

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE: Sciences et technologies

Département : Génie des procédés

Spécialité : Génie chimique

Mémoire

Présenté dans le cadre de l'obtention du diplôme de Master en Génie Chimique

Thème

Production du biodiesel à partir des huiles de friture usagée et des algues

Réalisé par :

Katia KEDRI

Fatma Zohra NESSAH

Devant le jury composé de :

Mme BOUGHERARA Saliha

Mme LECHEB Fatma

Mme LARID Roza

Promotrice

Présidente de jury

Membre de jury

Année Universitaire 2019/2020

Résumé :

Ces dernières années, en raison de la baisse de pétrole et des conséquences environnementales de la consommation de diesel fossile, la production de carburants alternatifs a fait l'objet d'une large attention. Le biodiesel est un remplaceant de dérivé du pétrole d'origine fossile, il est produit à partir des différentes matières premières, soit à partir d'huiles végétales comme " l'huile de tournesol, l'huile de palme, l'huile de colza, l'huile d'arachide" ou bien des huiles de cuisson usagées ou de graisses animales.

Ce biocarburant est une ressource énergétique renouvelable, biodégradable, propre et non toxique, il peut créer des émissions moins dangereuses, et moins polluantes pour l'environnement.

Dans notre travail, nous nous sommes intéressés à la production de biodiesel à partir des huiles de fritures et des algues. L'huile d'algue est une source intéressante qui a une grande capacité de production de biodiesel de bonne et de haute qualité.

Mot clés : Biocarburant, Biodiesel, les huiles de fritures, les algues, les microalgues...

Abstract:

In recent years, due to the decline in oil and the environmental consequences of fossil diesel consumption, the production of alternative fuels has received a great deal of attention. Biodiesel is a substitute for petroleum derivatives of fossil origin that is produced from different raw materials, either from vegetable oils such as 'sunflower oil, palm oil, rapeseed oil, peanut oil', or used cooking oils or animal fats. This biofuel is a renewable, biodegradable, clean and non-toxic energy resource, it can create less dangerous emissions, and less polluting for the environment, no toxic waste during its combustion. In our work, we have been interested in the production of biodiesel from frying oils and algae. Algae oil is an interesting source that has a large capacity for the production of good and high quality biodiesel.

Keywords: *Biofuel, Biodiesel, frying oils, algae.micro-algae*

ملخص

في السنوات الأخيرة ، بسبب انخفاض النفط والعواقب البيئية لاستهلاك الديزل الأحفوري ، حظي إنتاج الوقود البديل باهتمام كبير. وقود الديزل الحيوي هو بديل للمشتقات البترولية من أصل أحفوري والذي يتم إنتاجه من مواد خام مختلفة ، إما من الزيوت النباتية مثل "زيت عباد الشمس وزيت النخيل وزيت بذور اللفت ، زيت الفول السوداني " ، أو زيت الطهي المستعمل أو الدهون الحيوانية. هذا الوقود الحيوي هو مصدر طاقة متجدد وقابل للتحلل البيولوجي ونظيف وغير سام ، ويمكن أن يخلق انبعاثات أقل خطورة ، وأقل تلويثاً للبيئة ، ولا نفايات سامة أثناء احتراقه. في عملنا نهتم بإنتاج وقود الديزل الحيوي من زيوت الطهي والطحالب. يعتبر زيت الأعشاب البحرية مصدراً مثيراً للاهتمام وله قدرة كبيرة على إنتاج وقود حيوي جيد وعالي الجودة.

الكلمات المفتاحية: الوقود الحيوي، وقود الديزل لالحيوي، زيوتالقلي، الطحالب، الطحالب الدقيقة

Remerciement

A ma famille

J'exprime tout mon remerciement chaleureux à ma famille qui m'a toujours supporté et leur confiance à moi, et pour m'avoir permis de poursuivre mes études dans les meilleurs conditions. Votre présence et vos encouragements sont pour moi les piliers fondateurs de ce que je suis et de ce que je fais.

« Que Dieu vous protège et vous prête bonne santé et longue vie »

A madame S. BOUGHERRA

Je vous remercie d'avoir accepté d'être notre promotrice, de diriger notre travail et de nous avoir suivie et encouragée pendant tous ces jours là.

Merci pour votre aide et vos conseils avisés tout au long ce travail

Je remercie bien évidemment

Les membres de jury qui ont accepté avec amabilité d'examiner notre travail.

Mes sincères Remerciement pour tous les enseignements de ST département génie des procédés

Katia

Remerciement

Tout d'abord, je tiens à remercier Allah de nous avoir donné la santé, la volonté et la patience pour poursuivre notre carrière scolaire et pour pouvoir réaliser ce travail.

Je tiens à exprimer mes profonds remerciements notre encadreur Mme S. Bougherara qui nous a fourni le sujet de ce mémoire et nous a guidés de ses précieux conseils et suggestions, et la confiance qu'elle nous a témoignés tout au long de ce travail.

Je tiens à gratifier aussi les membres de jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail.

Mes sincères Remerciement pour tous les enseignements de ST département génie des procédés

Je souhaite remercier tout particulièrement ma famille pour m'avoir facilité la vie et me donner tout ce que j'en avais besoin pour réussir dans mes études et de me guider et soutenir pendant tout mon parcours académique.

En fin, j'adresse mes sincères sentiments de gratitude et de reconnaissances à toute les personnes qu'ont participé de près ou de loin dans tout la période de mes études.

Fatma zohra

Dédicace

Je dédie ce travail

A mon père, mon pilier, merci d'avoir toujours été là pour moi

A ma mère merci pour votre soutien inconditionnel, vous m'avez toujours soutenue dans les moments difficiles, ce qui m'a permis de garder confiance en moi

A MES FRÈRES merci pour votre amour, Pour tous vos sacrifices

« Que Dieu vous protège et vous prête bonne santé et longue vie »

A mes amies LEILA RADIA KARIMA HANIA tous les souvenirs passés et

à venir sont chers à mon cœur

« Que notre amitié dure pour toujours »

A tous les professeurs qui m'ont enseigné.

Katia

Dédicace

À la bougie qui claire les ténèbres de ma vie, mon âme sœur et ma compagne de vie « ma chère mère ».

À mon cœur battant après la mort, l'homme de ma vie que je prie Allah de le pitié et de lui accord son paradis « mon cher père ».

À mes chers frères qui ont toujours été un soutien et une fierté dans ma vie « Mohammed, Ayoub et Brahim ».

À mes plus belles sœurs au monde qui ont partagé avec moi les larmes avant les sourires et me poussée vers la réussite mes chères « Abla, Khadidja, Meriem et Hadjer ».

À mes belles fleurs «Zahra, Khadidja, Mazouna et feriel » et toute personne partagé avec moi un sourie ou un beau souvenir.

Fatma Zohra

TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES.....	I
LISTE DES TABLEAUX.....	II
LISTE DES ABREVIATIONS.....	III
GLOSSAIRE.....	IV
INTRODUCTION.....	1
Chapitre I	SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE
I.1. Généralités sur les biocarburants	3
I.1.1.Les biocarburant	3
I.1.1.1.Les biogaz	3
I.1.1.2. Le bioéthanol	4
I.1.1.3.Le biodiesel (biogazol)	4
I.1.1.4.La bio-huile (bio-oil)	4
I.1.2.Classification des biocarburants	4
I.1.2.1.Les biocarburants de première génération	5
I.1.2.2. Les biocarburants de deuxième génération	5
I.1.2.3.Les biocarburants de troisième génération	6
I.2. Généralités sur les biodiesels	6
I.2.1.Situation du biodiesel en Algérie	6
I.2.2. Définition de biodiesel	7
I.2.3.La production du biodiesel	8
I.3. Les huile de friture usagée	9
I.3.1. Introduction	9
I.3.2. Définition des huiles végétales alimentaires	10
I.3.3. Définition des huiles de friture	11
I.3.4. Composition des huiles de friture	11

Table des matières

I.3.5.Dégradation des huiles de friture	11
I.3.6. Différentes huiles commercialisées en Algérie et leur composition	12
I.3.7. Paramètres physico-chimiques des huiles végétales de friture usagées	13
I.3.7.1 Densité spécifique	13
I.3.7.2 Viscosité	13
I.3.7.3. Pouvoir calorifique	13
I.3.7.4. Point de congélation	14
I.3.7.4. Point de congélation	14
I.3.7.5.Point d'inflammation	14
I.3.7.6. Point d'éclair (PE)	14
I.3.7.7. Indice de peroxyde(IP)	14
I.3.7.8. Indice d'iode (ID)	15
I.3.7.9. Indice d'acidité (IA)	15
I.4. Les algues	15
I.4.1.Introduction	15
I.4.2.Définition des algues	16
I.4.3.Classification des algues	16
I.4.3.1. Les algues vertes (Chlorophycées)	16
I.4.3.2. Les rhodophytes ou algues rouges	17
I.4.3.3.Les algues brunes (Phéophycées).....	17
I.4.3.4.Les cyanobactéries ou les algues bleues	18
I.4.4.Compositions Chimiques des algues	18
I.4.5.Les macroalgues	19
I.4.6.Les microalgues	20
I.4.7.Avantages et inconvénients de l'utilisation des algues pour produire du biodiesel...	21
I.4.7.1.Les avantages	21
I.4.7.2.Les inconvénients	21

Chapitre II

Les travaux réalisés

II.1.Travaux réalisés sur la production de Biodiesel à partir d’huile de friture	23
II.2. Travaux réalisés sur la production de biodiesel à partir des algues.....	25
Conclusion	31
Liste des références	32

Liste des figures

Figure I.1 : Schématisation de la production des biocarburants.....	3
Figure I.2 : Biocarburant de première génération.....	5
Figure I.3 : Biocarburant de deuxième génération.....	6
Figure I.4 : cycle de vie du biodiesel à partir les huiles usagées.....	9
Figure I.5 : cycle de vie du biodiesel produit à partir des microalgues.....	9
Figure I.6 : Structure générale d'une huile végétale. R1, R2, R3 désignent des chaînes d'acides gras.....	10
Figure I.7 : Structure générale d'acide linoléique.....	11
Figure I.8 : Réactions croisées intervenant dans l'huile lors de son utilisation en friture.....	12
Figure I.9 : Différentes marques d'huiles végétales alimentaires sur le marché Algérien.....	12
Figure I.10 : Les algues vertes (Chlorophycées).....	17
Figure I.11 : Les rhodophytes ou algues rouges.....	17
Figure I.12 : Les algues brunes (Phéophycées).....	18
Figure I.13 : Les cyanobactéries ou les algues bleues.....	18
Figure I.14 : les macroalgues.....	20
Figure II.1 : le processus général de production de biodiesel à partir d'algues.....	26
Figure II.2 : Souche de <i>Chlorella sorokiniana</i>	42
Figure II.3 : Étapes de la production de biodiesel à partir de la biomasse algale.....	30

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Compositions des huiles alimentaires fabriquées en Algérie.....	12
--	-----------

Liste des abréviations

IFP : Institut Français du Pétrole

CEA : Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives

ASTM : American Society for Testing and Materials.

cSt : Un centistoke

DOC : Carbone organique dissous

TAP : Tri Acétate Phosphate

N : Nitrogen (Azote)

GC : chromatographie en phase gazeuse

Fame : esters méthyliques d'acides gras

SPSS: Paquet Statistique pour les sciences sociales (Statistical Package for the Social Sciences).

TAG : Triacylglycérols

DAG : Diacylglycérols

FFA: Acides gras libres (free fatty acids)

Glossaire

Photosynthèse: La photosynthèse est une réaction biochimique énergétique qui se déroule chez les plantes son but principale et de créer de l'énergie (sous forme de glucide) à partir de l'énergie lumineuse provenant du soleil. Les organismes qui utilisent le mécanisme de photosynthèse sont autotrophes car ils fabriquent des matières organiques à partir de matières inorganiques.

Autotrophes : est un organisme qui se nourrit de lui-même et peut synthétiser des glucides à partir de composés minéraux.

Centrifugation: est une technique qui applique la force centrifuge pour séparer les particules de la solution en fonction de la taille, la forme, la densité, la viscosité du milieu et la vitesse de décomposition de la solution. Le mélange à séparer peut être constitué soit de deux phases liquides, soit de particules solides en suspension dans un fluide.

Analyse gravimétrique : est une méthode d'analyse chimique quantitative qui permet de trouver soit la nature d'un composé (par la quantité de l'un de ses ions), soit la quantité d'une substance dans un mélange.

La transestérification : est la technique classique de production de biodiesel. Il s'agit d'un procédé dans lequel les huiles végétales, les graisses animales ou les huiles à base de microalgues sont mélangées à froid à un alcool (éthanol ou méthanol) en présence d'un catalyseur (hydroxyde de sodium ou de potassium). La transformation des huiles ou des graisses en esters éthyliques ou méthyliques permet de réduire la masse moléculaire à un tiers de celle de l'huile, de réduire la viscosité d'un facteur huit, de réduire la densité et d'augmenter la volatilité. Les propriétés physiques des esters éthyliques et méthyliques obtenus lors de la réaction de transestérification sont alors proches de celles du diesel.

Agar : L'agar-agar est une substance mucilagineuse transparente. On l'obtient à partir de certaines espèces d'algues rouges du genre Gelidium.

Milieu synthétique : Ce sont des milieux dont on connaît exactement la composition chimique, tant d'un point de vue qualitatif que quantitatif.

Introduction

Au cours de ces dernières années, le carburant est devenu le plus consommé par les industries et le transport, ce qui conduit à une augmentation de la pollution d'air, à une concentration des émissions de gaz à effet de serre (NO_2 , CO_2 , O_3 ,...) y compris l'impact sur le réchauffement climatique. De là, ils ont pu trouver l'alternative qui est le Biocarburant.

Ces biocarburants sont produits à partir de matières organiques renouvelables non fossiles dérivées de la biomasse, principalement produits à partir de matières végétales (tournesol, pomme de terre, betterave, blé, maïs, colza, canne de sucre...), il existe trois générations de biocarburants, dont les biocarburants de première génération sont de deux types : le bioéthanol qui est produit à partir des céréales ou de canne à sucre et le biodiesel qui est produit à partir l'huile de palme, l'huile de colza...etc.

Les biocarburants de deuxième génération sont issus de source ligno-cellulosique (tiges, plantes, bois, feuilles, paille, etc.). Et les biocarburants de troisième génération qui sont appelés les algocarburants, sont principalement produits à partir des algues (soit les microalgues ou bien les macro-algues) car elles sont naturellement riches en huile.

Les biocarburants permettent de réduire les émissions de gaz à effet de serre et améliore la qualité de l'air.

Le biodiesel est l'un des exemples de biocarburants conçus pour combiner ou remplacer les carburants connus et réduire la pollution due aux carburants dérivés du pétrole, la méthode générale utilisée pour la production de biodiesel est la transestérification, car c'est l'une des méthodes les plus importantes pour convertir l'huile végétale en diesel en raison du faible coût et le simple processus. Il s'agit d'un procédé de mélange d'huile végétale, de graisse animale ou d'huile à base de microalgues avec de l'alcool (éthanol ou méthanol) en présence d'un catalyseur.

Parmi les matières premières utilisées pour la fabrication de biodiesel on trouve les huiles usées (les huiles de fritures). Les bienfaits de la transformation des huiles usées en biodiesel c'est qu'il permet d'empêcher de s'écouler dans les réseaux d'assainissements et protégeant ainsi les stations d'épuration et l'environnement en évitant la pollution.

Ces dernières années, plusieurs chercheurs se sont basés sur la production de biodiesel à partir des algues, car elles ont une grande capacité de produire de biodiesel de haute et de bonne qualité en raison de sa richesse en acide gras et un rendement en lipide plus élevé.

Ce travail comporte deux parties essentielles:

- Une partie théorique comportant des notions générales sur les biocarburants, le biodiesel, les huiles de fritures usées et les algues.
- Une deuxième partie qui est une revue bibliographique sur les travaux réalisés sur la production de biodiesel à partir des algues et des huiles de fritures usées.
- La partie pratique ne figure pas dans ce manuscrit, vue la situation relative à la pandémie qui a envahi le monde entier.

Ce travail est finalisé par une conclusion générale.

Chapitre I

Les biocarburants

I.1.Généralités sur les biocarburants

I.1.1.Les biocarburants

Les biocarburants sont des carburants liquides ou gazeux produits à partir de matières végétales et de résidus, comme les cultures agricoles, les déchets municipaux et les sous-produits de l'agriculture et de la sylviculture. Les biocarburants peuvent remplacer complètement ou en partie, dans le cas d'un mélange, les carburants classiques dans les moteurs des véhicules. Un combustible liquide ou gazeux utilisé pour le transport est produit à partir de la biomasse ». La Biomasse « Fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture, de la sylviculture, des déchets industriels et municipaux »[1].

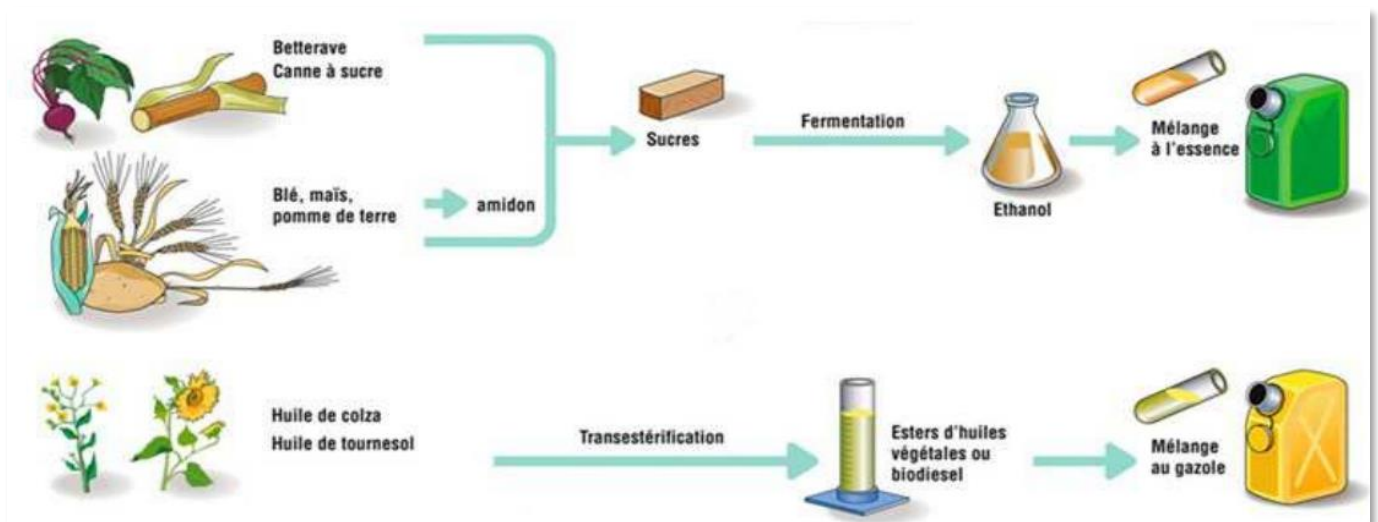


Figure I.1 : Schématisation de la production des biocarburants.

Source : IFP énergies nouvelles.

I.1.1.1.Les biogaz

Les biogaz sont les produits gazeux obtenus à partir de la biomasse par différents procédés ; ils sont produits par fermentation (digestion microbienne en l'absence d'oxygène) de la matière organique. Il en résulte principalement la production du méthane (molécule combustible dans le gaz naturel), du monoxyde de carbone et de l'hydrogène[2].

I.1.1.2. Le bioéthanol

Le bioéthanol provient de la fermentation alcoolique de sucres simples par des levures ; les sucres simples doivent être obtenus à partir de la biomasse. Les sources de la matière première pour la fabrication du bioéthanol sont [2] :

- Les sucres simples ou amidon hydrolysé (dégradé) provenant de plantes consommables (canne à sucre, maïs, etc.) ; ce sont des agro-carburants [2].
- Les débris végétaux de toute sorte (résidus forestiers, copeaux issus de scieries ou de papeteries, etc.) riches en cellulose (éthanol cellulosique) ; la cellulose peut être hydrolysée en sucre simple fermentable[2].

I.1.1.3.Le biodiesel (biogazol)

Le biodiesel est un biocarburant destiné à être utilisé dans les moteurs Diesel et provient de la conversion de lipides (huiles végétales et graisses animales) en carburant[2].

Les sources de matière première les plus utilisées pour la fabrication du biodiesel sont[2] :

- Les huiles végétales, vierges ou usées ; il s'agit aussi d'un agro-carburant.
- Les huiles extraites d'algues ou de microalgues (algo-carburant).
- Les graisses animales (relativement peu utilisées).

I.1.1.4.La bio-huile (bio-oil)

La bio-huile est un mélange complexe qui contient une grande variété de composés de différentes classes chimiques, tels les acides carboxyliques, les esters, les alcools, les aldéhydes, les cétones, les phénols, les alcènes et les aromatiques. En outre, les bio-huiles sont faciles à stocker et à transporter et peuvent être utilisées comme un biocarburant ou pour la fabrication de produits chimiques de grande valeur[3].

I.1.2.Classification des biocarburants

Les biocarburants sont, en général, classés en deux catégories de produits dits primaires et secondaires. Les biocarburants primaires, comme le bois, sont utilisés sous leur forme brute : Ils ne subissent aucun traitement et ils sont dédiés principalement à la production de la chaleur (chauffage) ou de l'électricité. Les biocarburants secondaires tels l'éthanol et le biodiesel, sont produits à partir du traitement de la biomasse et ont un large éventail d'applications, à l'instar du transport et des procédés industriels opérant à hautes températures[2].

I.1.2.1. Les biocarburants de première génération

Un biocarburant de première génération est un agro-carburant produit à partir de cultures destinées traditionnellement à l'alimentation, plus spécifiquement les organes de réserves des plantes oléifères ou encore à sucres[2].

Ils sont principalement de deux types :

- **le bioéthanol** : il est produit à partir de canne à sucre, de céréales et de betterave sucrière. Il est utilisé dans les moteurs essence[4].
- **le biodiesel** : il est dérivé de différentes sources d'acides gras, notamment les huiles de soja, de colza, de palme et d'autres huiles végétales. Il est utilisé dans les moteurs diesel[4].

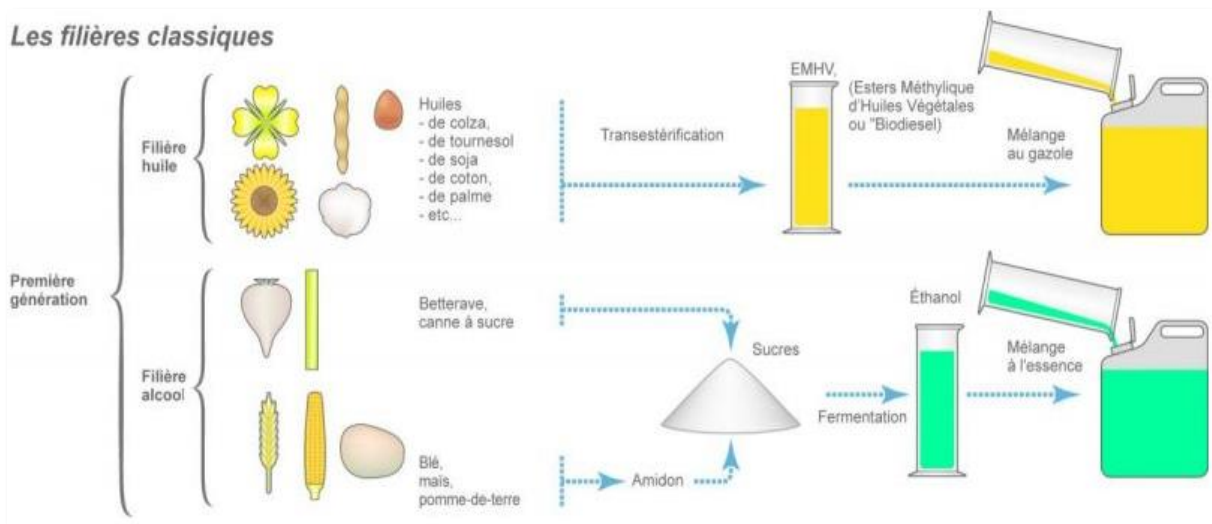


Figure I.2: Biocarburant de première génération

(©DR, d'après source IFP)

I.1.2.2. Les biocarburants de deuxième génération

Des technologies sont actuellement mises au point pour exploiter les matières cellulosiques telles que le bois, les feuilles et les tiges des plantes ou celles issues de déchets. On qualifie ces matières de biomasse lignocellulosique car elles proviennent de composants ligneux ou à base de carbone qui ne sont pas directement utilisés dans la production alimentaire. Ces caractéristiques présentent un avantage de disponibilité supérieure et de non concurrence alimentaire par rapport à la première génération de biocarburants [4].

Cette technologie permet de produire du bioéthanol dit de deuxième génération, du biodiesel, du biohydrogène ou du biogaz[4].

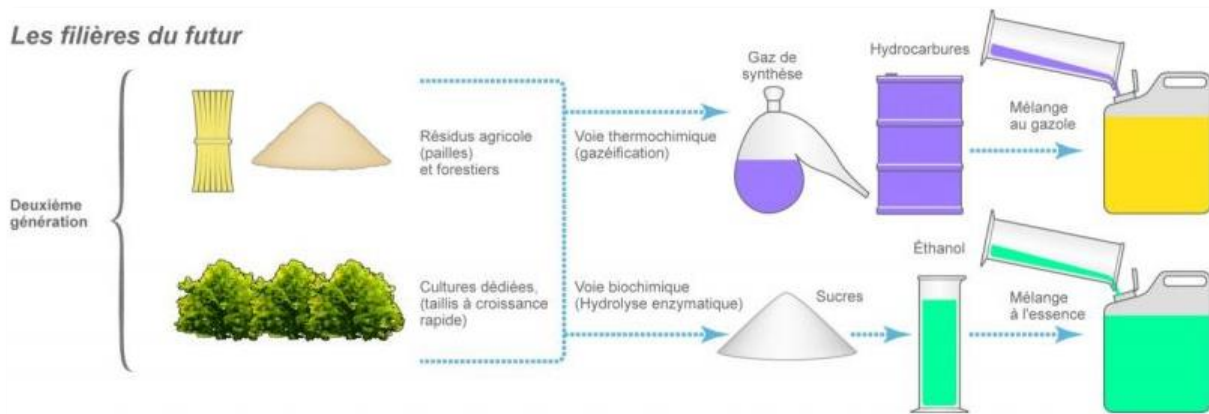


Figure I.3 : Biocarburant de deuxième génération

(©DR, d'après source IFP)

I.1.2.3. Les biocarburants de troisième génération

Les biocarburants dits de troisième génération, dérivés de microbes et de micro-algues, s'imposeraient comme une issue exemptée des principaux inconvénients propres aux biocarburants de première et de deuxième générations[2]. Celles-ci peuvent accumuler des acides gras permettant d'envisager des rendements à l'hectare supérieurs d'un facteur 30 aux espèces oléagineuses terrestres. A partir de ces acides gras, il est possible de générer du biodiesel. Certaines espèces de microalgues peuvent contenir des sucres et ainsi être fermentées en bioéthanol. Enfin, les microalgues peuvent être méthanisées pour produire du biogaz. Certaines d'entre elles peuvent également produire du biohydrogène[4].

I.2. Généralités sur les biodiesels

I.2.1. Situation du biodiesel en Algérie

L'Algérie est située dans une zone vulnérable aux effets néfastes des changements climatiques dus à la pollution et aux déséquilibres environnementaux. Aujourd'hui, consciente de l'intérêt grandissant des énergies renouvelables et de leurs enjeux, l'Algérie a intégré le développement de ce type d'énergies dans sa politique énergétique. L'adoption d'un cadre juridique favorable au développement de ces énergies, la réalisation d'importantes infrastructures dans ce domaine et la planification de projets en sont la parfaite illustration malgré un développement de la bioénergie encore à l'échelle expérimentale dans les laboratoires de recherche. Dans le cadre du développement des travaux de biotechnologie, le Haut-commissariat à la Recherche avait inscrit en 1988 un axe de recherche s'articulant sur

l'application des biotechnologies pour la valorisation des déchets agricoles et industriels pour la production de bioéthanol, l'utilisation de la biomasse pour la production d'acétone-butanol et enfin, la production de biogaz [5].

En ce qui concerne les cultures énergétiques, matières premières pour la production des biocarburants, dans le cas de l'Algérie, il n'est pas possible d'avoir recours à des sources comestibles pour cette tâche. Il serait alors plus judicieux de se retourner vers les biocarburants de deuxième génération produits à partir de sources non alimentaires, de la cellulose et de déchets [5].

La réglementation sur les biocarburants en Algérie s'inscrit dans le cadre du programme national pour la promotion des énergies renouvelables qui a pour objectifs[5] :

- De protéger l'environnement, en favorisant le recours à des sources d'énergie non polluantes.
- De contribuer à la lutte contre le réchauffement climatique en limitant les émissions de gaz à effet de serre.
- De participer à un développement durable par la préservation et la conservation des énergies fossiles.
- De contribuer à la politique nationale d'aménagement du territoire par la valorisation des gisements d'énergies renouvelables, en généralisant leurs utilisations.

I.2.2. Définition de biodiesel

Le biodiesel est un biocombustible biodégradable et une alternative écologique au diesel [6].

Le biodiesel est produit par transformation d'huiles d'origine végétale, animale ou usée en esters allyliques. Il permet de réduire les émissions de CO₂ atmosphérique, puisque théoriquement la matière végétale utilisée pour produire du biodiesel, consomme (par photosynthèse) du CO₂ durant sa croissance. Par ailleurs, l'utilisation du biodiesel dans les moteurs peut réduire également les émissions de dioxyde d'azote (NO₂)[7].

Le biodiesel est élaboré à partir de substrats riches en matières grasses tels que les huiles végétales, les huiles de cuisson usées et le gras animal. Les huiles végétales utilisées sont extraites de plantes oléagineuses cultivées spécifiquement pour leurs grains ou pour leurs fruits riches en matière grasse. Au Canada, ces plantes oléagineuses sont principalement le canola, le soya et le tournesol. Ces dernières contiennent typiquement entre 15 et 50 % d'huile[8].

Les huiles végétales peuvent également être utilisées directement dans les moteurs diesel comme substitut au pétrodiesel. Alors que le biodiesel résulte d'un procédé de transestérification de la matière grasse, << l'huile végétale-carburant >> est utilisée à l'état brut et provient simplement d'un procédé de filtration et de décantation permettant d'obtenir de l'huile végétale pure (HVP). L'huile végétale pure peut être produite en filière courte à petit échelle, par exemple à l'échelle d'une ou de quelques fermes. Toutefois, son utilisation dans les moteurs diesel se fait au risque de voir les garanties des fabricants invalidées[8].

I.2.3. La production du biodiesel

Le biodiesel peut être produit à partir des huiles d'une très large gamme d'espèce végétale oléagineuse. Cependant en ce qui concerne la première génération de biodiesel, seules quelques espèces végétales sont rentables pour une utilisation relativement réduite comme carburant. Par ailleurs il est possible de produire du biodiesel à partir de graisse animale, d'huile usagée et les algues ; mais la faible quantité disponible de ces matières premières compromet une production à grande échelle. La production de biodiesel à partir de produits agricoles oléagineux comprend deux phases de traitement[9] :

- La première phase est identique à celle requise pour la consommation humaine, elle consiste en l'extraction d'huile par pressage (à chaud ou à froid) ou par extraction à l'aide de solvant.
- La seconde phase, consiste en la transformation de l'huile en biodiesel par Trans estérification ; un procédé chimique qui, à l'aide d'un alcool, permet d'obtenir des composés d'ester (composante principale de biodiesel).

La production de biodiesel à partir de grains oléagineux génère deux types de coproduits. D'une part, nous avons les tourteaux oléagineux résidus solides de la trituration des grains qui représente 50 % à 75 % de la masse des grains. La valeur économique de ces coproduits est fonction de leur teneur en protéines qui varie d'une espèce à une autre. Les revenus dégagés par la vente des coproduits permettent d'amortir le coût de revient du biodiesel, au vu de l'importante quantité de tourteaux générée. D'autre part, le glycérol un liquide qui connaît plusieurs applications, notamment pour la fabrication de produits pharmaceutiques et cosmétiques [9].



Figure I.4 : cycle de vie du biodiesel à partir les huiles usagées.

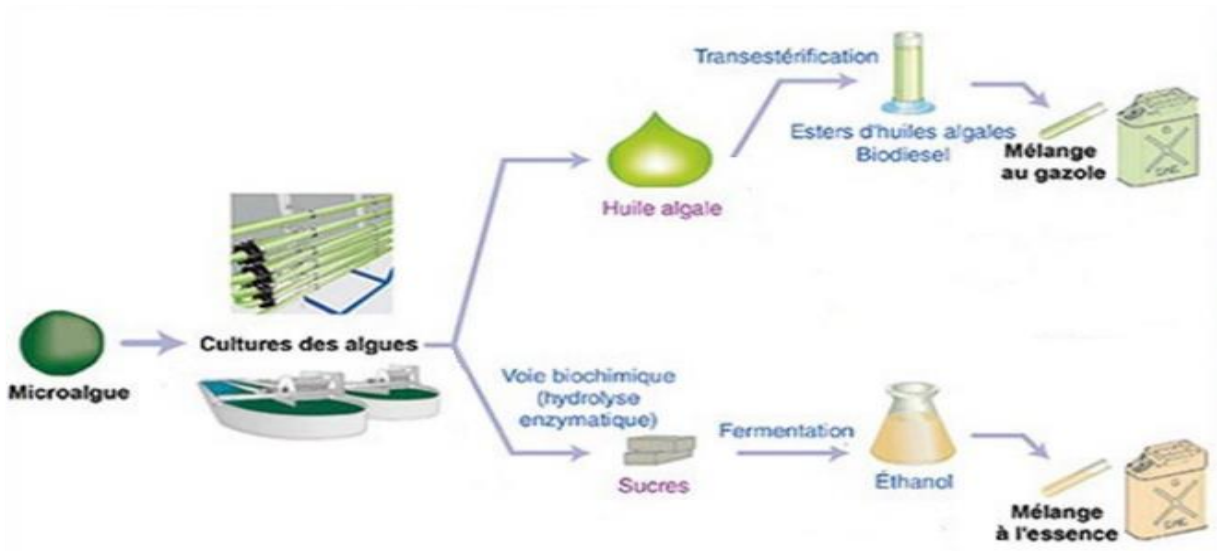


Figure I.5 : cycle de vie du biodiesel produit à partir des microalgues

I.3. Les huiles de friture usagées

I.3.1. Introduction

Notre société, est une grande consommatrice des huiles alimentaires, elle est aussi une grande productrice des huiles alimentaires usagées notamment les huiles de friture.

La friture est l'un des procédés les plus anciens d'élaboration des aliments. Elle peut être réalisée à la poêle en présence de peu de matières grasses (friture plate) ou dans un grand volume d'huile ou de matière grasse (friture profonde). Aujourd'hui, le procédé de friture absorbe la majorité des huiles alimentaires produites dans le monde et des produits frits sont consommés sur tous les continents.

Ces dernières décennies, l'évolution de notre mode de vie (éloignement du lieu de travail, restauration hors du foyer, alimentation déstructurée...) a contribué à la diversification des produits frits tant dans la restauration collective ou rapide que dans l'industrie agro-alimentaire.

Une huile de friture subit les assauts répétés à des hautes températures et s'accumule de composés potentiellement toxiques au fil du temps. L'huile vieillira jusqu'à deux fois plus vite. Or, plus elle vieillit, moins elle sera fluide et plus elle sera absorbée par les aliments, donc elle ne peut être éternelle, devient un déchet dont il faut s'en débarrasser.

I.3.2. Définition des huiles végétales alimentaires

Les huiles végétales sont des corps gras extraits à partir des différentes graines (amandes, fruits secs). Les oléagineux sont des plantes contenant des graines qui servent à produire industriellement de l'huile. Parmi les plantes cultivées, nous citons : l'arachide, l'olivier, le colza, le ricin, le soja et le tournesol. En général toutes les graines contiennent de l'huile [10].

Un corps gras (huile ou graisse) est composé d'une grande variété de constituants présents de façon panoramique ; les triglycérides sont très largement majoritaires (95-99 %) : composés de glycérol (3-5%) et d'acides gras (90-95 %), (figure I.6).

D'autres constituants sont naturellement présents en plus faible quantité : des lipides à caractère polaire tels que le phospholipide (0,1-0,2 %) et des composés dits insaponifiables appartenant à une fraction non glycériques (0,1-3 %) principalement représentés par les stérols et les tocophérols mais contenant également des caroténoïdes, des alcools terpéniques, du squalène, des composés phénoliques, ... etc[11].

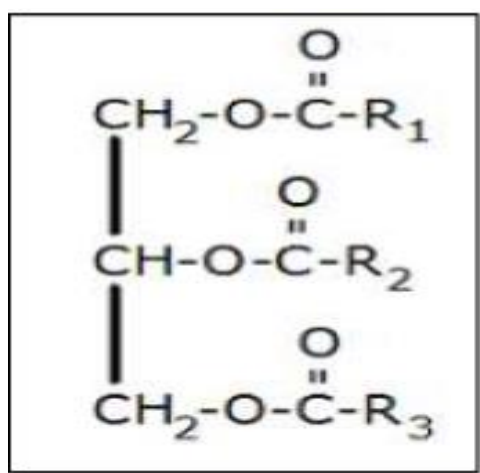


Figure I.6: Structure générale d'une huile végétale. R1, R2, R3 désignent des chaînes d'acides gras [12].

I.3.3. Définition des huiles de friture

Ce sont des huiles stables à la chaleur, riches en acides gras saturés et mono insaturés [13]. Les huiles recommandées pour la friture (frites, beignets, nuggets...).

- Huile d'arachide (point de fumée 240°C)
- Huile de colza (point de fumée 230°C)
- Huile de maïs (point de fumée 230°C)
- Huile de tournesol (point de fumée 230°C)
- Huile de soya (point de fumée 230°C)
- Huile d'olive raffinée (point de fumée 225°C)
- Huile de pépin de raisin (point de fumée 225°C)

L'usage fréquent des huiles de friture à haute température peut produire de constituants qui compromettent non seulement la qualité nutritionnelle des aliments [14], mais peuvent aussi être à l'origine de la formation de composés chimiques ayant des effets néfastes sur la santé du consommateur [15].

I.3.4. Composition des huiles de friture

De point de vue chimique, les huiles de friture supportent les fortes chaleurs de friture, en raison de leur teneur inférieure en acides gras insaturés, tels que l'acide linoléique (**figure I.7**) qui les rendent instables au contact de la chaleur. [16]

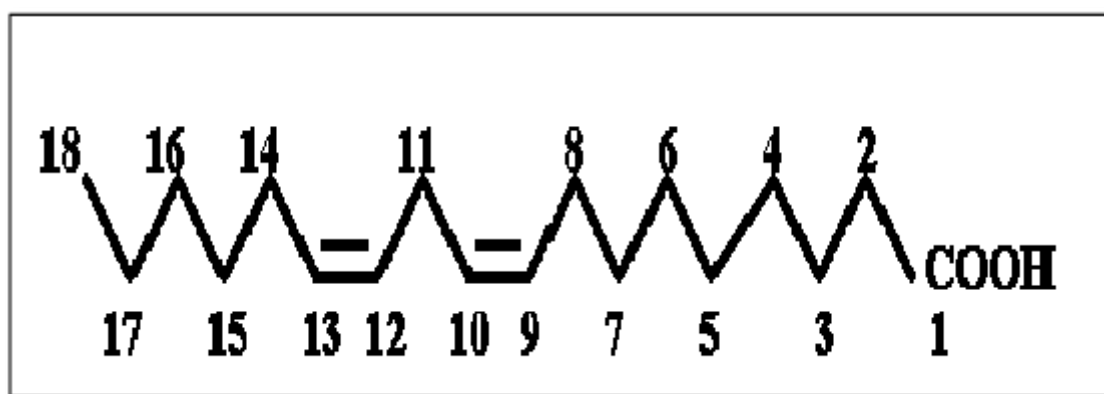


Figure I.7 : Structure générale d'acide linoléique [17].

I.3.5. Dégradation des huiles de friture

À des températures élevées entre 160 °C et 180 °C, en présence d'eau et d'oxygène (**figure I.8**), les triglycérides subissent un grand nombre de réactions complexes qui peuvent être classées en trois grandes familles : oxydation, polymérisation et hydrolyse [18].

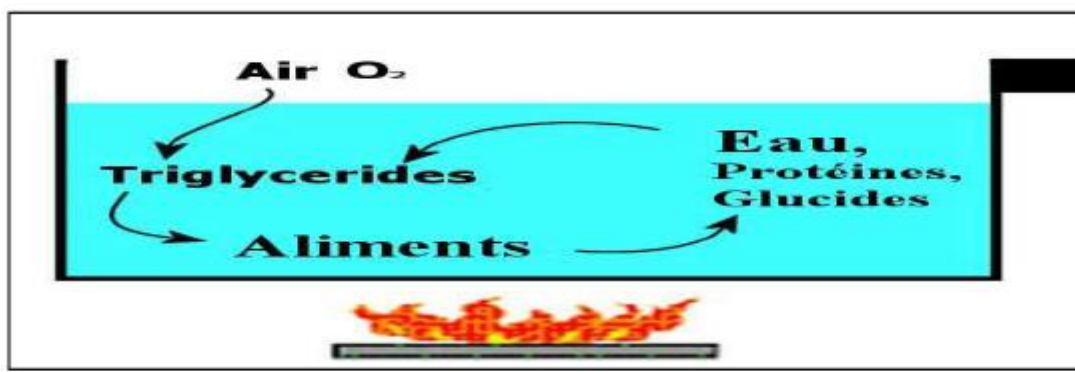


Figure I.8 : Réactions croisées intervenant dans l'huile lors de son utilisation en friture [19].

I.3.6. Différentes huiles commercialisées en Algérie et leur composition

Il existe sur le marché algérien différentes marques d'huiles végétales alimentaires pures (huile de soja et de tournesol) ou mélangées (**figure I.9**), celles-ci sont utilisées pour l'assaisonnement, la cuisson ou la friture [20].



Figure I.9 : Différentes marques d'huiles végétales alimentaires sur le marché Algérien [20].

Les différentes compositions des huiles alimentaires fabriquées en Algérie sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau I.1 : Compositions des huiles alimentaires fabriquées en Algérie [21].

Marque	Nature de l'huile
Huile ELIO	80% Soja, 20% Tournesol
Huile FLEURIAL	100% Tournesol
Huile AFIA	95% Soja, 5% Maïs
Huile HUILOR	100% Soja
Huile BONAL	100% Soja
Huile LYNOR	90% Soja, 10% Palme
Huile SAFIA	100% Soja

I.3.7. Paramètres physico-chimiques des huiles végétales de friture usagées

Les principales caractéristiques physico-chimiques des huiles végétales sont la masse volumique (ou densité spécifique), le pouvoir calorifique (PC), le point de congélation, le point d'inflammation, la viscosité cinématique (généralement déterminée à 40°C), le point d'éclair (PE), l'indice d'iode (ID), l'indice d'acidité (IA), l'indice de peroxydes (IP) et d'autres indices.[12]

I.3.7.1 Densité spécifique

La densité est le rapport du poids d'un certain volume du corps gras au poids d'un même volume d'eau à la température 4°C. La densité renseigne sur le groupe auquel appartient une huile.

La densité des huiles est fonction non seulement de l'insaturation, mais aussi de l'état d'oxydation ou de polymérisation. Les huiles fortement acides ont une densité inférieure à celle des huiles neutres correspondantes, les acides gras ayant une densité inférieure à celle de leurs glycérides.

Pour déterminer le groupe auquel appartient une huile, il suffit de déterminer sa densité au densimètre et pour déterminer le poids d'un volume connu d'huile il est indispensable de procéder à la mesure de la densité à l'aide d'un pycnomètre, à une température parfaitement déterminée. [22].

I.3.7.2 Viscosité

La viscosité est définie comme la résistance à l'écoulement uniforme et sans turbulence se produisant dans la masse d'une matière. Elle varie en fonction de la température.

La viscosité cinématique est déterminée en mesurant, à une température donnée, la durée de l'écoulement d'un volume connu de liquide à travers un appareil comportant un orifice (tube calibré ou capillaire) de dimension normalisé.

Unités: m^2/s ; Stoke (St) ou centistoke (Cst) $10000 \text{ St} = 1 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$; $1 \text{ Cst} = 1 \text{ mm}^2.\text{s}^{-1}$;

$106 \text{ Cst} = 1 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$

La viscosité dynamique caractérise les couches de l'huile à frotter ou à glisser les unes sur les autres, c'est aussi le produit de la viscosité cinématique ν par la masse volumique d'huile ρ .

$\mu = \rho.\nu$ avec μ en Pa.s ; ν en $\text{m}^2 .\text{s}^{-1}$; ρ en $\text{kg}.\text{m}^{-3}$ [23].

I.3.7.3. Pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique d'un combustible représente la quantité d'énergie dégagée par unité de masse ou de volume du produit, lors de la réaction chimique de combustion complète conduisant à la formation de CO_2 et H_2O [24].

La distinction entre le pouvoir calorifique supérieur PCS et le pouvoir calorifique inférieur PCI. Dans le PCS, la fumée du combustible contient l'eau (de combustion, et l'humidité) à l'état liquide. Dans le PCI, la fumée du combustible contient toute cette eau à l'état vapeur. En effet, dans les produits de combustion rejetés par les moteurs et les brûleurs, l'eau se trouve sous forme de vapeur. Une quantité de chaleur a été donc dépensée pour vaporiser cette eau [24].

I.3.7.4. Point de congélation

- **Point trouble**

Le point de trouble est la température à laquelle les cristaux de paraffines commencent à apparaître dans le liquide, lorsque l'huile est refroidie dans des conditions normalisées [23].

- **Point de figeage**

C'est la température au-dessous de laquelle un fluide refroidi, dans des conditions d'essais prescrites, cesse de couler [24].

- **Point d'écoulement**

Le point d'écoulement est la température la plus basse à laquelle l'huile coule encore lorsqu'elle est refroidie, sans agitation, dans des conditions normalisées [24].

I.3.7.5. Point d'inflammation

C'est la température à laquelle il faut chauffer un fluide afin que les vapeurs émises s'enflamment au contact d'une flamme et que la combustion amorcée demeure entretenue au moins cinq secondes (5s). La détermination expérimentale du point de feu consiste à mesurer, en « coupe ouverte ».

Les mesures sont réalisées consécutivement, à l'aide d'un même appareil [23].

I.3.7.6. Point d'éclair (PE)

La température critique à laquelle il faut porter l'échantillon pour que les vapeurs émises brûlent spontanément en présence d'une flamme est appelée le point d'éclair. Le point d'éclair constitue un critère de sécurité lors des opérations de stockage, Il existe plusieurs appareils qui ont été mis au point pour mesurer le point éclair. La connaissance du point d'éclair renseigne sur la volatilité de l'huile et, éventuellement, sur la présence dans le fluide de matières inflammables [23].

I.3.7.7. Indice de peroxyde (IP)

L'altération chimique des corps gras insaturés par l'oxygène de l'air débute par la formation d'un peroxyde. Ce phénomène a lieu au cours du stockage, cette réaction étant une réaction auto catalytique, elle commence très lentement, puis après une période d'induction où l'oxydation est pratiquement indécélable s'accélère de façon exponentielle [22].

L'oxydation est un phénomène fondamental dans toutes les industries des corps gras.



La détermination de la quantité des peroxydes d'un corps gras renseigne sur son altération par oxydation. Dans une molécule de peroxyde il y a une molécule d'oxygène fixée, mais sur les deux atomes d'oxygène, un seul est actif capable d'oxyder.

I.3.7.8. Indice d'iode (ID)

Dans la composition des corps gras polyinsaturés. Les liaisons éthyle suivante :



Cette réaction peut être utilisée pour évaluer quantitativement le degré d'insaturation globale de la chaîne grasse. L'indice d'iode est le nombre de halogénant utilisé, le principe de la réaction est le même [22].

I.3.7.9. Indice d'acidité (IA)

Les corps gras peuvent s'hydrolyser naturellement au cours de leur stockage pour donner des acides gras libres et du glycérol. Le glycérol est en général, rapidement détruit à l'exception de certaines huiles de palme, les huiles brutes ne contiennent plus de glycérol. La mesure de la quantité d'acides gras libres d'un corps gras constitue un des meilleurs moyens de déterminer son altération par hydrolyse. La teneur en acides gras libres d'une matière grasse s'exprime de deux façons et l'indice d'acide qui sont déterminés expérimentalement de la même manière et seul leur mode d'expression diffère. L'indice d'acide est le nombre de milligrammes de potasse KOH nécessaire pour neutraliser les acides libres contenus dans 1g de corps gras [22].

I.4. Les algues

I.4.1. Introduction

Le biodiesel à partir d'algues, aussi appelé carburant d'algues, le carburant d'algues, ou algaeoleum, est l'un des types les plus prometteurs de biodiesel en raison de son taux de croissance rapide. Les algues utilisent la lumière du soleil, de l'eau et du dioxyde de carbone pour produire de l'oxygène et d'hydrate de carbone de la biomasse. La teneur en glucides des algues peut être fermentée en biodiesel, le bioéthanol, le biobutanol, ou d'autres biocarburants. Parce que tout le dioxyde de carbone qui est libéré par la combustion de ces combustibles est éliminé de l'atmosphère par les algues. Les algues peuvent potentiellement produire 10 à 100

fois plus d'huile par hectare que d'autres cultures telles que le maïs, le soja, la canne à sucre ou. Il peut également être produit sur des terres qui ne conviennent pas pour les cultures régulières, et peut être fait avec l'eau de mer ou même les eaux usées[25].

L'huile d'algues est une matière première durable intéressante pour la fabrication de biodiesel. En comparaison aux cultures de graines oléagineuses traditionnelles, les algues donnent beaucoup plus d'huile par acre. Bien que le soja produit typiquement moins de 50 litres d'huile de colza par acre et génère moins de 130 gallons par acre, les algues peuvent produire jusqu'à 10.000 gallons par acre. En particulier et diatomées algues vertes sont de bonnes sources pour la production de biodiesel[26].

Le biodiesel est fabriqué à partir d'huile d'algues par un processus de conversion chimique appelé transestérification [26].

Un litre de microalgue = 100 grammes d'huile de haute qualité énergétique et un rendement 30 fois supérieur aux plantes utilisées pour les biocarburants[27].

I.4.2.Définition des algues

Les algues sont des organismes photosynthétiques que l'on trouve dans les milieux aquatiques d'eau douce ou marin, ainsi que dans de nombreux milieux terrestres. Elles comprennent 20000 à 30000 espèces dans le monde, soit 18% du règne végétal [28].

Les algues sont divisés en deux grandes catégories : les microalgues (invisibles à l'œil nu situées dans le plancton comme les cyanobactéries) et les macroalgues (visible à l'œil nu, se croissent surtout dans les eaux peu profondes, constitués d'algues vertes, brunes et rouges) [29].

I.4.3.Classification des algues

La classification des algues se fait selon des caractéristiques spécifiques tels que les composantes de la paroi cellulaire, les pigments présents [30]. En générale, les algues regroupent quatre groupes qui sont différenciées par rapport à la couleur leur pigments, et chaque groupe contient des centaines des espèces [28].

I.4.3.1. Les algues vertes (Chlorophycées)

Elles sont de formes très variées, uni-ou pluricellulaires. Leurs plastes sont colorés en vert par les chlorophylles a et b, 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 [28].



Figure I.10 : Les algues vertes (Chlorophycées) (Source Wikipédia)

I.4.3.2. Les rhodophytes ou algues rouges

Les rhodophytes ou algues rouges forment un groupe très diversifié. Ces algues doivent leur couleur à la présence de plastides roses dans lesquels un pigment rouge, la phycoérythrine, est associé à plusieurs autres pigments dont les chlorophylles. La plupart de ces algues rouges sont pluricellulaires et marines, mais il existe quelques formes unicellulaires et quelques-unes vivent également en eau douce. Les algues rouges sont divisées en deux groupes: celui des Bangiophycées (qualifiées de primitives) et celui des Floridéophycées (plus complexes). Elles se distinguent généralement par leur cycle de reproduction particulièrement complexe[28].



Figure I.11 : Les rhodophytes ou algues rouges (Source Wikipédia)

I.4.3.3. Les algues brunes (Phéophycées)

La couleur brune de ces algues résulte de la dominance du pigment xanthophylle, la fucoxanthine, qui masque les autres pigments (chlorophylle a et c, ainsi que le bêta-carotène). Toutes possèdent une structure pluricellulaire, mais leurs dimensions varient depuis les

éléments microscopiques jusqu'aux très grands spécimens. La grande majorité des algues brunes sont marines [28].



Figure I.12 : Les algues brunes (Phéophycées) (Source Wikipédia)

I.4.3.4. Les cyanobactéries ou les algues bleues

Sont constituées des colonies de taille, de forme et de couleur très variables. Comme les algues rouges, elles possèdent des pigments surnuméraires bleus (Phycocyanines) et rouges (Phycoérythrines) qui masquent la chlorophylle a. En dépit de leur nom ancien d'algues bleues, elles sont rarement bleues mais plus souvent rouges, vertes avec des reflets bleutés, violets, bruns, jaunes ou orangés. La plupart d'entre elles ont une consistance gélatineuse voire gluante en raison des mucilages qu'elles sécrètent[28].



Figure I.13 : Les cyanobactéries ou les algues bleues (Source Wikipédia)

I.4.4. Compositions Chimiques des algues

Les algues constituent des sources importantes de fibres (de 33 à 61 %) ayant des structures variées et originales, différentes des fibres des végétaux terrestres. Les algues,

d'une manière générale, se composent de 80% d'eau. Séchées elles n'en contiennent plus que 10 à 20% et se composent de 80 à 90 % d'hydrate de carbone (carbohydrates), protéine, minéraux, vitamine et très peu de graisse, soit environ 1 à 2 % [31].

- **Les carbohydrates** La plupart sont des sucres et des polysaccharides (40-60%)— agars carraghénanes chez les algues rouges, alginates chez les algues brunes, et glucane et amidon chez les algues vertes), on trouve également le glucose qui est présent dans plusieurs espèces, la cellulose l'hémicellulose la pectine qui se trouvent principalement sur les membranes cellulaires des algues vertes.
- **Les protéines** Le contenant en protéines est variable (de 4 à 44%) selon les espèces, la saison et d'autres facteurs. On parle de variétés riches en protéines telles que certaines Ulva et Spirulina.
- **Les lipides** La teneur en graisse des algues est très faible. Les acides gras insaturés sont les plus nombreux. Le principal acide gras est l'acide oléique.
- **Les glucides** Les principaux sucres dans les algues sont le mannitol dans les algues brunes et le sorbitol dans les algues rouge. Le sorbitol, sucre très doux, est utilisé dans les régimes et spécialement pour les diabétiques
- **Minéraux et Oligo-éléments en abondance** L'iode, argon, aluminium, chlore, iode, phosphore, plomb,... etc.
- **Vitamines** On trouve les vitamines : B1, B2, B3, B6, C, E, F, K, ainsi la vitamine B12 (dont les algues sont les seules végétaux à le contenir puisque c'est une vitamine d'origine animale).
- **Les pigments** Caroténoïdes, chlorophylles

I.4.5. Les macroalgues

Les algues marines ou macro-algues appartiennent aux plantes inférieures, ce qui signifie qu'elles n'ont pas de racines, de tiges et de feuilles. Elles sont plutôt composées d'un thalle (semblable à une feuille) et parfois d'une tige et d'un pied. Certaines espèces ont des structures remplies de gaz pour assurer leur flottabilité. [32]

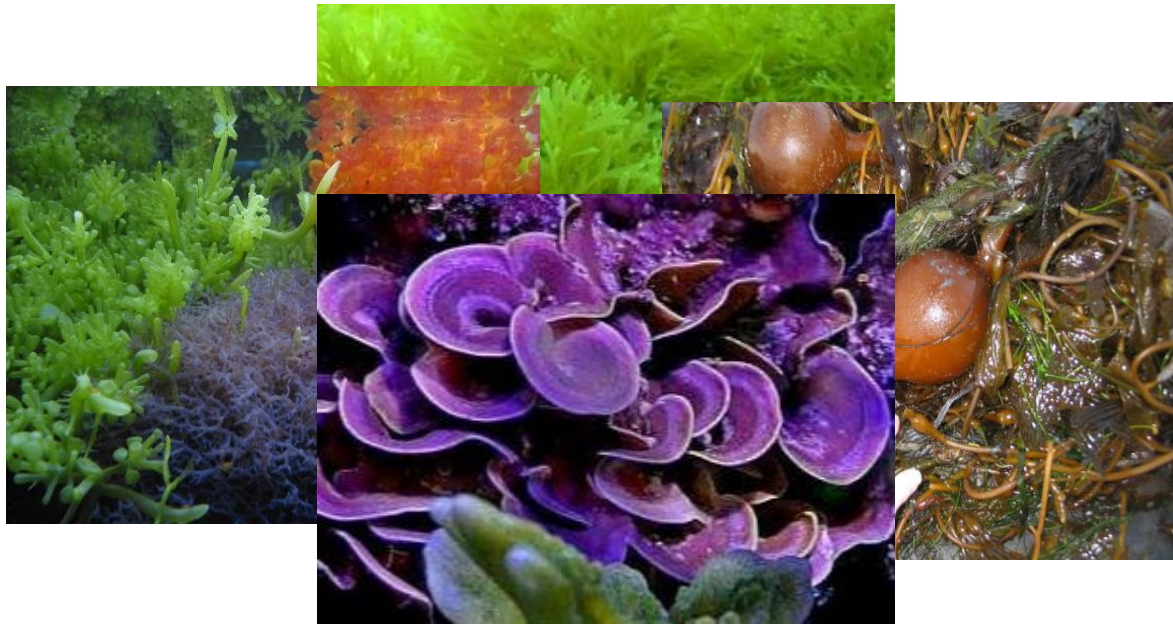


Figure I.14 : les macroalgues

Source Wikipédia

I.4.6. Les microalgues

Les micro-algues sont des organismes unicellulaires. Ce sont des végétaux aquatiques dont l'ordre de grandeur varie de 10 à 100 μm . Elles se multiplient le plus souvent par voie non sexuée. Il en existe entre 200 000 et 1 000 000 espèces dont 30 000 sont connues à l'heure actuelle et seulement une dizaine sont cultivées. Tout comme les cyanobactéries, les micro-algues sont des organismes photosynthétiques utilisant la lumière du soleil comme source d'énergie afin de fixer le dioxyde de carbone. Les lipides contenus dans les micro-algues représentent jusqu'à 80 % de leur poids sec et sont majoritairement sous forme de triglycérides. Les triglycérides sont une forme de lipides comme le cholestérol ; ils sont composés de molécules de glycérol et d'acide gras. Ils sont présents dans notre organisme et constitue une source importante d'énergie pour notre corps. Les lipides présents dans les micro-algues peuvent eux être utilisés dans le but de produire du biodiesel. [33]

I.4.6.1. Les microalgues en biodiesel

Les microalgues, préalablement sélectionnées pour leur richesse en huile peuvent être cultivées massivement, soit dans de grands bassins de plein air, soit dans des photobioréacteurs (tubes transparents). Les algues sont récoltées régulièrement et l'huile est

extraite selon différentes méthodes (centrifugation, traitement au solvant, lyse thermique...). Ensuite on peut mettre en œuvre deux types de conversion de l'huile en biocarburant, identiques à ceux utilisés pour les huiles végétales classiques : [34]

- la transestérification, qui fait réagir l'huile algale avec du méthanol ou de l'éthanol, produit un ester d'huile algale ou biodiesel, tout à fait comparable à celui obtenu à partir des autres types d'huiles végétales. Il peut être mélangé au gazole en proportion limitée à une dizaine de pourcent volume.
- l'hydrogénation catalytique qui fait réagir l'huile en présence d'hydrogène, suivie d'un hydrocraquage, produit des hydrocarbures qui peuvent être incorporés en quantité importante au gazole ou au kérosène.

I.4.7. Les avantages et inconvénients de l'utilisation des algues pour produire du biodiesel

I.4.7.1. Les avantages

L'utilisation des algues comme matière première pour la production de biodiesel présente plusieurs avantages, ces avantages sont les suivants: [35]

- ✓ **Sur une petite surface, les algues produisent plus d'huile que certaines autres cultures.** Les scientifiques n'ont pas déterminé précisément dans quelle proportion. Mais ce pourrait être de deux à dix fois plus.
- ✓ **Les algues ne nécessitent pas de terres agricoles.** Cela signifie qu'elles ne font pas concurrence aux plantes cultivées pour des terres agricoles de bonne qualité
- ✓ **Les algues pourraient contribuer à réduire la pollution de l'air.** Les algues ont besoin de grandes quantités de CO₂ pour la photosynthèse. Une partie de ce CO₂ pourrait provenir de sources comme les émissions industrielles
- ✓ **Les algues ont besoin d'eau, mais il n'est pas nécessaire que l'eau soit propre**

I.4.7.2. Les inconvénients

La viabilité des biocarburants à base d'algues soulève aussi des préoccupations. Les principales sont les suivantes: [35]

- ✓ **Les bioréacteurs nécessitent beaucoup d'énergie pour la croissance des algues.** L'énergie est utilisée pour assurer la circulation de l'eau, l'apport de lumière et le maintien de la température optimale. Le problème est moindre dans les étangs extérieurs puisque l'énergie lumineuse et thermique provient du Soleil. Mais un apport d'énergie est tout de même nécessaire dans les étangs extérieurs pour assurer la circulation de l'eau.
- ✓ **Le bioraffinage est un long processus.** Les algues croissent rapidement, mais le processus d'extraction et de raffinage de l'huile qu'elles contiennent est lent. Il est plus long qu'avec d'autres méthodes de production de biocarburants.
- ✓ **Le bilan énergétique des biocarburants à base d'algues pourrait être négatif.** En d'autres termes, l'énergie nécessaire pour produire les biocarburants à base d'algues serait supérieure à l'énergie qu'ils génèrent!
- ✓ **La construction et l'exploitation des installations de production de biocarburants à base d'algues sont très coûteuses.** Cela signifie que le prix des biocarburants à base d'algues pourrait être plus élevé que ce que la plupart des gens ou des entreprises sont prêts à payer.

Chapitre II

Les travaux réalisés

II.1.Travaux réalisés sur la production de Biodiesel à partir d'huile de friture

Actuellement, la production de biodiesel est transformée à partir d'huile comestible contenant des triglycérides en perturbant les réactions chimiques. Dans nos recherches, nous suivrons les procédures de production de biodiesel à partir d'huile alimentaire usagée et les comparerons. Les propriétés physiques et chimiques sont similaires à celles du diesel.

- On prend l'exemple de **Z. Bettahar, B. Prenons Cheknane et K. Boutemak, [36]** ils se sont engagés à recycler les déchets alimentaires (huiles usagées) à travers la production de biodiesel, et à comparer ses propriétés physiques et chimiques avec les moteurs diesel. La méthode utilisée est basée sur la transestérification de l'huile avec du méthanol sous catalyse alcaline homogène. Dans cette étude, trois types d'huile de friture usagée ont été sélectionnés (huile de frites, huile de poisson, huile de beignet et huile mélangée).

Les résultats d'estérification de ces huiles montrent clairement que la qualité du biodiesel produit est directement liée à la température. La température optimale obtenue par l'étude d'optimisation est de 50 ° C pour obtenir un biodiesel de haute qualité. Différentes propriétés physiques et chimiques en termes de densité, viscosité, indice d'acide, indice de réfraction, indice de cétane, valeur calorifique, point d'écoulement, point de congélation et point d'éclair indiquent que le biodiesel a acquis des propriétés physiques. Produits chimiques comparables à l'essence et au diesel selon les normes Naftal et les normes internationales.

- De même, **A. samad, T. Putri, M. sekaperdani, T. Utami, R. arbiani et H. hermansyah[37]** sont engagés dans la production de biodiesel à partir d'huile alimentaire usée. L'opération a été réalisée simultanément conformément à la norme de biodiesel SNI 7182: 2012.

La conception de la production de biodiesel implique de multiples processus : estérification, décantation, Transestérification, évaporation sous vide et ultrafiltration. Le procédé d'estérification utilise de l'acide sulfurique comme catalyseur pour convertir 92,8% de FFA en FAME sous la forme de 10% p / p de FFA. La réaction de transestérification a montré qu'en utilisant NaOH comme

catalyseur et 1% p / p de triglycérides, un rendement en biodiesel de 90% peut être obtenu. En s'évaporant sur un système de vide, on peut obtenir du biodiesel avec une teneur en méthanol inférieure à 0,5% avec une consommation d'énergie inférieure. La purification du biodiesel par ultrafiltration nécessite beaucoup d'énergie, mais elle peut produire jusqu'à 99,8% de pureté de biodiesel en un temps relativement court.

- Le thème de **A. Boulal, M.Khelafi, H. Gaffour et Y. Bakache[38]** consiste sur la production du biodiesel par la réaction de transestérification des huiles végétales usagées, et étudier l'influence de divers paramètres qui affectent la synthèse du biodiesel, tels que : rapport (alcool / huile), ajoutant du catalyseur (pourcentage en NaOH), température T (°C).

Les résultats trouvés indiquent qu'il existe une relation proportionnelle entre le rapport (alcool / huile) et le rendement (R). Dans ce rapport, on note une augmentation du rapport alcool / huile, ce qui signifie que le rendement (R) du processus de transestérification continue d'augmenter jusqu'à atteindre Un rapport 1/2, ce qui permet d'obtenir un rendement de 71%.

- **R.M. Mohamed, G.A. Kadry, H.A. Abdel-Samadet M.E. Awad[39]** ont utilisé un nouveau type de catalyseur à haut rendement dans la production de biodiesel à partir d'huile alimentaire usagée. Un catalyseur acide solide hétérogène (RS-SO₃H) a été préparé par pyrolyse rapide de la paille de riz, puis sulfoné. Il est formé avec de l'acide sulfurique acide concentré. L'analyse par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier a confirmé que la structure chimique est composée de flocons de carbone amorphe avec des groupes hydroxyle et carbonyle (OH et COOH) et SO₃ haute densité.

Les facteurs qui affectent le processus de réaction de transestérification comprennent la réaction : temps, température, concentration du catalyseur et méthanol (le rapport molaire de l'huile est étudié). Le rendement massique maximal de biodiesel est porté à 90,37%. La teneur en ester méthylique d'acide gras (FAME) est d'environ 97,71% (poids), et le pourcentage d'efficacité de conversion de la matière première atteint 90,38% (poids). Dans les conditions optimales, le taux de conversion (% FFA) est de 91,1%: le rapport molaire méthanol : huile (20: 1) est utilisé à 70 ° C, et le catalyseur est de 10% en poids.

Les propriétés physicochimiques du biodiesel produit sont proches des normes du diesel commercial et du biodiesel ASTM D6751.

La réutilisabilité du catalyseur utilisé indique que le catalyseur est très efficace dans la production de biodiesel. Après 8 cycles, le pourcentage d'efficacité de conversion du pétrole brut dans des conditions optimisées a été réduit de 90,37 à 88,56%. Le pourcentage de conversion FFA est resté stable à environ 91,1% dans 7 essais, puis a diminué.

- L'étude de **T.Trana, S. Kaiprommarata, S.Kongparakula, P. Reubroycharoenb, G.Guanc, M.Nguyend, Ch.Samart [40]** consiste sur la production du biodiesel à partir d'huile alimentaire usagée utilisant d'un catalyseur de microsphères de carbone sulfonées. Le catalyseur est préparé par carbonisation hydrothermale séquentielle et xylose sulfonation. La morphologie, la surface et l'acidité ont été analysées. La surface spécifique et l'acidité du catalyseur sont respectivement de 86 m² / g et 1,38 mmol / g. De plus, la présence d'acide sulfonique à la surface du carbone a été confirmée par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier et spectroscopie photo-électronique aux rayons X. L'activité catalytique de l'huile comestible utilisée pour produire du biodiesel par une réaction en deux étapes pour surmonter l'équilibre réactionnel a été testée. On a obtenu le rendement en biodiesel le plus élevé (89,6%) à une température de réaction de 110 bars, une durée de 4 h et une pression élevée de 2,3 bars avec une charge de catalyseur de 10% en poids, Les premier et deuxième étages mesurent respectivement 1,4 bar et 1,4 bar. La réutilisabilité du catalyseur a été étudiée et les résultats ont montré que le rendement en biodiesel par cycle était réduit de 9%. Cependant, ce catalyseur est toujours intéressant car c'est un exemple de chimie verte, non toxique et utilise des déchets de xylose.

II.2. Travaux réalisés sur la production de biodiesel à partir des algues

Ces dernières années les algues sont devenu parmi les principales sources de production de biocarburant, dont beaucoup de travaux ont été réalisés par les chercheurs et les scientifiques sur la production de biodiesel à partir d'huile d'algue par des différentes méthodes et matières.

Le schéma suivant illustre le processus général de production de biodiesel à partir d'algues :

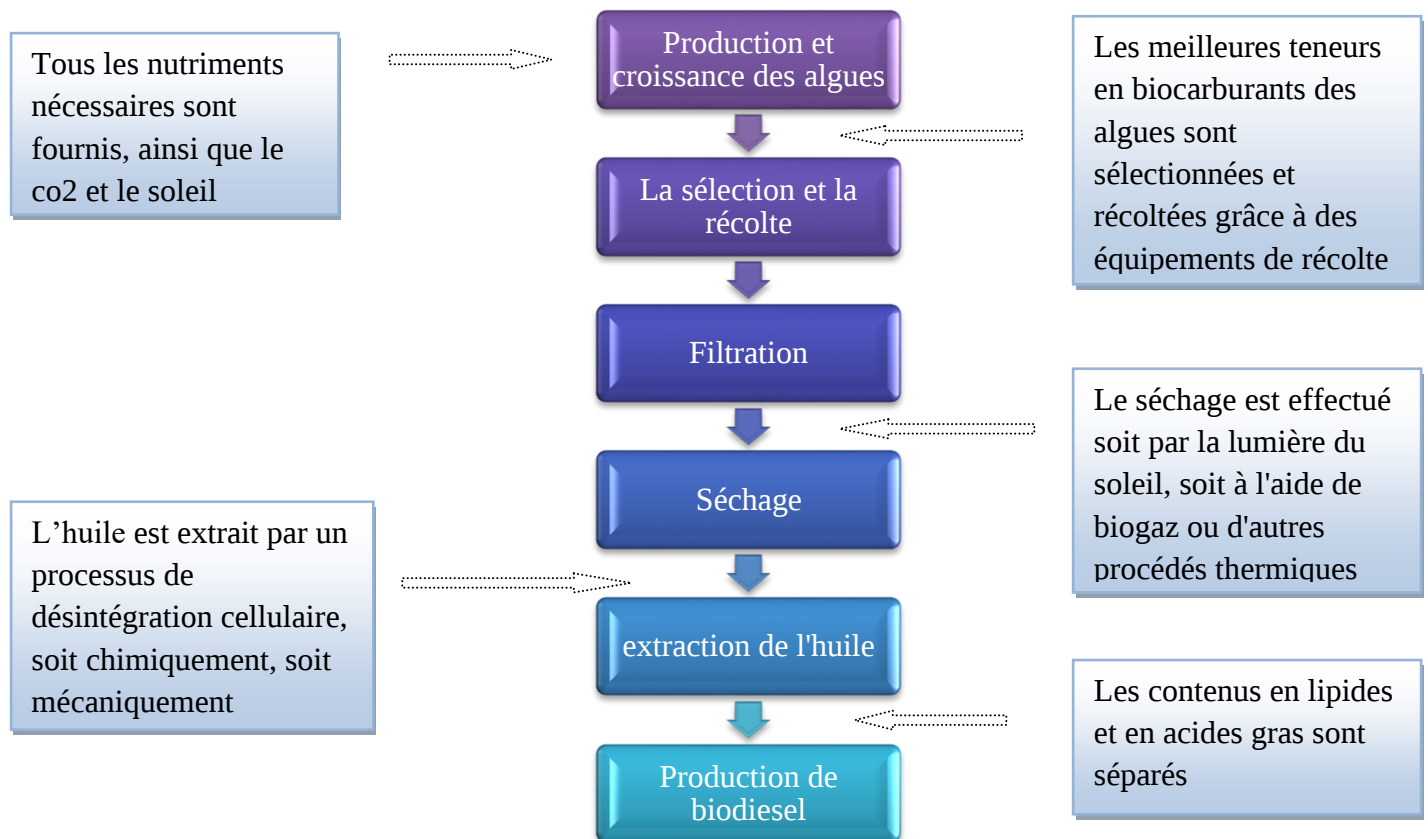


Figure II.1 : le processus général de production de biodiesel à partir d'algues [41]

- Une équipe de chercheurs **Chader et coll [42]**, a mené une étude sur la production de biodiesel utilisant **Chlorella sorokiniana** « **micro-algue verte** » qui se trouve dans le Sahara algérien(Adrar), le but principal de leur étude est de mesurer la quantité de biodiesel produite par Chlorella « microalgue verte » (Figure II.2). Ils ont utilisés quatre milieux de culture pour la production de biodiesel, dont le premier est BG11 milieux (conditions Photoautotrophes) qui est « le mode de nutrition par lequel les microalgues assimilent le carbone inorganique sous forme de CO₂. L'énergie nécessaire à cette assimilation est fournie par la lumière, processus appelé photosynthèse [43] », elle implique l'utilisation de la lumière comme unique source d'énergie, le deuxième milieu est dans les conditions hétérotrophes, « qui est le mode de nutrition par lequel les microalgues assimilent le DOC. En l'absence de lumière, l'énergie requise pour la croissance est fournie par l'oxydation du substrat organique, phénomène appelé chemo-hétérotrophie. Certaines espèces de microalgues utilisent

l'énergie de la lumière pour assimiler le DOC, processus appelé photo-hétérotrophie » [44], le troisième et le quatrième milieu nutritionnel enrichi ou non en azote.

La biomasse de chlorelle a été cultivée à 25 °C ($\pm 1^\circ\text{C}$) dans des flacons de 5l dans une chambre de croissance environnementale avec une intensité lumineuse de 100 photons/ m.s $2 \approx$ et une photopériode de 16 h par jour [42].

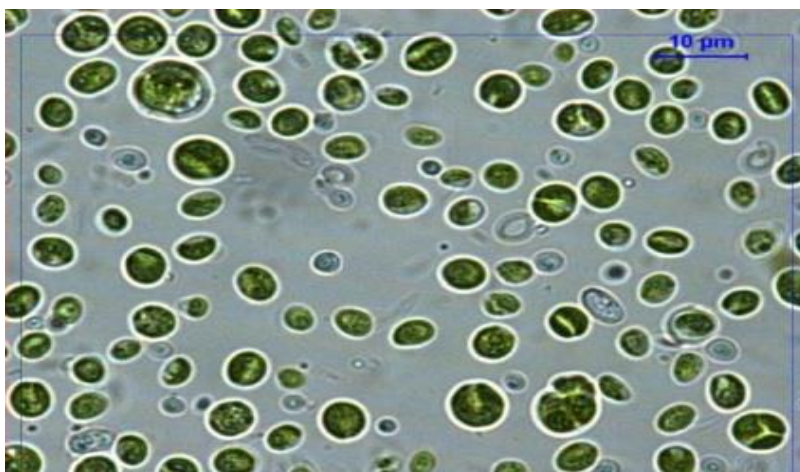


Figure II.2: Souche de *Chlorella sorokiniana*[42]

Ils ont récolté l'échantillon de biomasse par centrifugation et les ont séché jusqu'à l'obtention d'un poids constant et les ont filtré pour avoir une masse cellulaire, puis ils ont lyophilisé la masse obtenue après filtration. Les lipides totaux ont été évalués par analyse gravimétrique ou ils ont utilisés la méthode d'extraction « Folch et qui est modifiée par Christie (1989) ».ensuite une partie des échantillons de lipides en esters méthyliques d'acides gras ont été transformés par chauffage dans du méthanol contenant 6% de HCl anhydre à 70 ° C pendant 1 minute. L'extraction des esters méthyliques d'acides gras est réalisés avec de l'hexane et purifiés par décantation. Les résultats ont montré que la composition principale en acides gras de la microalgue est principalement composée d'un mélange d'acides gras insaturés, tels que l'acide oléique (18: 1), l'acide linoléique (18: 2) et l'acide linoléique (18: 3), et un mélange d'acides gras saturés, tels que le palmitate (16: 0) et l'acide stéarique (18: 0).et ils ont remarqué que dans les trois milieux testés (TAP, BG 11 et milieux + N), l'acide oléique (C18: 1) et l'acide linoléique (C18: 2) ont un pourcentage élevé par rapport aux d'autres acides. Dont ils ont constaté que **Chlorella sorokiniana** a une grande capacité de production de biodiesel de bonne et haute qualité.

- Une équipe de chercheurs **Indhumathi P et coll [45]**, a mené une étude sur la production de biodiesel a partir de micro-algues vertes **chlorella vulgaris** par processus de transestérification , ils ont utilisé l'acétone comme solvant pour l'extraction d'huile d'algue, et une solution de méthylate de sodium pour la transestérification qui a été préparé avec une quantité de NaOH et de méthanol anhydre. Ensuite ils ont versé la solution de méthylate dans l'huile chaude et l'agiter et la mettre dans une ampoule à décanter pour récupérer le biodiesel. L'étape qui suit c'est le lavage et le séchage qui a comme but d'éliminer le reste de méthanol et d'autres impuretés qui se trouve dans le biodiesel , et a la fin il passe par divers tests (tels que le pH, la densité, le point d'éclair, le point d'éclair, le point de trouble, le point d'écoulement, la viscosité, l'indice de cétacés, l'indice d'acide, l'indice d'acides gras libres...). Les résultats trouvés par les chercheurs montrent que le pouvoir calorifique de biodiesel est supérieur à celui des huiles végétales. La teneur énergétique des huiles dépend de la composition, lieu de culture, la saison, et d'autres facteurs. Plusieurs composés sont détectés par le chromatogramme. Ils ont souligné que les caractéristiques du biodiesel sont également comparables à celles du diesel, mais les émissions de CO, NE, SO₂ et CO₂ sont inférieures à celles du diesel. De là, ils ont découvert que le biodiesel d'algues est une source alternative de diesel.
- Dans les travaux de **G. KHOLA et B. GHAZALA [46]**, ils ont utilisé l'algue (*Cladophora* sp.) comme source de production de biodiesel. L'algue a été récoltée, broyée et séchée pour débarrasser de l'eau, l'extraction des algues est réalisée avec le solvant hexane pour l'obtention de l'huile, l'étape qui suit est la transestérification ou ils ont mélangé le méthanol avec un catalyseur NaOH puis l'agité et le versé dans l'huile d'algue. La transestérification catalysée par des alcalis est réalisé sous une pression atmosphérique et une température de 60°C. Le biodiesel obtenue est séparé des sédiments (glycérine, pigments, etc.) par un séparateur à fiole avec soin, puis ils ont lavé le biodiesel avec 5% d'eau pour qu'il devient propre et le mesuré. Les résultats trouvé par les chercheurs sont comparés avec une autre étude de hassein et coll, ils ont remarqué que *Cladophora* sp produit plus de biodiesel que *Spirogyra* sp et l'huile extraite de *Cladophora* sp est également supérieure à *Spirogyra* sp et la quantité de sédiments est relativement importante chez *Cladophora* sp. D'où ils ont

constaté que *Cladophora* sp est un meilleur choix pour la production de Biodiesel en raison de la plus forte teneur en biomasse et en sédiments.

- **F.Ahmad et coll [47]**, ont utilisé trois types d'algues *Chlorella vulgaris*, *Rhizoclonium hieroglyphicum* et la culture mixte d'algues. Ils ont cultivé les algues dans trois type de milieux de culture (eaux usées, solution d'Agar et milieu synthétique). Le solvant utilisé pour l'extraction d'huile d'algue est de n-hexane, et un catalyseur méthylate de sodium CH_3NaO avec de méthanol sont utilisé pour l'étape de transestérification de l'huile extraite en ester méthylique. Les deux couches obtenues (biodiesel est glycérine) ils les ont séparés, et ils ont lavé le biodiesel avec de l'eau pour éliminer l'excès de méthanol et les traces de catalyseur. Ils ont examiné que toutes les espèces présentent la plus grande croissance dans les milieux synthétiques car elles contiennent des quantités suffisantes de tous les nutriments nécessaires, et que le taux de croissance de *Rhizoclonium hieroglyphicum* est supérieur à *Chlorella vulgaris* et à la culture mixte d'algues en milieu synthétique, par contre le *Chlorella vulgaris* a montré plus de croissance dans la solution d'Agar, et la culture d'algues mixtes et le *Chlorella vulgaris* ont montré plus de croissance dans les eaux usées mais ils ont remarqué qu'il y'avait une diminution avec le temps (plus de 6 jours) en raison de la carence en nutriments si aucun milieu frais n'était ajouté. Le pourcentage d'acides gras insaturés dans *Chlorella vulgaris* (78,09%) est supérieur à celui des *Rhizoclonium hieroglyphicum* (77,5%) et de la culture mixte d'algues (77,99%), alors que les acides gras saturés sont plus élevés dans le *Rhizoclonium hieroglyphicum*. La quantité d'huiles trouvés est de *Chlorella vulgaris* (45 ml/100 g), *Rhizoclonium hieroglyphicum* (35 ml/100 g) et (33 ml/100 g) de la culture d'algues mixtes, et les rendements en biodiesel de *Chlorella vulgaris*, *Rhizoclonium hieroglyphicum* et la culture mixte d'algues étaient respectivement de 94%, 92% et 91%. Ils ont remarquer que le biodiesel produit est de l'ester méthylique pur vu que y'a pas de trace de glycérides, et ils ont constaté que les algues se développent rapidement et sont des organismes efficaces pour la production de biodiesel, car les algues peuvent se développer dans les eaux usées et les ressources artificielles.

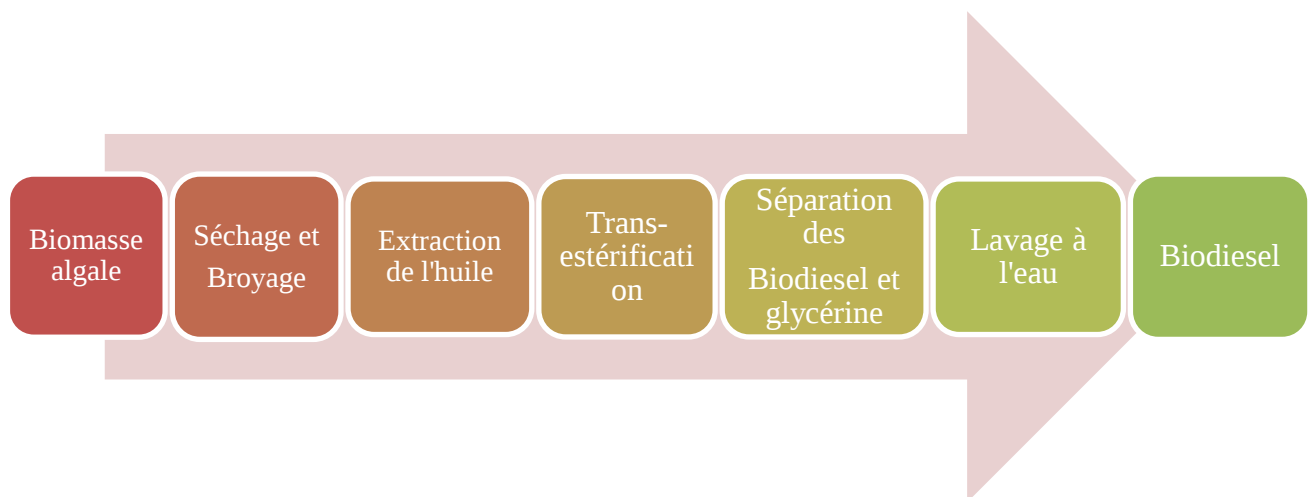


Figure II.3 : Étapes de la production de biodiesel à partir de la biomasse algale.

- **Jayashree Jena et coll [48]**, ont mené une étude sur "Les microalgues de la côte d'Odisha comme source potentielle pour la production de biodiesel" où ils ont utilisé trois types d'algues *Chlorococcum* sp, *Chlorella* sp. Et *Scenedesmus* sp. Ils ont trouvé comme résultats que le taux de croissance des espèces est presque comparable mais *Scenedesmus* sp avait la teneur en lipides la plus élevée. Plusieurs compositions en acide gras des trois souches de microalgues ont été déterminées, un pourcentage de (63-80 %) d'acides gras insaturés et de (19,5-30,3 %) d'acide palmitique (C16:0). Parmi les trois souches étudiées, ils ont constaté que *Scenedesmus* sp est le meilleur pour la production de biodiesel car il contient une teneur en lipides élevée et une productivité lipidique élevée.

Conclusion

Cette étude nous a fait découvrir les différentes étapes de fabrication du biodiesel à partir d'huile de friture usée et à partir d'algues, comme elle nous a permis de relever les points stratégiques sur lesquels se basera la production de biodiesel, et surtout de comprendre la contribution de la production de biodiesel dans réduction de la pollution notamment les émissions de gaz à effet de serre.

Les études faites par les chercheurs montrent que selon les normes internationales, la réaction de transestérification de l'huile de friture usagée a des propriétés physiques et chimiques comparables au diesel pétrolier. Le coût de production de biodiesel à partir d'huile de friture est très bas par rapport aux d'autres huiles végétales.

Plusieurs espèces d'algues sont utilisées pour la production du biodiesel, parmi ces algues on trouve *Cladophora* sp, *Spirogyra*, *Chlorella vulgaris*, *Chlorella sorokiniana*, ...etc dont leur teneur en huile est très élevée. Les algues sont des organismes efficaces pour la production de biodiesel, en raison de la plus forte teneur en lipide et acide gras.

Dans de petites zones, les algues produisent plus d'huile que les autres cultures (colza, maïs, tournesol...), et elles n'ont pas besoin **de terres agricoles** car elles peuvent se développer dans les eaux usées et les ressources artificielles ou bien des tubes transparents.

Le rendement obtenu par la production de biodiesel à partir d'algues dépend de l'espèce utilisée, du catalyseur et du solvant utilisé pour l'extraction de l'huile et la transestérification. Les caractéristiques du biodiesel sont également comparables à celles du diesel, mais les émissions de CO, NO_x, SO₂ et CO₂ sont inférieures à celles du diesel.

Au terme de ce travail, on peut dire que la production de biodiesel à partir de l'huile de frites et l'huile d'algues sont beaucoup mieux que le biodiesel fabriqué à partir l'huile de palme, l'huile de colza...

Références

- [1] Matallah, Assad Allah. (2006), Le Biocarburant, thèse de magistère, Institut National Agronomique (INA) Alger.
- [2] K. KHIARI, Contribution à l'étude des propriétés thermo-physiques de biocarburants de deuxième génération et leur influence sur le comportement des moteurs, Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Nantes, France, 2016.
- [3] N. Özbay, E. Apaydın-Varol, B.B. Uzun, Characterization of bio-oil obtained from fruit pulp pyrolysis, *Energy*, Vol. 33, n° 8, 2008.
- [4] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/biocarburant> Consulté le 28/03/2020
- [5] R.ALLOUNE., Contribution à la mise au point d'un combustible innovant à base de culture locale non alimentaire pour les moteurs à combustion interne , Thèse de doctorat, UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA , BOUMERDES, 2017.
- [6] Nikiema, J., Heitz, M. (2008). Biodiesel. I. Characteristics, assets and limitations - A synthesis, *Canadian Journal of Civil Engineering*, volume 35, n° 1, p. 95-106.
- [7] Sahoo, P. K., Das, L.M., Babu, M.K.G., Naik, S.N., (2007). Biodiesel development from high acid value *polangase* oil and performance evaluation in a CI engine. *Fuel*, volume 86, n° 3, p. 448-454.
- [8] La production de biodiesel à partir de cultures oléagineuses, Publication no EVC 031 Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec, 2008.pp 26-28.
- [9] A, Akbi(2013).RenewableEnergyDevelopment Center. scholar.google .
- [10] *comme carburant : application au prototype « Flexy Energy »* Mémoire pour l'obtention du master en Génie électrique, 52p.
- [11] Morin O (2012). *Huiles et corps gras végétaux. Ressources fonctionnelles et intérêt nutritionnel* .ITERG - Institut des Corps Gras, France, p63.
- [12] Chaïb F, Khenfer A (2013). *Synthèse de biodiesel par la transestérification des huiles commercialisées*. Mémoire Master Académique, Université Kasdi Marbah, Ouargla ,41p.
- [13] Guide pratique (2012) .Mesure des huiles de friture, Le ministère du Commerce, Alger, p2.
- [14] Meyer C (2017). Dictionnaire des Sciences Animales.Agbezo D (2011). *Adaptation d'un moteur diesel à l'utilisation d'huile végétale pure (HVP)*
- [15] Morin O (2012). *Huiles et corps gras végétaux. Ressources fonctionnelles et intérêt nutritionnel* .ITERG - Institut des Corps Gras, France, p63.

Références bibliographiques

- [16] Fillieres R (1995). Université Claude Bernard-Lyon1.
- [17] Meyer C (2017). Dictionnaire des Sciences Animales. Agbezo D (2011). *Adaptation d'un moteur diesel à l'utilisation d'huile végétale pure (HVP)*.
- [19] *International Oil Spill Conference (1997), Fort Lauderdale, California, American Petroleum Institute, Washington D. C, p59-61.*
- [18] Dobarganes C (1998). Formation and analysis of high molecular-weight compound.
- [20] Guide de contrôle des huiles de friture (2012).
- [21] Guide de recommandations à l'usage des conseillers des entreprises(2007), Gestion des eaux usées issues des métiers de bouche, CNIDEP (Centre National d'Innovation pour le Développement durable et l'Environnement dans les Petites entreprises).
- [22] Gougam H, Baitech R (2003). *Recueil des travaux pratiques* .Chimie des corps gras. Boumerdes.
- [23] Dallemagne G (2003). *Fluides hydrauliques méthodes d'analyses*. Transmission de puissance hydraulique et pneumatique. Techniques de l'ingénieur.
- [24] Denis J, Briant J, Hipeaux J-C (1997). *Physico-chimie des lubrifiants Analyses et essais*, Ed Technip, Paris, 423 p.
- [25] <https://www.gamblewiz.com/P2Q7WM5RM/> .Consulté le 02-04-2020
- [26] https://www.hielscher.com/fr/algae_extraction_01.htm. Consulté le 02-04-2020
- [27] <https://www.consoglobe.com/pme-france-biocarburant-micro-algues-cg>. Consulté le 02-04-2020
- [28] Garon-Lardiere S., 2004, Etude structurale des polysaccharides pariétaux de l'algue rouge *Asparagopsis armata* Bonnemaisoniales. Thèse de doctorat. Université de Bretagne occidentale école doctorale des sciences de la matière, de l'information et du vivant, p :211.
- [29] Kornprobst. J.M (2005). Substances naturelles d'origine marine : chimio diversité, pharmacodiversité, bio :inséparables.Ed : Tec et Doc Lavoisier .Vol 1-2. 1830 pages.
- [30] Memory. T. (2006).Biologie Module I, Diversité des algues et des plantes, p 45.
- [31] Cayla M, 1995. Découvrez des algues propriétés applications recettes. Editions Chiron
- [32] Carlsson, A.S., van Beilen, J.B., Möller, R., Clayton, D (2007). Micro-and macro- algae: utility for industrial applications, In: Bowles D, editor. Outputs from the EPOBIO project. UK: CPL Press. pp. 82

Références bibliographiques

- [33] <http://algue-production-energie.e-monsite.com/pages/la-production-d-energie/la-production-d-energie.html> consulté le 02/09/2020
- [34] <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/des-biocarburants-a-partir-de-microalgues-comment-ca-marche-6391/> consulté le 02/09/2020
- [35] <https://parlonssciences.ca/ressources-pedagogiques/les-stim-en-contexte/biocarburant-algal-alimenter-la-planete-avec-lecume> consulté le 02/09/2020
- [36] Z. BETTAHAR, B. CHEKNANE et K. BOUTEMAK. « Etude de la transestérification d'un mélange des huiles usagées pour la production du biodiesel », *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 19 n°4, 2016, p.605 –615.
- [37] A.SAMAD, D. NORMAYOLISTA, M. SEKAPERDANI, T. UTAMI, R. ARBIANT et H. HERMANSYAH. « Design of portable biodiesel plant from waste cooking oil », *Energyprocedia*, Vol.15 n°3, 2018, p.263-268.
- [38] A. BOULAL, M. KHELAFI, H. GAFFOUR et Y. BAKACHE. « Synthèse de biodiesel en utilisant des huiles végétales usagées », *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 19 n°3, 2016, p.409 – 413.
- [39] R.M. MOHAMED, G.A. KADRY, H.A. ABDEL-SAMAD et M.E.AWAD. « Catalyseur hétérogène hautement opérationnel dans la production de biodiesel à partir d'huile de cuisson usagée », *Egyptian Journal of Petroleum*, Vol. 29 n°4, 2020, p. 59–65.
- [40] T.TRANA, S. KIAPROMMARATA, S.KONGPARAKULA, P. REUBOROYCHAROENB, G.GUANC, M. NGUYEND et CH.SAMART. « Production de biodiesel vert à partir d'huile de cuisson usagée à l'aide d'un catalyseur acide bénin écologique », *Waste Management*, Vol.52 n°6, 2016, p. 367-374.
- [41] KHAN, Suliman *et al.* « Biodiesel Production From Algae to Overcome the Energy Crisis », *HAYATI Journal of Biosciences*, vol.24, n°4, 2017, p. 163-167.
- [42] CHADER, Samira *et al.* « Biodiesel production using *Chlorella sorokiniana* a green microalga », *Revue des Energies Renouvelables*, vol.14, n°1, 2011, p. 21-26.
- [43] Taiz, L., Zeiger, E. 2010. *Plants physiology*. Sinauer Associates, Incorporated.
- [44] CHOJNACKA, K *et al.* « Kinetic and stoichiometric relationships of energy and carbon metabolism in the culture on microalgae », *Biotechnology*, vol.3, n°1, 2004, p. 21-34.
- [45] INDHUMATHI, P *et al.* « A Method for Production and Characterization of Biodiesel from Green Micro Algae », *International Journal of Bio-Science and Bio-Technology*, vol.6, n°5, 2014, p.111-122.

Références bibliographiques

[46] KHOLA, G et GHAZALA, B. «BIODIESEL PRODUCTION FROM ALGAE», *Pak. J. Bot*, vol.44, n°1, 2012, p.379-381.

[47] AHMED, Farooq *et al.* « Transesterification of oil extracted from different species of algae for biodiesel production», *African Journal of Environmental Science and Technology*, vol.7, n°6, 2013, p.358-364.

[48] JAYASHREE, Jena *et al.* «Microalgae of Odisha Coast as a Potential Source for Biodiesel Production», *World Environment*, vol.2, n°1, 2012, p.12-17.