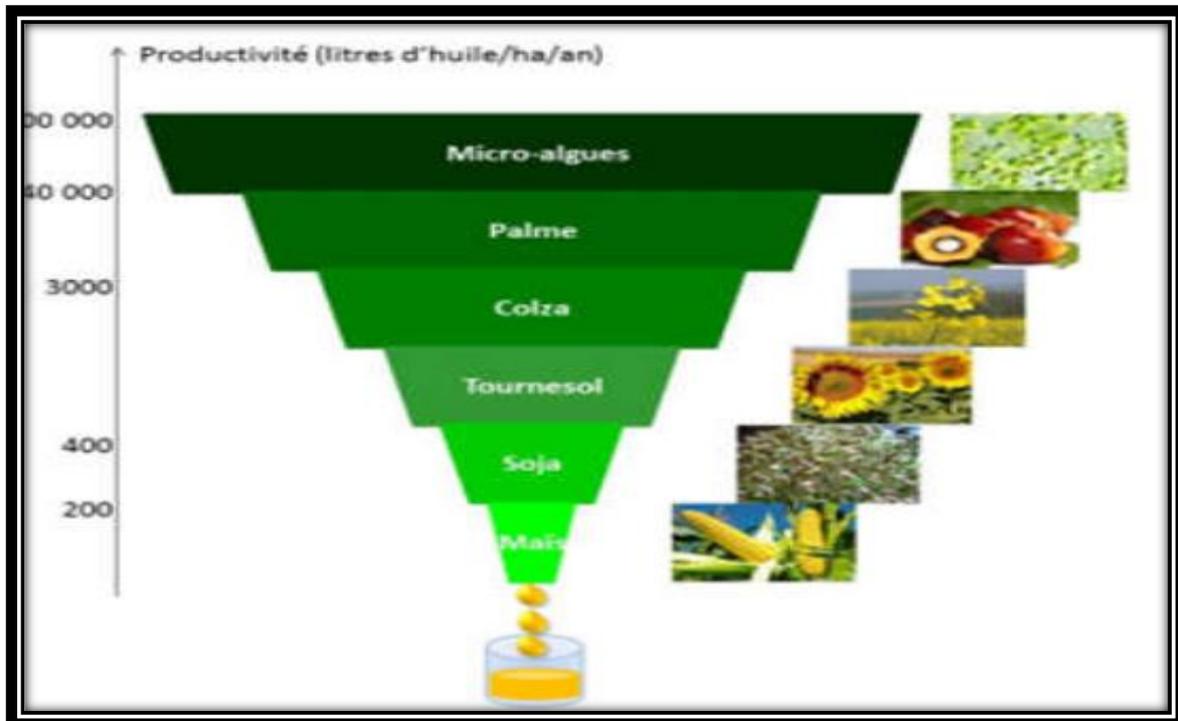


Figure 1.4: Productivité en huile des micro-algues par rapport à d'autres plantes oléagineuses [15].

1.8 Production de bio hydrogène :

De plus les microalgues produit le bio-hydrogène, il est une source efficace d'énergie renouvelable qui suscite actuellement de nombreuses recherches et applications. Le procédé de synthèse de bio-hydrogène peut revêtir deux formes : la photolyse directe et la photolyse indirecte. la photolyse directe repose sur un transfert des électrons issus de l'eau aux protons, couplé à une réduction de la ferrédoxine (protéine intervenant au niveau du photosystème des algues dans le transport d'électrons et de protons) [5].

Induisant la synthèse d'hydrogène par l'enzyme Hydrogénase [16] La méthode indirecte repose sur la conversion de l'amidon stocké par les algues sous forme d'hydrogène sous des conditions d'anaérobiose et de limitation de soufre [17]. Plusieurs espèces de microalgues ont démontré une prédisposition intéressant vis -à- vie des procédés indirecte, c'est-à-dire une grande capacité de synthèse de bio-hydrogène sous des conditions de privation de soufre. En

conséquence, la production d'hydrogène à partir des microalgues représente un créneau prometteur mais ceci nécessite une meilleure compréhension des métabolismes des microalgues et de leur ingénierie [18].

1.9 Production de Le biométhane :

Une forme différente d'énergie peut également être produite à partir de micro- algues, le biométhane. Après fermentation dans un digesteur, elles génèrent un biogaz composé de 70% de méthane, les autres gaz étant du dioxyde de carbone et de l'azote. Cette technologie a été développée dans les années 40 aux États-Unis et est maintenant répandue. Le grand avantage de la méthanisation est que la biomasse n'a pas besoin d'être séchée alors que pour de nombreuses voies de valorisation de la biomasse, une étape de séchage est requise [15]

1.10 Conclusion :

Le secteur des macroalgues dispose d'une potentialité importante dans le contexte de la transition d'une économie basée sur les ressources fossiles et l'industrie de masse globalisée vers une « bioéconomie circulaire et territorialisée » répondant à une demande croissante de la société civile. En effet, les algues, et en particulier le plancton macro algal riche de sa diversité, dès son fonctionnement physiologique et situé dans les mers, les lagunes et les eaux douces, représentent la moitié du gisement mondial en biomasse, avec un effet « puits de carbone » correspondant. Or les ressources renouvelables et leur valorisation à travers des processus de bio raffinerie envisagée dans un contexte de durabilité (externalités positives environnementales et sociales) sont appelées un grand avenir, d'autant plus qu'elles peuvent contribuer à la résilience au changement climatique. Les macroalgues présentent de nombreux avantages. En premier lieu, du fait de leur physiologie : croissance en mode photosynthétique utilisant l'énergie solaire et le CO₂ atmosphérique ou provenant de fumées industrielles en mode hétérotrophe, et émettant de l'oxygène ; nutriments (azote et phosphore non organiques) issus de déchets de toutes sortes, dont les eaux usées. Autre avantage, industries de fermentation, voire en biocarburants (notamment pour les avions, les autres véhicules s'orientant plutôt vers l'électricité ou l'hydrogène). Un autre atout des microalgues se situe au niveau de leurs conditions de production par rapport aux autres sources bio-massiques : elles ont une productivité par unité de surface très supérieure grâce à leur multiplication très rapide.

CHAPITRE 02 :

BIOCARBURANTS

Chapitre 02 : Biocarburants

2.1 Introduction :

Les biocarburants sont de l'énergie extraite de matières biologiques le distinguer des autres sources d'énergie non fossiles (comme l'énergie des vagues), et éolienne. De plus, quelle que soit la forme du biocarburant (solide, liquide ou gazeux), évidemment, c'est une source d'énergie durable, renouvelable, car elle est dérivée de plantes et animaux, afin qu'ils puissent être remplacés en peu de temps [19].

2.2 Définition des biocarburants :

Les biocarburants représentent aujourd'hui la principale alternative aux carburants d'origine fossile : pétrole, gaz, charbon, la substitution des carburants raréfiés. Les biocarburants sont des fluides produits à partir de matériaux organiques non fossiles et issus de la biomasse ou matière première considérée comme étant la fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture, de la sylviculture et de leurs industries connexes, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et municipaux [20].

2.3 Différents biocarburants :

Les dix biocarburants cités par le CE (Directive 2003/30/CE) sont: le bioéthanol, le biodiesel (esters d'Huile Végétale), le biogaz, le bio-méthanol, le bio-di méthyl éther (bioDME), le bio-Ethyle-tertio-butyle-éther (bio-ETBE), le bio-Méthyl-tertio-butyle-éther (bioMTBE), les biocarburants synthétiques, le bio- hydrogène, et les huiles végétales pures [3].

Les deux principaux biocarburants candidats prêts à un développement industriel sont l'éthanol (principalement utilisé en Europe sous forme d'éthyle-tertio-butyle-éther ou ETBE) et l'ester méthylique d'huile végétale (EMHV) ou biodiesel [4].

On distingue généralement trois générations de biocarburants, qui se différencient par la nature de la biomasse utilisée pour leur production :

2.3.1 Les Biocarburant de 1^{ère} génération :

La première génération de biocarburants repose sur l'utilisation des organes de réserve des cultures : les graines des céréales (blé, maïs) ou des oléagineux (colza, tournesol,

jatropha), les racines de la betterave ou la canne à sucre, les fruits du palmier à huile, Ces organes de réserves des plantes stockent le sucre (betterave et canne), l'amidon (blé, maïs), ou l'huile (colza, tournesol, palme, jatropha). Ces organes de réserves étant également utilisés pour l'alimentation humaine, la production de biocarburants se fait en concurrence de la production alimentaire [21].

Il existe deux grandes filières de production de biocarburants de 1^{ère} génération :

✓ **Le biodiesel** : Cette filière 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 2.1) [6].

✓ **Le bioéthanol** : La filière éthanol est un substitut à l'essence, produit de la fermentation alcoolique (ou éthanolique) des fruits, des céréales, des tubercules et des végétaux riches en sucres (Figure 2.1) [7].

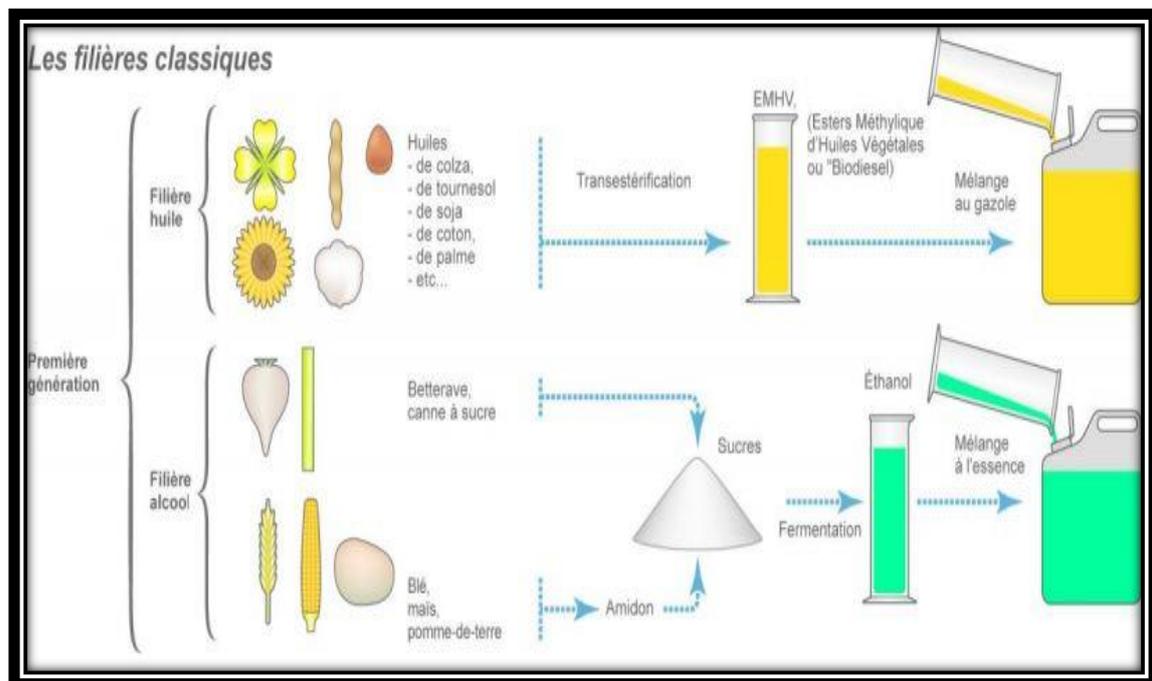


Figure 2.1: Biocarburants de première génération[6, 7, 8].

2.3.2 Les biocarburants de 2^{ème} génération :

Issu de la transformation de la lignocellulose contenue dans les résidus agricoles (paille) et forêt (bois), ou plantes issues de cultures spéciales (forêt naine à croissance rapide).

Le nouveau procédé vise à améliorer le bilan énergétique en utilisant l'ensemble de la plante. A cet effet, des cultures telles que les résidus forestiers, les déchets organiques, la luzerne ou le miscanthus sont utilisées. Ces processus peuvent également limiter l'utilisation des terres agricoles et développer une gamme de cultures plus large que les terres agricoles.

Nourrissez-vous et obtenez un meilleur bilan énergétique et environnemental que la première fois génération [9].

La figure suivante présente les biocarburants de deuxième génération :

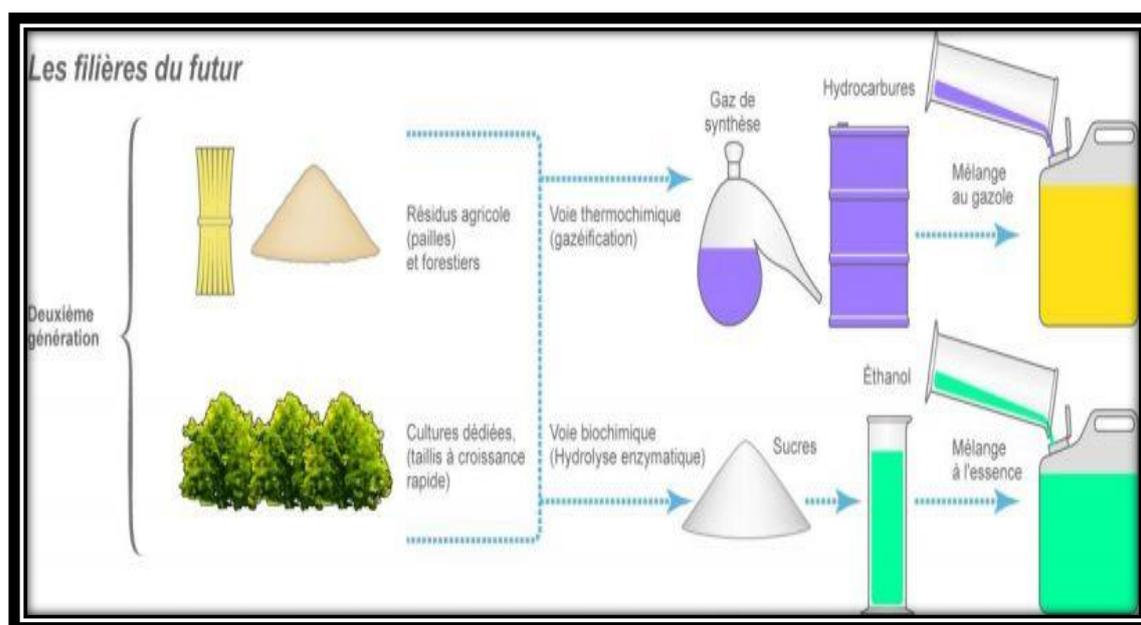


Figure 2.2: Biocarburants de deuxième génération [8].

2.3.3 Les biocarburants de 3^{ème} génération :

Ils sont obtenus par production microbienne de lipides ou d'hydrogène. Le soufre est un élément chimique nécessaire au processus de formation protéine. Lorsque l'algue *Chlamydomonas Reinhardt* manque de soufre, la photosynthèse diminue. Il a établi une autre voie énergétique : la production d'hydrogène. Nous pouvons cultiver Microalgues avec deux procédés différents : en utilisant une photo bioréacteur ou un étang externe. Les rendements attendus sont 3 à 30 fois plus élevés que les variétés d'oléagineux (en particulier les oléagineux), parce que le taux de photosynthèse est plus élevé). Le biocarburant de troisième génération est des enjeux énergétiques importants [10].

La figure 2.3 montre les biocarburants de troisième génération :

LES BIOCARBURANTS ISSUS DE MICROALGUES

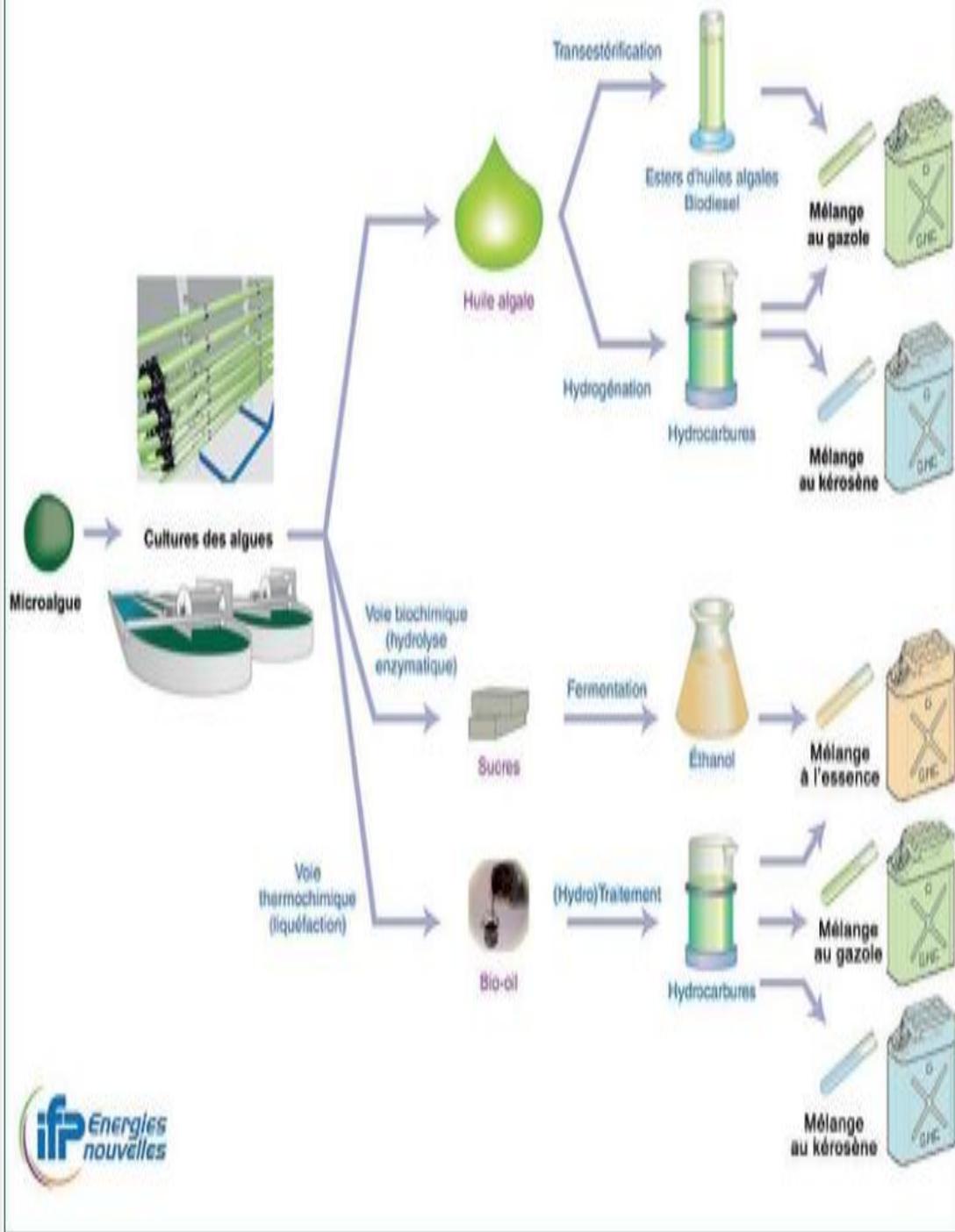


Figure 2.3: Biocarburants de troisième génération [11].

Dans le tableau suivant on montre les différentes générations de biocarburants et les procédés de transformation pour chaque génération :

Tableau 2.1 : Différentes générations de biocarburants et les procédés de transformation pour chaque génération [14].

Génération	1 ^{re} génération	2 ^{ème} génération	3 ^{ème} génération
Origine des substrats	grains de blé, colza, tournesol	déchets organiques, (les dattes, la betterave sucrière...)	micro algues
Procédés mis en œuvre	fermentation, tans-estérification	gazéification, hydrolyse enzymatique, méthanisation	méthanisation, gazéification, fermentation
Produit final	bioéthanol, biodiesel	bio méthane, bioéthanol, biodiesel, bio hydrogène	bio méthane, bioéthanol, biodiesel,
Rendement énergétique mtep/ha/an	1 à 4	3,5 à 5	20 à 40
Stade de maturité technologique	industriel	industrialisation à court terme	recherche pilote

2.4 Avantages et inconvénients des biocarburants :

2.4.1 Les avantages :

Renouvelables : il faut des milliers d'années pour produire des combustibles fossiles tandis que la matière première des biocarburants est renouvelable beaucoup plus rapidement [12].

Limitent les émissions de gaz à effet de serre (GES) et les consommations d'énergie non renouvelable.

Emettent moins de polluants (le soufre, 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.

Offrir des possibilités d'investissement, de croissance économique et de création d'emplois.

Les biocarburants sont facilement biodégradables et moins dangereux en cas d'accident sur l'homme et l'environnement, en particulier pour l'eau. Ainsi tout risque de marée noire est éliminé.

La teneur en oxygène du biodiesel étant supérieure de 10 % à celle du pétro-diesel, la combustion dans le moteur de ce biocarburant est de meilleure qualité. Il n'a pas besoin d'être importé, puisque on peut le produire sur place. Le point d'éclair est plus élevé que le pétro-diesel, le biodiesel est donc moins dangereux pour l'inflammabilité pendant le stockage [13].

2.4.2 Les inconvénients :

Le renchérissement des cours mondiaux des céréales et des oléagineux en raison de la demande accrue de biocarburants.

Ils instaurent une concurrence redoutable entre cultures énergétiques et cultures alimentaires.

La production de biocarburants à partir de cultures agricoles exerce une forte pression sur l'environnement : en termes d'utilisation d'engrais nocifs, de pollution et d'épuisement des sols et de réserves d'eau.

Son pouvoir calorifique est relativement inférieur à celui du pétro-diesel (environ 15% en moins).

Sa viscosité élevée par rapport au pétro-diesel, ce qui peut causer des phénomènes d'encrassements des filtres du moteur en le brûlant [13].

2.5 Utilisation des biocarburants comme énergie renouvelables

Le secteur des transports de personnes et de marchandises représente un défi majeur dans la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre. Bien que le prix des carburants soit à la hausse, la consommation énergétique de ce secteur ne cesse de croître. Les biocarburants couvrent l'ensemble des carburants liquides, solides ou gazeux produits à partir de la biomasse et destinés à une valorisation énergétique dans les transports. Les biocarburants sont utilisés sous forme d'additifs ou de complément

aux carburants fossiles suivants : gazole (incorporation en tant que biodiesel), essence (incorporation sous forme d'éthanol ou d'ETBE lui-même produit à partir d'éthanol), aux carburants gazeux. La filière éthanol qui comprend l'éthanol et l'ETBE (éthyl tertio butyléther) est adaptée aux véhicules essence et la filière des huiles végétales avec l'EMHV (esters méthyliques d'huiles végétales) est adaptée aux véhicules diesel [22].

2.5.1 Bioéthanol :

Le bioéthanol est un biocarburant utilisé dans les moteurs à essence. Le terme bioéthanol est un amalgame entre le préfixe bio du grec bios, vie, vivant et du terme éthanol. Le préfixe bio indique que l'éthanol est produit à partir de matière organique (biomasse) et n'a pas de lien avec le terme « bio » parfois utilisé pour désigner l'agriculture biologique. Le préfixe « bio » est donc contesté dans certains pays francophones. Il s'agit d'un vecteur énergétique issu de l'agriculture et appartenant à la famille des énergies renouvelables [23].

2.6. Définition et Propriétés du bioéthanol :

L'éthanol ou encore alcool éthylique, molécule de formule chimique C_2H_5OH comporte deux atomes de carbone liés (C), l'un portant trois atomes d'hydrogène (H), l'autre deux atomes d'hydrogène et une fonction hydroxyle (OH). Sa formule développée est : [24]

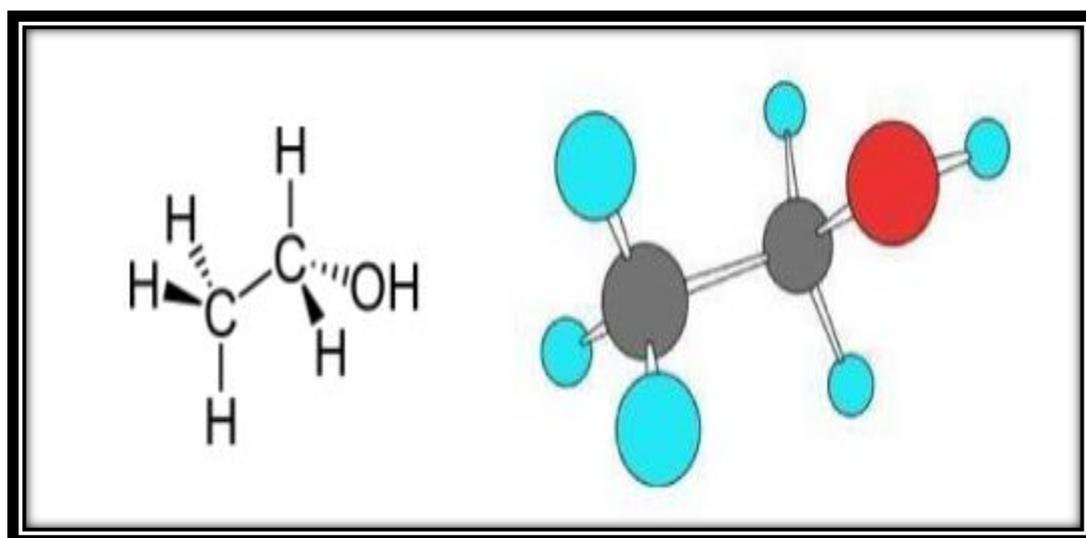


Figure 2.4 : Structure de la molécule d'éthanol [25].

Tableau 2.2 : Propriétés physiques et chimique de l'éthanol [26].

La masse molaire	46,0684 ± 0,0023 g/mol
Formule chimique	CH ₃ CH ₂ OH
Température d'ébullition	79 °C
Point de fusion	-117 °C
Pression de vapeur	5,8 kpa : à 20 °C
Pouvoir calorifique inférieur (MJ/L)	21.06
Pouvoir calorifique inférieur (MJ/kg)	26.7
Densité (kg/L)	0.794
Nombre de Cétane	<100
Nombre d'Octane	0.40-045
Type de moteur	A combustion (Essence)

2.7 La production de bioéthanol dans le monde :

Actuellement, les plus grands producteurs mondiaux de bioéthanol se concentrent dans trois régions. En tête : les Etats Unis avec une part de 48 % de la production mondiale de biocarburants (bioéthanol) ; le Brésil avec 22 % ; l'Union Européenne avec 16 % (2012). Ces trois régions produisent, à elles seules, plus de 86 % de la production mondiale des biocarburants Figure I.5 Ainsi, les Etats-Unis se fixent un objectif de 36 milliards de gallons (136,27 milliards de litres) de biocarburants, dont 79,5 milliards de litres provenant de carburants de nouvelle génération. En avril 2009, le Conseil Européen a adopté la Directive 2009/28/CE16 relative à la promotion et l'utilisation des énergies renouvelables, portant ainsi l'objectif de consommation d'énergie renouvelable dans le secteur des transports à 10%. Par ailleurs, de nombreux pays prévoient d'accroître leur consommation de carburants renouvelables.

D'après les projections faites par le FAO et l'OCDE, la production annuelle mondiale en 2020 devrait pratiquement doubler par rapport à la production de 2008 pour atteindre 196,87 milliards de litres [27].

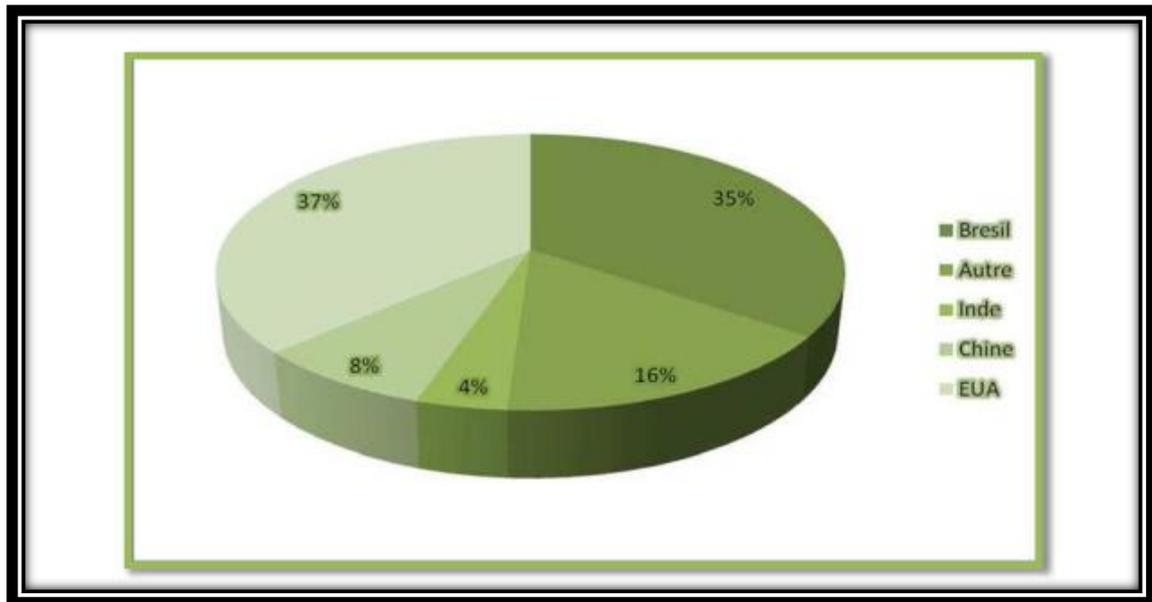


Figure 2.5: Distribution de la production mondiale de bioéthanol [28]

2.8. Production de bioéthanol à l'échelle nationale :

A l'instar d'autres pays américains et européens qui ont développé des programmes industriels intégrés pour la production d'éthanol à partir de biomasse végétale, l'Algérie, possède un potentiel considérable en déchets et sous-produits de dattes ce qui pourrait lancer un pareil programme. La production d'éthanol à partir des déchets de dattes constitue une solution intéressante sur le plan économique. Cet alcool peut remplacer avantageusement celui obtenu par voie chimique à partir des produits pétroliers et peut remplacer le pétrole léger comme carburant. En outre, l'intérêt de produire de l'éthanol vient du fait que c'est une substance énergétique et son utilisation couvre un champ étendu d'activités industrielles : fabrication d'intermédiaires chimiques (produits de beauté, parfums, cosmétiques, produits pharmaceutiques. De solvants, de détergents, etc. Enfin, il est utile de signaler, selon la Régie des Alcools, que notre pays importe entre 30000 et 50000 hectolitres d'alcool éthylique par an afin de couvrir ses différents besoins. En considérant les conditions climatiques, la disponibilité de la matière première, les exigences technologiques et la demande nationale en alcool, un programme expérimental au niveau des laboratoires et à l'échelle pilote a été entrepris et les résultats obtenus ont démontré la faisabilité du procédé aussi bien sur le plan technique qu'économique [29].

2.9. Utilisation du bioéthanol :

Le bioéthanol peut être utilisé, sous certaines conditions, comme carburant dans les moteurs essence, soit de 5 à 20% dans les moteurs à essence sans modification et/ou de 85 à 100% dans des moteurs à essence spécifiquement adaptés. En outre, l'éthanol peut être converti en divers produits de base de l'industrie chimique, tels, l'éthylène et l'éther éthyle tertio butyle (ETBE), conventionnellement, produits à partir du pétrole (figure 2.6). Il est à signaler que le plastique résulte de la polymérisation de l'éthylène et de l'ETBE mélangé à raison de 15% l'essence, permet d'augmenter l'indice d'octane du carburant, contrairement à l'éthanol, il ne favorise pas l'évaporation des carburants et n'absorbe pas l'humidité de l'air [30]

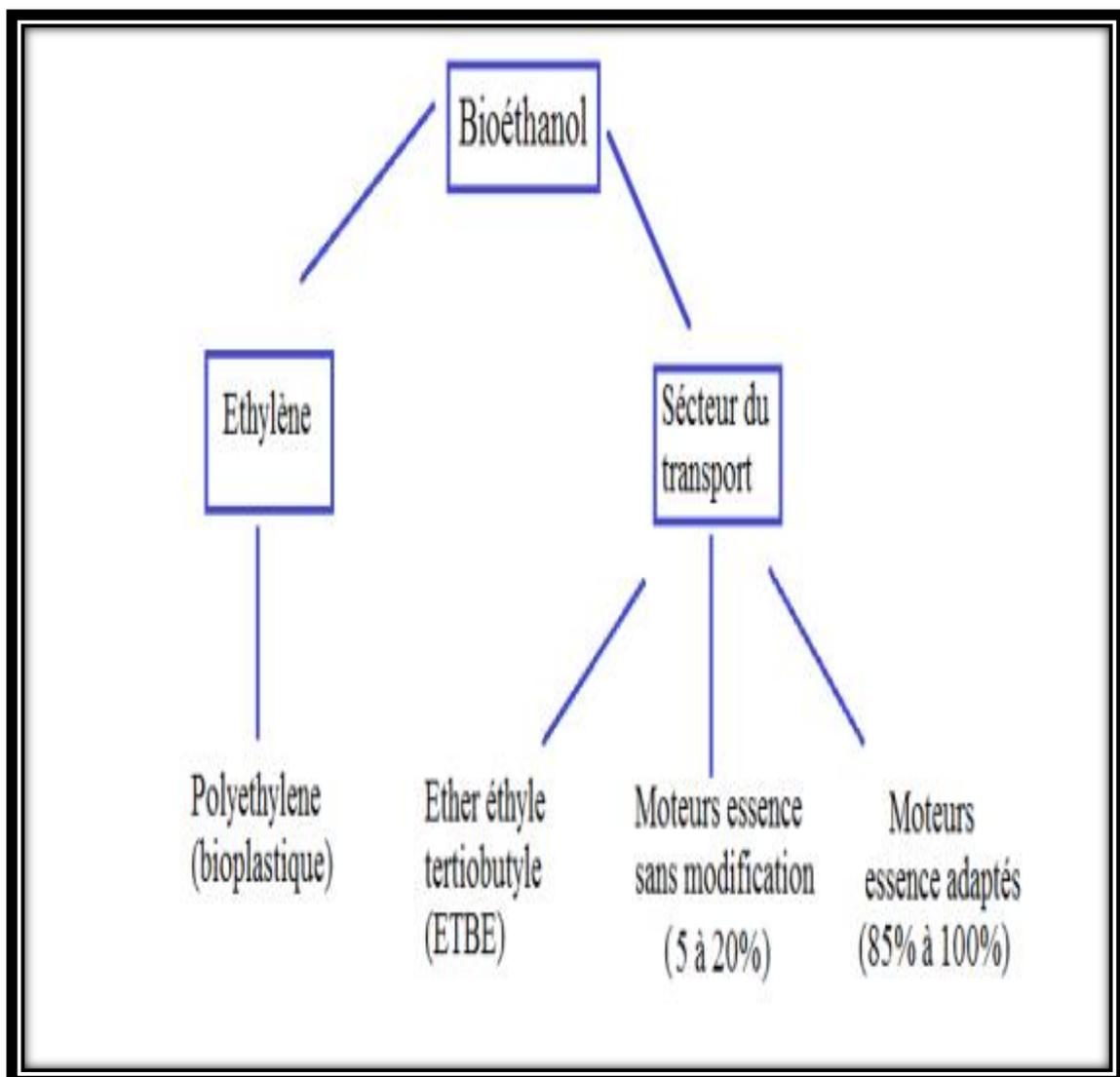


Figure 2.6 : Utilisation potentielle du bioéthanol [31].

2.10. Les avantages et les inconvénients du bioéthanol :

Le tableau suivant résume les avantages et les inconvénients du bioéthanol/

Tableau 2.3 : Avantages et les inconvénients du bioéthanol [32].

Avantages	Inconvénients
Diminution des émissions de dioxyde de carbone et meilleur rendement énergétique des moteurs à explosion	Les véhicules utilisant l'E85 produisent des émissions plus élevées d'oxyde d'azote, d'éthylène et d'acétaldéhyde que les véhicules à essence
Indice d'octane* élevé permettant une meilleure efficacité des moteurs à explosions	Indice de cétane** faible ne permettant pas son utilisation dans les moteurs à combustion interne sans l'ajout d'un accélérateur d'ignition
Diminution des émissions de particules, de soufre, de benzène et de butadiène 1-3	Augmentation des émissions d'hydrocarbures par évaporation nécessitant un réglage de la pression de vapeur du carburant
Risque moins élevé de formation d'ozone que l'essence et le diesel	Emission d'acide acétique en cas de réaction entre le catalyseur et le carburant résiduel à l'échappement
Biodégradable	Corrosion des pièces en contact avec l'éthanol
Capacité énergétique inférieure à celle de l'essence (21285 kJ kg ⁻¹ pour l'éthanol contre 32020 kJ kg ⁻¹ pour l'essence)	Augmentation de la consommation volumique de carburant
Diminution de la dépendance au pays producteurs de pétrole	Prix encore élevé
Stimulation du milieu rural	Concurrence entre alimentation et énergie

2.11 Obtention du bioéthanol :

Après fermentation, l'éthanol est séparé du jus par distillation, rectification et déshydratation pour être utilisé comme biocarburant [33]

2.11.1 Distillation du bioéthanol :

C'est l'opération classique de récupération de l'alcool éthylique résultant de la fermentation, elle s'opère dans des colonnes à distiller. Ainsi le moût alcoolisé est réchauffé à 75 °C puis éjecté dans la partie supérieure d'une colonne de distillation qui comporte des plateaux superposés. Le moût alcoolisé tombe sur le premier plateau et descend de plateau en plateau pour aboutir à la base de la colonne, inversement de la vapeur est injectée sous pression à la base de la colonne et progresse vers là-haut en traversant successivement tous les plateaux. Elle entre en contact direct avec le liquide. Le moût s'épuise petit à petit de son alcool en descendant de plateau en plateau. Arrivé au bas de la colonne, ce liquide épuisé appelé vinasse est éliminé. La vapeur s'enrichit au contraire en alcool à mesure qu'elle gagne le sommet de la colonne. Lorsqu'elle est par le haut, elle se refroidit dans un condenseur et passe à l'état liquide [34]

2.11.2 Rectification

Pour obtenir de l'éthanol pur, dit absolu, deux étapes sont nécessaires après la distillation.

La première étape a pour but de purifier l'alcool contenu dans les bruts en éliminant les impuretés. Ce procédé consiste en une succession de distillations à des températures allant de 85 à 102 °C. La première partie de ce procédé est destinée à extraire les produits de tête (aldéhydes, acétate d'éthyle...). La seconde partie, est destinée à concentrer l'alcool et à éliminer les impuretés de queue (alcools supérieurs). Enfin la dernière partie élimine le méthanol contenu dans l'alcool [35]. L'alcool ainsi produit peut alors directement servir de carburant. Mais si celui-ci doit être mélangé à l'essence, il est nécessaire d'ajouter une étape de déshydratation pour obtenir l'alcool anhydre [36].

2.12 Conclusion :

Les biocarburants offrent une alternative aux carburants classiques. Cependant, les biocarburants de 1ère génération soulèvent de nombreux problèmes environnementaux et éthiques. Les scientifiques privilégient à présent les biocarburants de 2ème et 3ème génération qui n'utilisent pas de ressources alimentaires. Certaines cultures, comme le miscanthus (2ème génération), se développent de plus en plus. Elles ont l'avantage de ne pas être consommables par l'homme et de présenter un meilleur rendement énergétique. Les biocarburants de 3ème génération constituent la piste « Privilégiée » des scientifiques. Les microalgues utilisées produisent de l'hydrogène lorsque leur source de soufre est épuisée. Ce processus est exploité par les chercheurs pour la production de biogaz qui serait compatible avec les véhicules.

La consommation du bioéthanol rejette légèrement moins de CO₂ que l'essence. Mais bien qu'il ait des avantages certains, le bioéthanol présente de nombreux inconvénients qui ne permettent pas de dire que cette source d'énergie est écologique. C'est pourquoi il est parfois contesté et entraîne des débats. Cependant, le bioéthanol apporte une évolution dans le domaine de la recherche de remplacement d'énergies fossiles. En effet, il permet l'élaboration de nouveaux produits ayant un bilan écologique meilleur, comme, par exemple, les agro carburants de deuxième génération, en cours de développement. On peut penser à une filière de cette deuxième génération de biocarburants, d'un très bon niveau énergétique et écologique : il s'agit de la filière des microalgues qui représente une des meilleures alternatives aux hydrocarbures. Mais la filière des algocarburants n'en est qu'à son tout premier stade de développement. En attendant, le bioéthanol sert d'énergie de transition.

CHAPITRE 03 :
MATERIEL ET METHODES

Chapitre 03 : Matériel et méthodes

3.1 Introduction :

Ce chapitre présente l'ensemble des dispositifs expérimentaux, l'origine et le type du substrat utilisé ainsi que toutes les méthodes d'analyses utilisées. Le travail expérimental est effectué au niveau de laboratoire de bioconversion de l'Unité de Recherche en Energie Renouvelable en Milieu Saharien URERMS d'Adrar qui fait partie du Centre de Recherche en Energie Renouvelable CDER d'Alger

3.2 La biomasse utilisée :

3.2.1 Palmier dattier en Algérie : L'origine du Palmier Dattier en Algérie, vient de la « Péninsule Arabique » ; à travers les commerçants qui ont propagé du Palmier autour de la Méditerranée, il était introduit spécialement dans les lieux disposant d'eau dans le Sahara. C'est ainsi que sont apparues les premières palmeraies d'Oued Righ et des Ziban par le biais des bédouins nomades arabes, venus d'Orient, pour le commerce.

Le patrimoine phoenicicole national est concentré dans toutes les régions situées sous l'Atlas saharien dans la partie septentrionale est et centre du Sahara Algérien. Concentrées essentiellement dans le sud-est du pays. Parmi ces zones potentielles, à savoir : Souf, Ziban, Oued Righ, Cuvette de Ouargla, M'Zab, El-Goléa, Tamanrasset, Illizi et Tindouf, Adrar [37].

Tableau 3.1: Statistique de production de palmier dattier en Adrar [38]

Compagne	Commune	Superficie (ha)		Nbre existant	Nbre productif	production (qx)
		Existante	Irriguée			
2014-2015	11 / 12	28.326	26.163	3.798.965	2.766.100	910.328
2015-2016	11 / 12	28.327	26.163	3.798.965	2.775.938	913.663
2016-2017	11 / 12	28.327	26.163	3.803.230	2.830.575	937.604
2017-2018	11 / 12	28.320	26.168	3.798.759	2.796.087	935.657
2018-2019	11 / 12	28.320	26.168	3.798.759	2.825.633	934.562
2019-2020		28,320	26,168	3.798.759	2.825.633	935.680

Les cinq cultivars dominants dans la région d'Adrar H'mira, Tgaza, Tinacer, Aghamou et Taquerbouch.

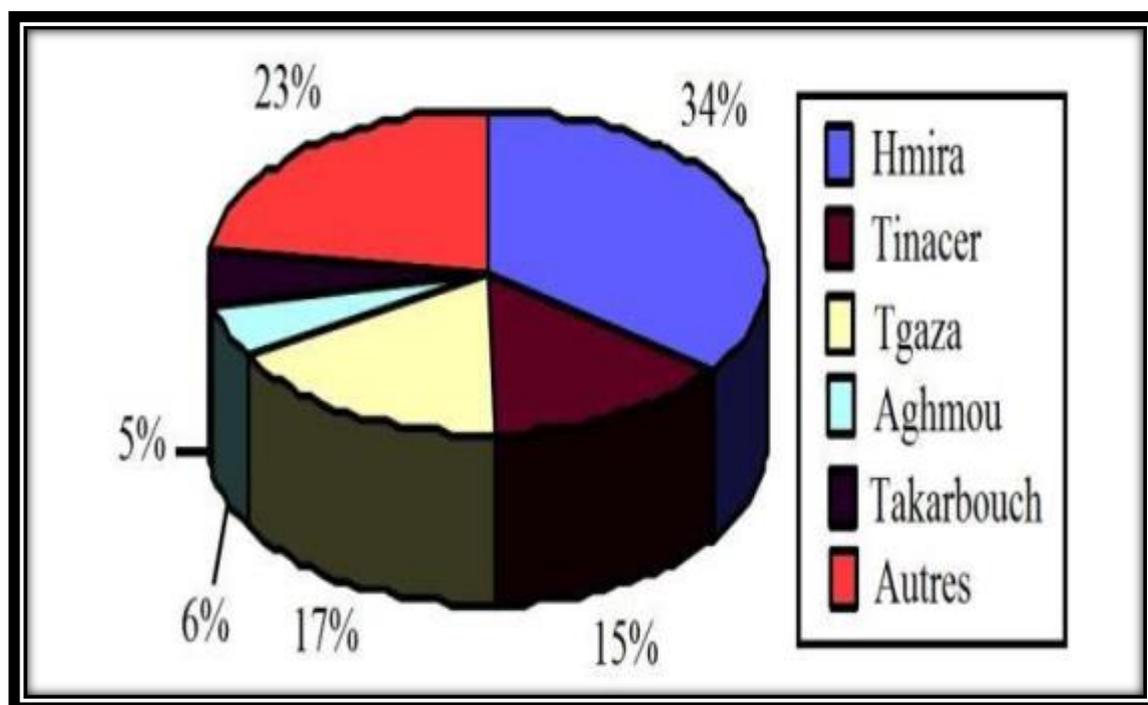


Figure 3.1. Répartition de la production de dattes dans la Wilaya d'Adrar [39]

3.3 Production bioéthanol

Dans notre travail, nous avons produit le bioéthanol par la fermentation

3.3.1 Biomasse :

On utilise deux type de biomasse tel que : palmier dattier (palmes sèche) et les macroalgues.

Le substrat (biomasse) utilisé au cours de nos essais c'est les de deux variétés, de palmier dattier (palmes sèche) de la variété Hmira ainsi que à travers les macroalgues d'eau douce sahariennes.

Ce choix est orienté par leur disponibilité, leur abondance et leur appréciation pour la production de bioéthanol, selon les données de la DSA d'Adrar et l'enquête perspective réalisée sur terrain. Les sous-produits du palmier dattier utilisés, à savoir, palmes sèche, sont récoltés en début de Février, au niveau de l'exploitation agricole de l'INRAA d'Adrar.



Figure 3.2. Palmier dattier (palmes sèches).

Le deuxième choix est celui des macroalgues trouvées en eau douce. Ce choix a été fait conformément aux caractéristiques mentionnées précédemment. Ce type d'algue a été collecté dans les fermes de l'état de l'Adrar en raison de sa disponibilité.

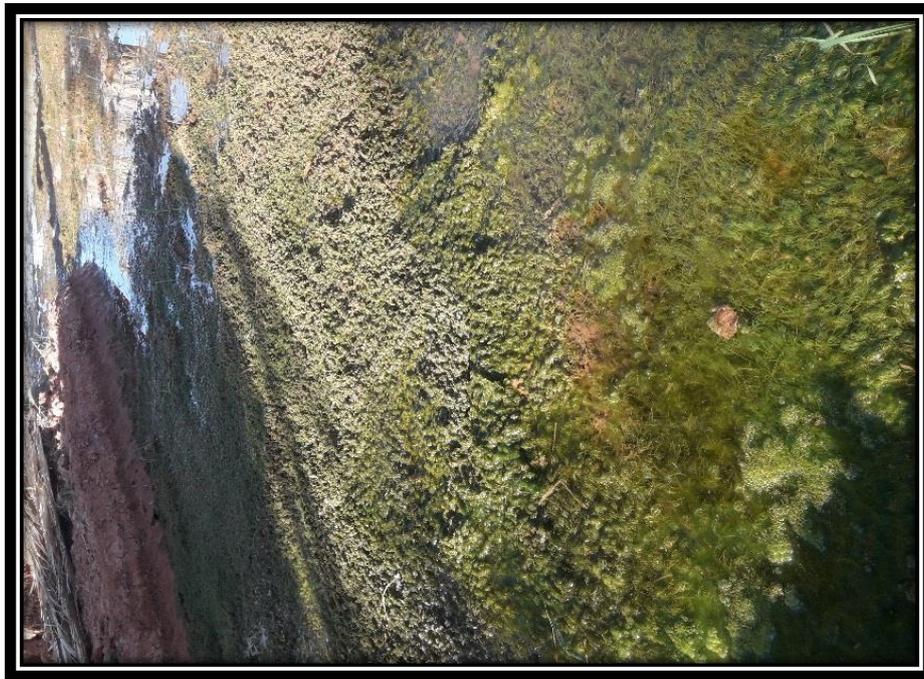


Figure 3.3 : Macroalgue d'eau douce « bassin ».

3.4 Matériel biologique :

La levure de boulangerie sèche, *Saccharomyces cerevisiae* est utilisée pour réaliser la fermentation et conservée dans un endroit frais et sec. Cette souche sert à produire de l'éthanol

3.4.1 Processus de production de bioéthanol :

Cette partie concerne la production d'éthanol à partir de la solution de biomasse de macroalgue et palme dattier.

La biomasse a été soumise à des traitements de différentes natures :

- **Broyage.**

Cette étape est indispensable afin d'augmenter la surface spécifique de la biomasse et aussi pour faciliter la dissolution des polymères (surface développée de la poudre par unité de masse).

Les palmiers et macroalgues ainsi obtenus ont été broyés par un mixeur et ce dernier a été tamisé à l'aide d'un tamis à mailles.



Figure 3.4 : broyage macroalgue et palme sèche

- **Préparation des dilutions**

Le but de l'atténuation est de créer un environnement favorable à la croissance des micro-organismes.

Quatre flacons en verre ont été préparés, puis un volume de farine de palme sèche et de farine de macroalgues a été ajouté à chaque flacon différent comme suit (70 g de farine de palme sèche, 63 g avec 7 g de farine de macroalgues, 66.5g avec 3.5g, et 69.3g avec 0.7g), puis ajouter 700 ml d'eau dans chaque flacon.



Figure 3.5. Préparation des dilutions

Prétraitement à la vapeur / Steamexplosion : Procédé thermo-mécanochimique qui hydrolyse initialement la matière lignocellulosique.

Hydrolyse acide : le but de ce traitement est de rompre les liaisons osidiques du polymère pour en produire des sucres monomères.

La Figure suivante montre la méthode utilise dans le prétraitement à la vapeur



Figure 3.6. Prétraitement à la vapeur.

- **Ajustement de pH du moût de chaque dilution :**

Le pH du moût est ajusté entre 4,5 et 4,7 préjudiciable au développement des bactéries s'avèrent propice à la prolifération des levures. Par l'acide acétique (CH_3COOH , 1N).



Figure 3.7. Ajustement pH du moût.

- **3.5 Préparation de l'inoculum (microorganismes):**

La levure est pré-cultivée en introduisant 1 g de souche de levure sèche *Saccharomyces cerevisiae* dans 100 ml d'eau distillée, contenant 12% de solution de saccharose (g), en agitant continuellement pendant 90 minutes et à $30\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2$



Figure 3.8. Réactivation de la levure.

3.6. Fermentation alcoolique:

Après ensemencement du milieu par la levure de boulanger *Saccharomyces cerevisiae* (1 g/L), le bioréacteur est plongé dans un bain-marie où la température est maintenue à $30 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$. 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 dégagé. Afin d'effectuer le suivi de l'évolution de la fermentation, on procède chaque 24h à des prélèvements pour réaliser les analyses physicochimiques. A la fin de chaque temps, le mout est filtré puis distillé afin d'extraire l'éthanol. La température de distillation est de l'ordre de 78°C .

Dispositif expérimental de la fermentation alcoolique est le suivant :



Figure 3.9. Dispositif expérimental de la fermentation alcoolique.

3.7 Distillation alcoolique

A la fin de la fermentation alcoolique on filtre le substrat fermenté pour faciliter la distillation alcoolique.



Figure 3.10: Filtration de moût fermenté.

Ce dernier est séparé de la liqueur par un système de distillation à plusieurs colonnes qui aboutit à un éthanol plus purifié. La température de distillation est de l'ordre de 78 °C.



Figure 3.11:Montage de la distillation alcoolique.

A la fin de cette expérience on va calculer le volume d'alcool produit et l'énergie produite.

Chapitre 04 :

Résultats et discussion

Chapitre 04 : Résultats et discussion

4.1 Introduction :

Dans ce chapitre, les principaux résultats obtenus lors de la réalisation des expériences, on va présenter.

L'interprétation des résultats obtenus : pH, Indice de réfraction, Degré alcoolique, Densité et le suivi de la production

Finalisant ce chapitre par la valorisation énergétique du bioéthanol produit.

4.2 L'évolution du pH :

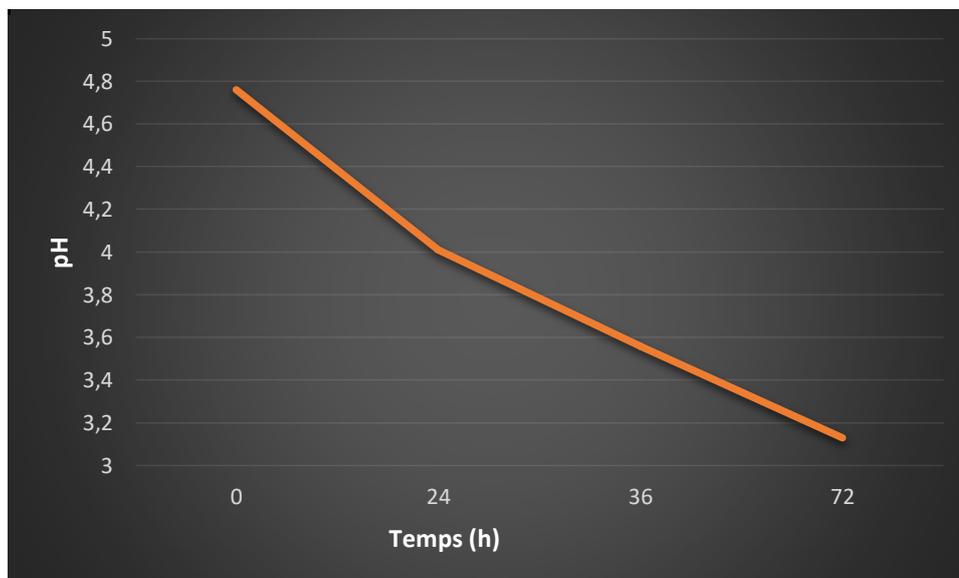


Figure 4.1: Evolution de pH lors d'une fermentation alcoolique.

Le maintien du pH cytoplasmique est indispensable à la survie de la levure et les limites de leur pH reportées dans la littérature se situent entre 2,4 et 8,6 avec un pH optimal entre 4,4 et 6,5 [40]. La nature de l'acide (forme dissociée ou non) a une grande importance. La Figure 4.1 montre une légère diminution du pH, cela est dû à la formation de l'alcool. Le pH c'est varié de 4,76 à 3,13 durant la fermentation alcoolique. Ces valeurs de pH sont inférieures à celles trouvées dans la première fermentation. Ce résultat montre que les levures peuvent supporter la plupart des acides organiques jusqu'à pH 4,5, par contre leur croissance est inhibée par de fortes concentrations en acides lactique, citrique et acétique et elles le sont encore plus avec

les acides sorbique et propénoïque. D'autres stress peuvent modifier ce pH comme il a été démontré par Jones et ses collaborateurs (1981) où le stress éthanolique provoque une chute du pH cytoplasmique, ce qui induit le décès cellulaire. Cette diminution du pH intracellulaire peut être due soit à un influx de protons [41], ou à une accumulation d'intermédiaires de la réaction tels que l'acide acétique, le glycérol [42].

4.4 Degré alcoolique :

L'évolution du degré alcoolique pendant la fermentation présente dans la figure suivante :

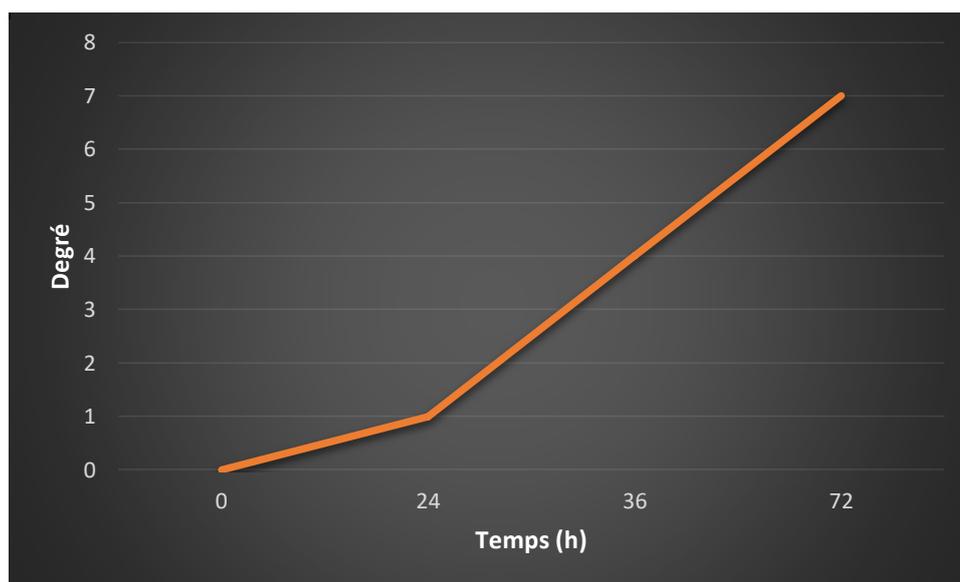


Figure 4.3. Evolution du degré alcoolique pendant la fermentation.

Les levures ne présentent pas les mêmes sensibilités au degré d'éthanol. Les plus résistantes sont les *Saccharomyces* que l'on utilise dans les procédés de fermentation alcoolique pour l'élaboration des boissons ou la fabrication d'éthanol industriel (la tolérance à l'éthanol dépend de la composition des membranes cytoplasmiques des cellules et en particulier des lipides. Cette composition dépendante elle-même du milieu de culture et de la température [43]. La diminution des paramètres microbiologiques, durant la fermentation montre que la cinétique du pouvoir fermentaire augmente. Cela peut s'expliquer par le fait que les souches des levures pour la présente étude semblent moins performantes. Simultanément, outre que les conditions de fermentation, d'autres facteurs tels que le pouvoir des levures qui continue à fermenter les sucres même en phase de déclin on favorisant le rendement [44].

4.5 Densité :

La Figure 4.4 représente une diminution remarquable de la densité de moût de dattes au cours du temps, pour les quatre souches étudiées elle varie de 0,9892 à 0,9598. Cela peut être expliqué par la transformation du glucose en alcool et la perte de masse sous forme de CO₂.

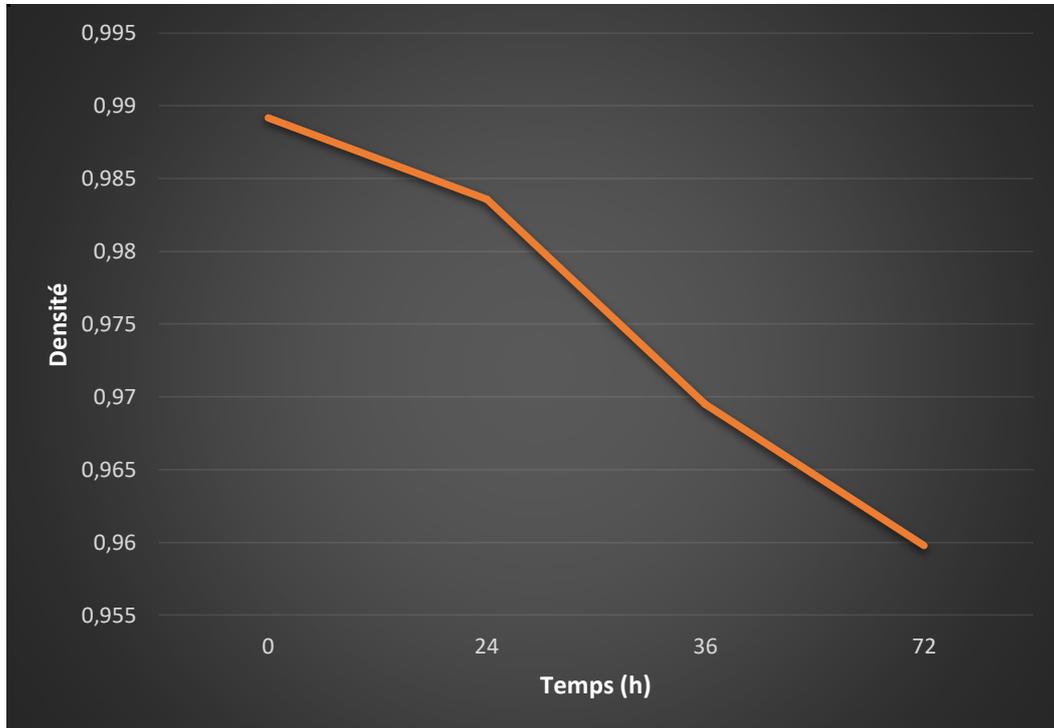


Figure 4.4. Evolution de la densité en fonction du temps de fermentation.

4.6 : Optimisation de la production alcoolique :

Après les analyses, nous avons atteint la production de bioéthanol conformément aux conditions de base avec les résultats indiqués dans le tableau suivant

Tableau4.1 : Les résultats finaux

pH	3.1
Indice de réfraction	1.341
Degré alcoolique	7
Densité	0.96
Volume	100 ml

4.7 Production d'éthanol en fermenteur:

Pour tester la capacité de éthanol à s'adapter aux conditions de scale-up (production en volume progressant), la souche est cultivée en fermenteur de 20 litres pour évaluer les paramètres suivants ; la croissance, consommation du substrat et la production d'éthanol, que l'éthanol est excrété pendant les premières 24h de fermentation et progresse pour atteindre un maximum de 14 g/L à 72h. À cet instant, tout le fructose est, complètement, consommé, aboutant à un rendement de 0,35g d'éthanol/g d'inuline ce qui enregistre une légère amélioration en comparaison à la culture en fioles.

Après cette période, l'éthanol chute brusquement. L'évolution de la biomasse, pendant la période de production, passe également par deux phases majeures: la phase exponentielle, où la majorité de la quantité d'éthanol est produite, suivie d'une phase de ralentissement où le maximum de biomasse (18g/L) est atteint à 120 heures. La cinétique globale de la production de l'éthanol dans le fermenteur de 20 litres révèle des valeurs supérieures à celles observées dans les fioles de 250 mL, ces résultats démontrent qu'éthanol s'adapte parfaitement aux conditions industrielles.



Figure 4.5.Extrait de bioéthanol 100ml.

4.8 Valorisation énergétique :

Bioéthanol est produit diverses formes d'énergie telles que la chaleur, l'électricité et les carburants de transport.

Il est utilisé pour alimenter les voitures et les moteurs, soit seuls, soit en mélange avec de l'essence ou d'autres carburants. L'éthanol comme carburant est le type de bioalcool le plus courant pouvant être utilisé pour les moteurs électriques, et il existe un intérêt croissant pour l'utilisation de l'éthanol au lieu de l'essence comme source importante de carburant pour les véhicules. L'essence est mélangée à de l'éthanol pour former un carburant appelé gazole.

L'éthanol est actuellement proposé aux automobilistes, soit pur (comme au Brésil), soit mélangé avec l'essence (entre 5 et 10 % en Europe).

Le pouvoir calorifique (PC) d'un composé combustible représente l'énergie dégagée par la combustion de ce dernier. Le bioéthanol est énergétique intéressant.

Pour éthanol pur, le pouvoir calorifique est de **27,5 kJ/m³**. Pour exploiter cette énergie doit connaître la quantité de la biomasse.

La combustion de l'éthanol dégage une énergie du même ordre de grandeur que celle de l'essence : **1.5 L** d'éthanol équivaut à **1L** d'essence.

On calcule l'énergie par la méthode suivante :

On utilise le volume expérimental de l'éthanol : **V=100 ml = 10⁻⁴ m³** des 3 jours de production pour les conditions du milieu culture : **70g** des déchets frais (66.5g palm sèche avec 3.5g macroalgue).

Énergie libérée pour 100ml d'éthanol :

Alors **E** (pour 100ml d'éthanol) = **PC x V = 27.5 x 10⁻⁴ = 0.00275 kJ** (pour **100ml d'éthanol**).

Et l'Énergie libérée pour **1m³ de bioéthanol = 27Kj**.

Nous appliquerons nos résultats à la voiture la plus courante dans les régions du sud, qui est *Hyundai-accent* qui porte les spécifications suivantes :

Caractéristiques moteur

Motorisation	Essence
Puissance fiscale	6 CV
Moteur	4 cylindres L, 12 soupapes
Cylindrée	1 341 cm ³
Puissance	86 ch à 5 500 trs/min
Couple	110 Nm à 3 000 trs/min
Type de suralimentation	Pas de suralimentation
Boîte de vitesse, Nb de rapports	Mécanique à 5 rapports
Roues motrices	AV
Performances / Consommation	
Vitesse maxi	170 km/h
0 à 100 km/h	12,50 sec
Consommation urbaine	8,40 L / 100 km
Consommation extra-urbaine	5,30 L / 100 km
Consommation mixte	6,40 L / 100 km
Volume du réservoir	45 L

- Le volume(x) d'éthanol équivalent au stock d'essence :

1L (Essence) → 1.5L (éthanol)

45L → X

X Volume du réservoir d'éthanol = $45 \times 1.5 = 67.5$ L

La quantité de biomasse

Calcule la quantité de biomasse palmes sèche et palmes sèche (Y)

- (Y) dont nous avons besoin pour le volume X :

$$70\text{g} \rightarrow 0.1 \text{ L}$$

$$Y \rightarrow 67.5 \text{ L}$$

$$Y = 70 \times 67.5 / 0.1 = 47.2 \text{ Kg (biomasse)}$$

- Pour la quantité d'eau on trouve

$$0.7 \text{ L} \rightarrow 0.1 \text{ L}$$

$$Y \rightarrow 67.5 \text{ L}$$

$$Y = 0.7 \times 67.5 / 0.1 = 472.5 \text{ L (eau)}$$

Grâce à notre expérience, il nous est devenu clair que nous pouvons économiser notre consommation d'essence en l'échangeant avec de l'éthanol ou en le mélangeant avec de l'essence, en fournissant l'environnement approprié pour cela et d'autres expériences futures.

CONCLUSION
ET
PERSPECTIVES

Conclusion générale

Actuellement, on donne un grand intérêt aux biocarburants en raison des coûts élevés des énergies conventionnelles et aux problèmes environnementaux. La biomasse lignocellulosique, considérant sa grande disponibilité et son faible coût, est la plus prometteuse pour la production du bioéthanol.

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

- ✚ Les substrats utilisés (Palmier dattier (palmes sèche) et macroalgue d'eau douce « bassin ».) peuvent devenir énergétiquement intéressant pour le processus de fermentation ;
- ✚ Les macroalgues présentes au niveau des eaux douces, ainsi que le palmier dattier sec, constituent un substrat favorable au lancement la fermentation (démarrage), permet à la production de bioéthanol de répondre aux normes.
- ✚ Après avoir fait la fermentation et la distillation, on peut produire ce type de carburant avec un degré de 7, un pH de 3,5 et un volume de 100 ml, puis j'ai cherché un générateur électrique qui fonctionne au bioéthanol.
- ✚ Pour l'application de la biomasse dans les carburants de transport, nous avons obtenu une quantité estimée d'énergie 27.5 Kj de 1 m³ d'éthanol
- ✚ Nous avons appliqué nos résultats à la Hyundai Accent, et les résultats ont été positifs et économiques, ce qui signifie que nous consommons 47.1 Kg de biomasse, Pour remplir le réservoir de la voiture

Alors nous prouvons que nous pouvons bénéficier une double valorisation partir un 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...).

BIBLIOGRAPHIE

- [1] DP Chynoweth, JM Owens et R. Legrand, «Méthane renouvelable issu de la digestion anaérobie de biomasse,» *Énergie renouvelable*, 22-2001, pp. 1-8.
- [2] HB Goyal, D. Seal et RC Saxena, «Biocarburants issus de la conversion thermo-chimique des énergies renouvelables ressources,» *une revue. Revues des énergies renouvelables et durables*, 2008, pp. 504-517.
- [3] «ETUDE TECHNIQUE POUR LA VALORISATION ÉNERGÉTIQUE DES MICROALGUES,» UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA DE BOUMERDES, Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Magister, 2009.
- [4] F. Chaa, Production du bioéthanol. Analyse et modélisation par la loi de Michaelis-Menten, MASTER ACADEMIQUE: Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, 2018/2019, p. p 2.
- [5] Sihem Tebbani Rayen Filali, Didier Dumur, Supelec, Filipa Lopes et Dominique Pareau, Biofixation de CO₂ par les microalgues Modélisation, estimation et commande, ISTE, 2014.
- [6] «Cultiver des macroalgues dans votre aquarium d'eau de mer,» <https://fr.point.pet/cultiver-des-macroalgues-dans-votre-aquarium-deau-de-mer/>, 2018. [En ligne].
- [7] Cadoret, J. et Bernard, O, La production de biocarburant lipidique avec des microalgues, promesses et défis *Journal de la Société de Biologie*, 2008, pp. 201-211.
- [8] T. M. Mata, A. A. Martins et N. S. Caetano, "Microalgae for biodiesel production and other applications: A review," vol. 14, *Renew. Sustain. Energy Rev*, jan 2010, p. 217–232.
- [9] . Zeng, X, Danquah, M. K et Chen, X. D. & Lu, Y, Microalgae bioengineering: from CO₂ fixation to biofuel production *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, pp. 3252- 3260.

- [10] J. Legrand, Les microalgues pour quoi faire?, 2002.
- [11] S. GARON-LARDIERE, Etude structurale des polysaccharides pariétaux de l'algue rouge *Asparagopsis armata* (Bonnemaisoniales), UNIVERSITÉ DE BRETAGNE OCCIDENTALE: Thèse de doctorat, 02-2004, p. 17.
- [12] M. A. Tarik, Valorisation de la biomasse algale du Maroc :Potentialités pharmacologiques et Applications environnementales, Université Hassan II – Casablanca: cas des algues brunes *Cystoseira tamariscifolia* et *Bifurcaria bifurcata* ; Thèse de doctorat, 05-2011, p. 25.
- [13] «Les algues, des ingrédients super-protéïnés aux mille vertus,» <http://www.proteinesfrance.fr/en/node/86>, 29/09/2020. [En ligne].
- [14] Carlsson A.S, Van Beilen J.B, MOLLER R et CLAYTON D, «Micro- and macro algae: utility for industrial application,» 2007.
- [15] C. Dejoye, Eco-Extraction et analyse de lipide de micro-algues pour la production d'algocarburant thèse de doctorat,, université D'AVIGNON ET DES PAYS DE VAUCLUSE, 2013, pp. 49-177.
- [16] BENEMANN J.R, TILLET D et WEISSMAN J.C, «Microalgae Biotechnology,» 1987.
- [17] Benzidane D. , Baba Hamed M.B. et Abi-Ayad S.-M. E., «Biodiesel production from marine microalgae *Nannochloropsis gaditana* by in situ transesterification process.,» African Journal of Biotechnology, 2017.
- [18] Beer L.L. , Boyd E.S, PETERS J.W et Posewitz M.C , Engineering algae for biohydrogen and biofuel production, vol. 20, 2009.
- [19] S. Alan.H, 'bio fuels Production, application and développement', CAB international, 2009.
- [20] K. K, Contribution à l'étude des propriétés thermo-physiques des biocarburants de, Ecole Militaire Polytechnique (EMP), Soutenue le 13 décembre 2016, pp. 1-131.
- [21] O. K. T., Mise en valeur des dérivés de dattes de la région d'Oued Souf, Université Kasdi Merbah Ouargla, 16/05/2017, pp. 1-81p.
- [22] A. GRDF, «Etude De Marché De La Méthanisation Et Des Valorisation Du,» Septembre 2010..

- [23] «techno-science.net,» 2021. [En ligne].
- [24] «Société Chimique de France (SCF),» [En ligne].
- [25] « American Chemical Society (ACS),» [En ligne].
- [26] L. Mertens et J. Roiz , Les biocarburants non conventionnels : quelles opportunités pour la Belgique en 2020, Secrétariat ValBiom - Chaussée de Namur, 2010, pp. Pp, 9..
- [27] I. Didderen , . J. Destain et . P. Thonart, Procédés de bioconversion en éthanol. In :Le bioéthanol de seconde génération. La production d'éthanol à partir de biomasse lignocellulosique, Gembloux, Belgique. Les Presses Agronomiques de Gembloux,, 2008, pp. pages 21-56.
- [28] A. A, Les implications du développement des biocarburants. Thèse de doctorat, paris: Ecole doctorale 513 Droit Et Sciences Politiques, économiques et de Gestion Nice, 2013, p. 229 pages.
- [29] Touzi A et Azbbès N, Avant-projet de Réalisation d'Unité de Production de Bioalcool, Lab. Biotech, Dans les Wilayas de Biskra, Adrar et Ghardaïa, Algérie: Rapport Intern, 1988, p. 56pages.
- [30] Escobar, J. C, Lora E. S, Venturini, O. J, Yanez, E. E, Castillo, E. F et Almazan, O, Biofuels: Environment, technology and food security, Renew Sust Energy Reviews, 2009, pp. 1275-1287..
- [31] A. Demirbas, Biofuels sources, biofuel policy, biofuel economy and global biofuel projections, Energy Conver Manage, 2008, pp. 2106-2116.
- [32]]. R. J, intensification de la bière « fermentation alcoolique »des substrats betteraviers et autre substrats pour la production d'éthanol. Thèse de doctorat, Université de Toulouse. France: Thèse de doctorat, 2012, pp. ,177pages..
- [33] Isabelle D, Jacqueline D et Philippe T, «la production de bioéthanol à partir de biomasse lignocellulosique,» janvier/février 2010. [En ligne].
- [34] A. S, .valorisation biotechnologique des dates de faible valeur marchande par la production de la levure boulangère acide citrique, École nationale supérieur d'agronomie El-Harrach Alger, Algérie: Thèse de doctorat, 2013, p. 171 pages.
- [35] Brodeur C, Cloutier J, Crowley D, Desmeules X et Pigeon S, La production d'éthanol à partir de grains de maïs et de céréales, Centre de référence en

agriculture et agroalimentaire du Québec, 2008.

- [36] Bougherda F. Z et Kebir O.E, Étude comparative du rendement du bioéthanol de deux variétés de dattes communes de faible valeur commerciale (Teggazaet Lebghel) de la région d'Adrar, université houari Boumediene, 2013, p. Pp16..
- [37] R. Absi, Analyse de la diversité variétale du Palmier Dattier (*Phoenix dactylifera* L.), Cas des Ziban (Région de Sidi Okba): Mémoire de l'obtention du diplôme de magister Université Mohamed Kadir Biskra Alger., 2013.
- [38] Adrar: DSA-statistique, Direction des Servies Agricoles, 2020.
- [39] Boulal A, Benbrahim Z, Benali B et Ladjel S, Etude comparative de rendement de la production d'éthanol de deux variétés de dattes communes de faible valeur commerciale (Tinaceur et Aghmou), Sud- Ouest de l'Algérie: Revue des Energies Renouvelables, 2013, pp. 539- 550.
- [40] jones et W. H., Freemon, J. E., & Goswick, «The persistence of loneliness: Self and other determinants,» 1981.
- [41] Birch et Walker, «Enzyme and Microbial Technology,» 2000.
- [42] Ferreira et C. E. L., Floeter, S. R., Gasparini, «Trophic structure patterns of Brazilian reef fishes,» a latitudinal comparison., 2004.
- [43] L. J. Y et . et Bouix, «. Etude des conditions extrêmes de croissance des levures osmophiles,» Ind. Alim. Agric, 1979.
- [44] P. Munier, «Techniques Agricoles et Productions Tropicales,» 1973.