

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أحمد بوقرة بومرداس
Université M'hamed Bougara de Boumerdès



Faculté des Sciences

Département de Biologie

Mémoire de projet de fin d'études en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Sciences biologiques

Spécialité : Biochimie appliquée

Présenté par :

Demri Lilia

Thème :

**Les biocarburants : La production, la composition et les propriétés
du biodiesel synthétisé à partir des huiles végétales**

M^{me} KORICHE Nesrine

Maître de conférences B FS- MBB

Présidente

M^{me} AKROUM-AMROUCHE Dahbia

Maître de conférences B FS- MBB

Promotrice

M^{me} AKMOUSSI-TOUMI Sihem

Maître de conférences B FS- MBB

Examinatrice

Dédicace

Je dédie ce modeste travail:

À mes très chers parents, pour leur soutien, leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse et leurs prières tout au long de mes études.

À ma chère sœur, pour son encouragement permanent, son appui, son soutien moral et son aide.

À toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours.

Et à tous ceux qui auront le plaisir de lire ce mémoire.

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux, et le fruit de votre soutien et votre fidélité

Merci d'être toujours là pour moi.

Remerciements

Tout d'abord, je remercie Dieu le tout puissant de nous avoir donné la volonté, la santé et le courage pour réaliser ce travail.

*Je tiens à remercier particulièrement ma promotrice **Mme AKROUM-AMROUCHE Dahbia**, Maître de conférences à l'Université de Boumerdès UMBB, pour avoir proposée le sujet et pour avoir dirigée ce travail, ainsi que pour le temps qu'elle a bien voulu me consacrer pour la réalisation de ce mémoire et pour ses bonnes explications et ses conseils, qui m'ont éclairé le chemin de la recherche. Tous mes sincères respects.*

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à tous les enseignants de l'université de Boumerdès et qui nous ont soutenu dans la poursuite de nos études.

*Je veux adresser mes vifs remerciements à **Mme KORICHE NESRINE**, Maître de conférences à l'Université de Boumerdès UMBB, pour avoir accepté d'être la présidente de mon jury de mémoire et à qui j'exprime mon profond respect.*

*Je remercie également grandement **Mme AKMOUSSI-TOUMI SIHEM**, Maître de conférences à l'Université de Boumerdès UMBB, pour avoir accepté d'examiner mon travail et à qui j'exprime ma profonde gratitude.*

*Je souhaite remercier **NAFTAL** de Dar El Beïda. Merci à tout le personnel du laboratoire de **NAFTAL**, pour leurs gentillesse à mon égard et pour leurs aides.*

Enfin merci à tous ceux qui, de près ou de loin, ont participé directement ou indirectement à l'élaboration de ce mémoire.

المخلص:

أدى استنفاد الموارد البترولية ، وارتفاع الأسعار والتقلب شبه الدائم في سعر برميل النفط ، وتنويع مصادر إمدادات الطاقة ، إلى اهتمام الباحثين والعلماء بمصادر أخرى للطاقة. مثل الوقود الحيوي. الوقود الحيوي هو وقود إيكولوجي متجدد ، يتم الحصول عليه من خلال تحويل المواد الحيوانية والنباتية. يتم تصنيفها على أنها مورد مثالي وغير سام ومتجدد.

وقود الديزل الحيوي هو بديل تقليدي مفيد. تمت مناقشة تركيبه عن طريق الأسترة التبادلية للزيوت النباتية المستخدمة بالإضافة إلى خصائصه الفيزيائية والكيميائية في هذه الدراسة.

كلمات مفاتيح : وقود الديزل الحيوي ، الزيوت المستخدمة ، الأسترة التبادلية ، التحسين

ABSTRACT :

The depletion of petroleum resources, the high price and the almost permanent fluctuation in the price of a barrel of oil, the diversification of energy supply sources have led researchers and scientists to take an interest in other sources of energy like biofuels.

Biofuels are renewable ecological fuels, obtained through the transformation of animal and plant materials. They are classified as an ideal, non-toxic and renewable resource. Biodiesel is an advantageously conventional substitute. Their syntheses by the transesterification of used vegetable oils as well as its physical and chemical properties were discussed in this study.

Key Words: Biodiesel, waste oil, the transesterification optimization.

Résumé :

L'épuisement de ressources pétrolières, la cherté et la fluctuation quasi-permanente du prix du baril de pétrole, la diversification de sources d'approvisionnement en énergie ont amené les chercheurs et les scientifiques à s'intéresser à d'autres sources d'énergie comme les biocarburants.

Les biocarburants sont des carburants écologiques renouvelables, obtenus grâce à la transformation des matières animales et végétales. Ils sont classés en tant que ressource idéale, non toxique et renouvelable.

Le biodiesel est un substituant avantageusement conventionnel. Sa synthèse par la transestérification des huiles végétales usagées ainsi que ses propriétés physiques et chimiques ont été discutée dans cette étude.

Mots clés : Biodiesel, les huiles usées, La transestérification, optimisation.

SOMMAIRE

Dédicace

Remerciements

Sommaire

Liste des figures

Introduction générale 1

Chapitre I: synthèse bibliographique _

I.1. Généralités sur les huiles végétales 3

I.1.1. Définition 3

I.1.2. Propriétés et compositions principales des huiles 3

I.1.2.1. L'huile de tournesol 3

I.1.2.2. L'huile de colza 4

I.1.2.3. L'huile de maïs 4

I.1.2.4. L'huile d'arachide 4

I.1.2.5. L'huile de soja 4

I.1.2.6. L'huile de pépins de raisin 5

I.1.2.7. L'huile de noix 5

I.1.2.8. L'huile d'olive 5

I.1.3. Caractéristiques physico-chimiques des huiles végétales et leur qualité 5

I.1.3.1. Caractéristiques chimiques 5

A. Nature des acides gras de l'huile 5

B. Indice d'iode 6

C. Indice de saponification 6

D. Indice d'acide 6

E. Indice de peroxyde 7

I.1.3.2. Caractéristiques physiques 7

A. Masse volumique 7

B. Viscosité 7

C. Volatilité 8

D. Les points de trouble et d'écoulement 8

I.1.4. Critères de choix de la matière première et les huiles usées comme source de 8

biodiesel	
I.1.5. Les huiles usagées	9
I.1.6. Impact environnemental et économique des rejets des huiles usagées	9
I.2. Généralités sur les biocarburants	11
I.2.1. Introduction	11
I.2.2. Définition biocarburant	12
I.2.2.1. Les biogaz	13
I.2.2.2. Le bioéthanol	13
I.2.2.3. La bio-huile (bio-oil)	14
I.2.2.4. Le biodiesel (biogazol)	14
I.2.3. Classification des biocarburants	14
I.2.3.1. Biocarburants de première génération	15
I.2.3.2. Biocarburants de deuxième génération	16
I.2.3.3. Biocarburants de troisième génération	16
I.2.4. Le Biodiesel	17
I.2.4.1. Définition et origine de biodiesel	17
I.2.4.2. Les procédés de production de biodiesel	18
A. Microémulsion	18
B. Pyrolyse ou craquage thermique	19
C. Dilution	20
D. Transestérification	21
I.2.4.3. Les caractéristiques du biodiesel	22
A. La viscosité	22
B. Le pouvoir calorifique	22
C. Le point d'écoulement	22
D. L'indice de cétane	23
E. L'oxydation	23
F. Le pouvoir lubrifiant	23
I.2.4.4. L'utilisation du biodiesel	23
I.2.4.5. Le biodiesel dans le monde	24
I.2.4.6. Situation de biodiesel en Algérie	25
I.2.4.7. L'effet du biodiesel sur l'environnement et la santé humaine	28
I.2.4.8. Avantages et inconvénients du biodiesel	28
A. Avantages	28

B. Inconvénients	30
I.2.5. Utilisation des biodiesels dans les moteurs diesel	30
I.3. La transesteréification	25
I.3.1. Introduction	32
I.3.2. Historique	32
I.3.3. Définition	32
I.3.4. Équation de la réaction de transestérification	32
I.3.5. Mécanisme et cinétique de la réaction de transestérification	33
I.3.5.1. Mécanisme de la réaction de transestérification	33
I.3.5.2. La cinétique de la réaction de transestérification	35
I.3.5.3. Avantage de la réaction	35
I.3.6. Thermodynamique de la réaction de transestérification	36
I.3.7. Facteurs influençant de la réaction de transestérification des huiles	36
I.3.7.1. Le type d'alcool	36
I.3.7.2. Effet du ratio alcool / huile	37
I.3.7.3. Type de catalyseur et sa concentration	37
I.3.7.4. Température de la réaction	38
I.3.7.5. Pression de la réaction	39
I.3.7.6. Vitesse d'agitation	39
I.3.7.7. Temps de réaction	40
I.3.7.8. La teneur en acides gras libres et en eau	41
I.3.8. Les coproduits de la réaction de transestérification	41
I.3.8.1. Définition	41
I.3.8.2. Les principaux domaines de son utilisation	41
I.3.8.3. Valorisation de coproduit « glycérine »	42

Chapitre II. Matériels et Méthodes

II.1. Introduction	43
II.2. Protocole de la synthèse de biodiesel	43
II.3. La séparation	43
II.4. Le séchage	43
II.5. Optimisation	44
II.6. La caractérisation physicochimique du biodiesel	44
II.7. Etude comparative	44

Chapitre III. Discussion

III.1. Introduction	45
III.2. Optimisation de transestérification des huiles	45
III.3. Etude comparative	46
Conclusion	47
Références	48

Liste des abbreviations:

ASTM : American society for Testing and Materiel
BD : biodiesel
B2 : mélange 2% de biodiesel et 98% de pétrodiesel
B5 : mélange 5% de biodiesel et 95% de pétrodiesel
B100 : biodiesel pure
BQ-9000 : Quality Management Program
CO : monoxyde de carbone
CO₂ : dioxyde de carbone
CH₄: Méthane
C₂H₄: Éthylène
C₂H₆: Éthane
C₃H₆: propène
C₃H₈: propane
EEHV : ester éthylique d'huile végétal
EMHV : ester méthylique d'huile végétal
EN : European Norm
EU : État- Unis
FAME : Fatty Acide Methyl Ester (Ester méthylique d'acide gras)
GES : émission de gaz à effet de serre
H₂SO₄: acide sulfurique
HCl : acide chlorhydrique
H₂: Dihydrogène
HFU : huile de friture usée
HVP : huile végétale pure
HV : huile végétal
HU : huile usée
HN : huile neuve
IC : indice de cétane
KOH : hydroxyde de potassium
K₂CO₃: carbonate de potassium
MéOH: méthanol
Na OH : hydroxyde de sodium
NO_x : oxyde d'azote
NO₂: dioxyde d'azote
OPEP: Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole
O: oxygène
Pe : flash point (le point d'éclaire)

Liste des figures

Figure I.1	Structure générale d'une huile végétale. R1, R2, R3 désignent des chaînes d'acides gras et diffèrent en longueur et nombre de double liaison	3
Figure I.2	Indice d'iode de quelques huiles végétales	6
Figure I.3	Composition des acides gras des huiles.(a) : huile de soja, (b) : huile de tournesol	9
Figure I.4	Filières de conversion de la biomasse en bioénergies selon les différents procédés biochimique, thermochimique et physicochimique	12
Figure I.5	Classification des biocarburants	17
Figure I.6	Réaction générale de la transestérification.	21
Figure I.7	Réaction de transestérification des triglycérides avec l'alcool.	21
Figure I.8	Évolution de la production du biodiesel en Europe depuis 2012	24
Figure I.9	Évolution de la demande et de l'offre pour le Diesel en Algérie.	26
Figure I.10	Production du biodiesel en Algérie à partir de la biomasse	28
Figure I.11	Transestérification des triglycérides avec un alcool pour obtenir un biodiesel	33
Figure I.12	Réactions successives de la transesterification.	33
Figure I.13	Mécanisme de la réaction de transestérification d'huile végétale par le méthanol catalysée par une base	34
Figure I.14	Diagramme de transestérification	35
Figure I.15	Diagramme de l'influence du ratio HF/Alcool sur le rendement en biodiesel	37
Figure I.16	Effet de la concentration du catalyseur (KOH) sur le rendement en biodiesel	38
Figure I.17	Diagramme qui présente l'influence de température sur le rendement en biodiesel	39
Figure I.18	Diagramme qui présente l'influence de temps de réaction sur le rendement en biodiesel	40
Figure I.19	Réaction de saponification des triglycérides	41
Figure I.20	Marché du glycérol, pourcentages et utilisations industrielles	42

Introduction

Le coût de plus en plus élevé des hydrocarbures d'origine fossile et perspective d'un épuisement programmé de cette source énergétique naturelle non renouvelable, couple au phénomène des changements climatiques imputables aux émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, ont amené les chercheurs à réfléchir au développement de nouvelles sources d'énergie écologiquement propre et économiquement rentable (Bhandarkar and Nijagunappa, 2011). Parmi ces sources d'énergie renouvelables, les bioénergies en général et les biocarburants en particulier. Les biocarburants sont des carburants obtenus à partir de la biomasse (l'ensemble de la matière organique d'origine végétale, animale ainsi que leurs produits de transformation) (Ballerini *et al.*, 2006).

Le biodiesel est un mélange d'esters d'acide gras obtenus à partir des huiles végétales ou de graisses animales par transestérification. Sa production peut contribuer à diminuer notre dépendance vis-à-vis des combustibles fossiles.

Les huiles végétales peuvent être transformées en biodiesel. Les ressources contenant ces huiles sont multiples comme les déchets agroalimentaires (déchets verts et déchets issus des transformations), les algues marines, les plantes succulentes et les herbacés. Les biodiesels issus des huiles des plantes à graines oléagineuses (colza, tournesol, soja, coton, ricin, Jatropha, palm, ...) sont mélangés au diesel conventionnel jusqu'à une proportion de 30% maximum. Néanmoins, actuellement les biocarburants ne représentent que 1,5 à 2% de la consommation mondiale d'énergie dans le transport routier.

L'Algérie a une potentialité végétale non utilisée qui peut servir à produire différentes huiles dont les consommables peuvent être destinées à la production de biodiesels. A cet effet, les végétaux candidats sont nombreux tels que le ricin, le tournesol, les cactus (figue de barbarie en particulier), les algues et micro-algues marines (Mesbahi, 2012).

D'une manière générale, les huiles ou les graisses végétales ou animales sont constituées de triglycérides (majoritaires), d'eau et d'acides gras. La transformation des acides gras et des huiles en esters peut être réalisée par deux principaux procédés : l'estérification pour les premiers et la transestérification pour les seconds (Hamad, 2019).

L'obtention du biodiesel, un mélange d'esters, est privilégiée par transestérification catalytique acide ou basique (homogène et hétérogène) des triglycérides (huiles). La conversion des huiles en esters peut réaliser par méthanolyse ou éthanolyse. La transestérification d'huiles est une réaction catalytique constituée par trois étapes réversibles consécutives au cours desquelles les triglycérides sont convertis d'abord en diglycérides, puis en mono-glycéride et finalement en glycérol. Après chaque étape, un ester est formé. Dans la réaction

Introduction

globale, 3 moles d'esters sont produits à partir 1 mole de triglycéride (Mesbahi, 2012).

Actuellement la méthanolyse homogène est la plus utilisée pour produire des EMHV (Esters Méthyliques d'Huiles Végétales). La production courante industrielle du biodiesel est effectuée par la transestérification alcali-catalysée homogène d'huiles végétales avec du méthanol, utilisant NaOH ou KOH comme catalyseur. La cinétique de la réaction est très rapide mais la réaction compétitive de saponification réduit l'efficacité de production de biodiesel. Pour empêcher la perte de rendement de biodiesel due à la réaction de saponification, l'alcool doit être sec et l'huile devrait avoir une quantité minimum d'acides gras libres. Le biodiesel est finalement récupéré par le lavage répété à l'eau pour enlever le glycérol, le savon et l'excès du méthanol. (Koulidiati and Vaitilingom, 2008).

La production de biodiesel a augmenté dans ces dernières années afin de réduire la dépendance à l'égard du biodiesel importé. Par conséquent, une croissance importante de l'industrie du biodiesel est attendue dans les années à venir et la recherche et la technologie sur les processus de production de biodiesel seront plus élevées que jamais.

C'est dans cette optique que le thème de ce mémoire a été proposé. Notre but de travail sera focalisé principalement sur :

1. La production de biodiesel par valorisation des huiles de friture usées provenant des restaurants ;
2. Optimisation de la production de biodiesel ;
3. Evaluation des propriétés physico-chimiques du biodiesel produit dans les conditions optimales ;
4. Une étude comparative entre les propriétés physicochimiques du biodiesel que nous avons produit et celles exigées par la norme Européen EN 1412/Biodiesel.

Ce présent travail est subdivisé comme suit :

Le premier chapitre présente un aperçu sur les huiles végétales, les bioénergies, les procédés de production du biodiesel tel que la transestérification.

La seconde partie de ce travail concerne l'expérimental où les différents instruments, méthodes de caractérisation et du dosage sont présentés.

La dernière partie du travail concernera donc la discussion des résultats rapportés dans la littérature par des auteurs qui travaillent sur ce domaine d'étude.

Enfin, nous terminons par une conclusion générale qui récapitule l'essentiel du travail.

Chapitre I

Synthèse bibliographique

I.1. Généralités sur les huiles végétales

I.1.1. Définition

Les huiles végétales sont extraites des graines, des amandes et des fruits. Les oléagineux sont ceux qui servent à produire industriellement de l'huile et qui sont cultivés dans ce but. Parmi les plantes cultivées pour leur huile, on cite : l'arachide, l'olivier, le colza, le ricin, le soja et le tournesol. En général toutes les graines contiennent de l'huile (Türe et *al.*, 1997).

Les huiles végétales sont des substances insolubles dans les solvants minéraux constituées en majeure partie d'esters de glycérol d'acides gras appelés triglycérides. Du point de vue structural, un triglycéride est une molécule de glycérol est constituée de trois molécules d'acides mono carboxylique, a longue chaîne hydrocarbonée appelés acides gras dont la structure chimique suivante (Figure I.1), (Mitchell, 2008) :

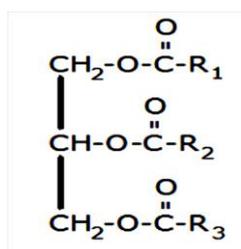


Figure I.1. Structure générale d'une huile végétale. R₁, R₂, R₃ désignent des chaînes d'acides gras et différent en longueur et nombre de double liaison (Mitchell, 2008)

I.1.1 Propriétés et compositions principales des huiles

I.1.2.1 L'huile de tournesol

Cette huile, de première pression à froid, est de saveur douce, d'odeur légère et agréable : sa couleur varie entre le jaune pâle et le jaune orangé. C'est une très bonne huile de table dont le goût discret ne nuit pas aux préparations subtiles. Sa richesse en acide linoléique, acide gras essentiel, exerce une action sur la peau, les muqueuses, le système endocrinien et nerveux. Son activité est surtout remarquable en cas d'hypercholestérolémie et d'athérosclérose, et de manière générale dans toutes les maladies cardio-vasculaires (Cossut, 2002).

I.1.2.2. L'huile de colza

L'huile de colza, des huiles de grande consommation, l'huile de colza est la seule, avec est constituée en majeure partie d'acide oléique (58% des acides gras). Elle contient en outre des quantités appréciables d'acides gras essentiels : 22% d'acide linoléique et 9% d'acide alpha-linoléique. Parmi toutes les huiles de soja, à apporter de l'acide alpha-linoléique. Avant 1970, la composition de l'huile de colza était différente, à la place de l'acide oléique, on trouvait l'acide érucique, acide gras suspecté de provoquer des lésions du myocarde. Depuis 1975, les généticiens ont mis au point des variétés de colza dont l'huile ne renferme plus d'acide érucique.

I.1.2.3. L'huile de maïs

L'huile de maïs, de première pression à froid, est assez visqueuse, de couleur jaune clair à jaune brun, à saveur et odeur de grain (quand elle est fraîche). Elle est riche en acides gras polyinsaturés (famille des linoléiques) et peut servir à la friture comme à l'assaisonnement.

I.1.2.4. L'huile d'arachide

L'huile d'arachide de première pression à froid est de couleur variant du jaune au brun, sa saveur est particulière et à peine perceptible dans les espèces fines. Riche en acides gras mono-insaturés, elle peut être utilisée pour l'assaisonnement, la cuisson et les fritures. Elle résiste particulièrement bien aux hautes températures (Cossut, 2002).

I.1.2.5. L'huile de soja

L'huile de soja est fluide et d'un jaune plus ou moins foncé suivant la nature des graines et les procédés d'extraction. Fraîche, elle a une saveur assez prononcée de haricot qui s'atténue peu à peu. Elle est riche en acides gras polyinsaturés et notamment en acide gras essentiel alpha-linoléique (Boudries, 2017).

Elle est recommandée pour les assaisonnements. Sa richesse en lécithine la rend précieuse pour la reconstitution des cellules nerveuses et cérébrales. En effet, les lécithines participent au transport des esters de cholestérol, des sels biliaires et des lipoprotéines. On la recommande aux personnes nerveuses et aux diabétiques. Sa bonne digestibilité en fait une bonne remplaçante de l'huile d'olive pour ceux qui ne peuvent la tolérer (Cossut, 2002).

I.1.2.6. L'huile de pépins de raisin

L'huile de pépins de raisin est une huile fluide, de saveur douce, de couleur claire et inodore. Elle provient des régions viticoles du midi de la France et en Italie. Elle est riche en acide gras essentiel linoléique (Cossut, 2001-2002).

I.1.2.7. L'huile de noix

L'huile de noix est une des rares huiles de fruits oléagineux consommée en France, avec l'olive et la noisette. De couleur jaune clair à verdâtre, elle est surtout recherchée pour son goût exceptionnel. Elle contient les deux acides gras essentiels en grande quantité, ce qui est un atout rare. Sa richesse en acide alpha-linolénique en fait une huile qui rancit vite. Il vaut donc mieux l'acheter en petits conditionnements. (Cossut, 2001-2002).

I.1.2.8. L'huile d'olive

L'huile d'olive revêt plusieurs caractéristiques la rendant très intéressante sur le plan nutritionnel. Elle résiste très bien à la friture, sa richesse en acide oléique lui confère un rôle dans la lutte contre les maladies cardio-vasculaires. Comme la montre les études sur la diète méditerranéenne, elle a un effet hypocholestérolémiant, elle gêne aussi l'agrégation plaquettaire au niveau des vaisseaux sanguins et réduit ainsi les risques de thrombose artérielle, l'huile d'olive a aussi un effet bénéfique sur les fonctions digestives notamment en régulant le transit intestinal, et en favorisant la sécrétion de bile. De toutes les huiles, c'est la mieux absorbée par l'intestin (Cossut, 2001-2002).

I.1.3. Caractéristiques physico-chimiques des huiles végétales et leur qualité

I.1.3.1. Caractéristiques chimiques

A_Nature des acides gras de l'huile

La nature et les teneurs en acides gras des huiles déterminent pour une grande part leur aptitude à brûler correctement dans un moteur. L'influence de la nature des acides gras sur leur qualité en tant que carburant a été mise en évidence. Les huiles saturées présentent une meilleure qualité de combustion (faible temps d'évaporation, faible délai d'inflammation, moins de dépôts) que les huiles insaturées. La qualité de combustion décroît avec l'insaturation. La teneur en acides gras saturés n'est pas cependant un critère suffisant pour définir la qualité de carburant d'une huile végétale. Par ailleurs, la nature des acides gras des huiles végétales détermine leur tendance à la polymérisation. Ce phénomène qui intervient

plus souvent avec les huiles insaturées, peut causer le colmatage des crémaillères pilotant l'injection du carburant (koulidiati and Vaitilingom, 2008).

B_ Indice d'iode

C'est le nombre de grammes d'iode fixé par 100 g de corps gras. Il caractérise l'insaturation de l'huile (nombre de doubles et de triples liaisons). Plus l'huile est insaturée, plus son indice d'iode est élevé. Un indice d'iode faible (huile saturée) est favorable à une bonne combustion. Cependant un indice d'iode trop faible peut conduire à des caractéristiques à froid défavorables pour un usage « carburant ». La figure I.2 donne les indices d'iodes de quelques huiles végétales (koulidiati and Vaitilingom, 2008).

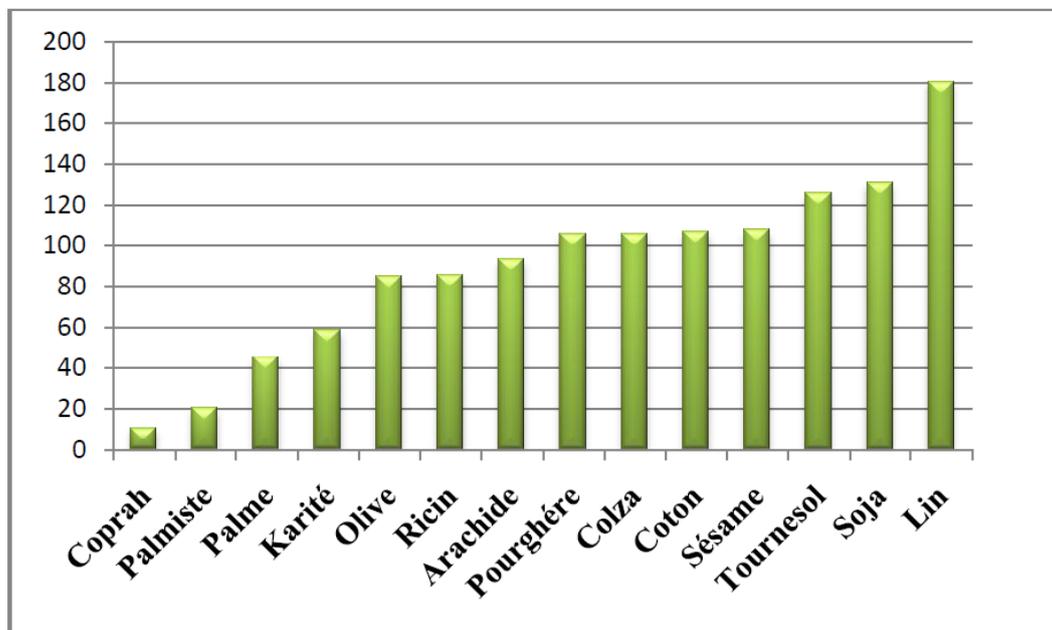


Figure I.2. Indice d'iode de quelques huiles végétales (koulidiati and Vaitilingom, 2008).

C_ Indice de saponification

C'est la quantité de potasse, exprimée en milligrammes, nécessaire pour saponifier un gramme de corps gras (koulidiati and Vaitilingom, 2008).

D_ Indice d'acide

Il détermine la teneur en acides gras libres et l'altération d'une huile. C'est le nombre de milligrammes de potasse nécessaire pour neutraliser l'acidité d'un gramme de matière grasse. La teneur en acides gras libres d'un corps gras est souvent exprimée par l'acidité. En plus des acides gras libres, naturellement présents dans les huiles (éliminés au cours du raffinage en

général), les corps gras s'altèrent naturellement par hydrolyse en donnant naissance à des acides gras libres et du glycérol. Certaines études rapportent une influence positive de l'acidité de l'huile sur le délai d'inflammation (Pryde, 1982 ; Vaitilingom, 1992).

Plus l'acidité de l'huile est élevée, plus son délaient vers celui du gazole. Il faut cependant, tenir compte du caractère corrosif des acides.

E_ Indice de peroxyde

Il permet d'apprécier le degré d'oxydation d'une huile. Plus une huile est insaturée, plus elle est sensible à l'oxydation ; Il croît avec l'insaturation de l'huile. Des études indiquent qu'il existe pour certaines huiles, une plage d'indice de peroxyde où l'indice de cétane augmente avec l'indice de peroxyde (Srivastava and Prasad, 2000).

I.1.3.2. Caractéristiques physiques

A_ Masse volumique

La masse volumique des huiles végétales est supérieure à celle du gazole (environ 10%). Mais cela n'a que peu d'effet sur le comportement du moteur ou du brûleur. Toutefois, le réglage du débit de carburant devra s'effectuer en prenant en compte cette différence de masse volumique et le fait de sa variation avec la température (Pryde, 1982).

B_ Viscosité

Elle dépend en grande partie de la nature du fluide et de sa température. Les huiles végétales et le gazole se comportent tous comme des fluides Newtoniens. Leur viscosité en fonction de la température évolue suivant une loi type de puissance (Vaitilingom, 1992) : $\mu = AT^B$ Avec A et B des constantes (μ en m Pas, T en °C) La viscosité a des incidences sur le fonctionnement du moteur Diesel ou du brûleur, notamment l'injection, l'atomisation, la vaporisation et la combustion. Une forte viscosité du carburant, comme c'est le cas avec les huiles végétales (10 à 15 fois plus élevée que celle du gazole), provoque des pertes de charge importantes dans la pompe d'injection ainsi que dans les filtres, les injecteurs ou le gicleur. Aussi, on obtient souvent des problèmes de lubrification sur certaines pompes d'injection à basse température entraînant des pertes mécaniques importantes. La forte viscosité des huiles végétales est attribuée à leur masse molaire plus élevée (au moins trois fois plus élevée) par rapport à celle du gazole. Une réduction de la viscosité des huiles végétales avant l'injection est alors indispensable (Srivastava and Prasad, 2000).

C_ Volatilité

Les caractéristiques de volatilité des carburants sont déterminées par leur courbe de distillation, leur tension superficielle et leur point éclair (Koulidiati and Vaitilingom, 2008).

D_ Les points de trouble et d'écoulement

Ces deux caractéristiques déterminent principalement le comportement à froid du carburant (Stansell et al., 2012). Le point de trouble (ou Cloud Point, en anglais) est la température à laquelle, un produit refroidi dans des conditions normalisées commence à présenter des cristaux. Sa valeur détermine la tendance du produit à colmater les filtres. Quant au point d'écoulement (ou Pour Point), il représente la température la plus basse à laquelle un produit refroidi dans des conditions normalisées est susceptible de couler encore. Il détermine les conditions de stockage, de transport, de « pompage » du carburant. Plus une huile végétale n'est saturée, plus ces deux caractéristiques présentent des valeurs élevées. C'est le cas de certaines huiles saturées (palme, coprah), solides à température ambiante (en général). A l'opposé, des huiles insaturées telles les huiles de colza et de coton ont des points de trouble et d'écoulement relativement bas (Koulidiati and Vaitilingom, 2008).

I.1.4. Critères de choix de la matière première et les huiles usées comme source de biodiesel

La source de biodiesel doit répondre le plus possible à deux critères très importants:

- Bas prix de production
- Une large échelle de production

Le prix des huiles comestibles, comme l'huile de soja par exemple, est plus élevé que le diesel. C'est pourquoi les déchets d'huiles végétales et les huiles végétales non comestibles sont préférés comme source de corps gras pour la production du biodiesel. On peut même utiliser les huiles de friture, d'équarrissage, des huiles animales variées, comme les huiles de poisson, et même des graisses, car pour les esters formés avec ces huiles-là, on peut gagner plus de 10°C en point d'écoulement. D'autre part, pour choisir la source de biodiesel, il est important de prendre en considération le pourcentage d'huile dans la plante et le rendement d'huile par hectare (Figure I.3), (Cantin, 2010).

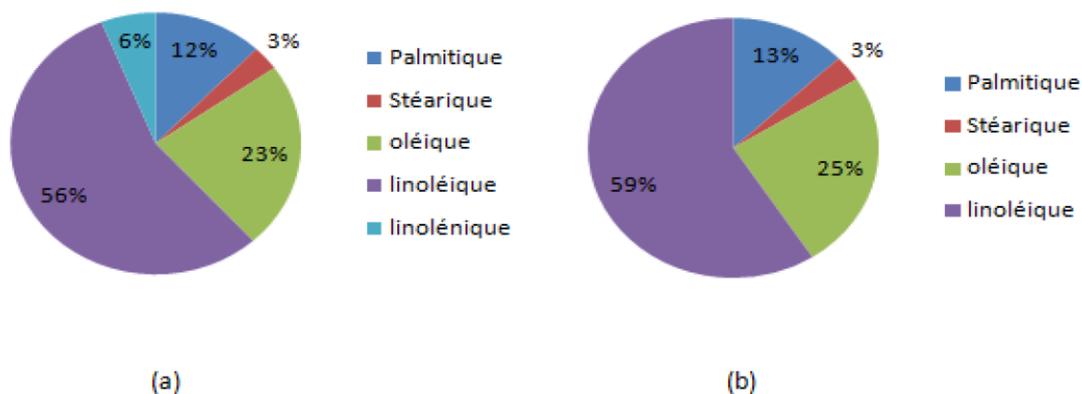


Figure I.3. Composition des acides gras des huiles, (a) : huile de soja, (b) : huile de tournesol (Cantin, 2010).

I.1.5. Les huiles usagées

Les huiles usagées (pour la friture) sont les huiles qui ont été utilisée comme matière première dans les processus de cuisson des restaurants, cantines friteries, industries alimentaires. Comme toutes les activités économiques, le secteur de la restauration est un producteur de déchets et plus particulièrement des huiles alimentaires usagées, essentiellement des huiles de friture, ces huiles sont recyclées à partir d'un système de collecte sélective et un traitement spécifique.

Le recyclage des huiles usagées réduit le coût des matières premières car son prix est moins cher que celui des huiles végétales vierges, ce qui pourrait réduire considérablement le coût total de production du biodiesel non seulement par rapport à celui obtenu à partir des huiles vierges mais également inférieur à celui du diesel.

I.1.6. Impact environnemental et économique des rejets des huiles usagées

Les huiles alimentaires usagées engendrent des nuisances comme les mauvaises odeurs dues à la fermentation, la charge organique, les dégradations du fonctionnement des stations d'épuration ou encore le pouvoir colmatant important des eaux résiduaires évacuées vers les dispositifs d'assainissement.

Le versement des huiles usagées dans les égouts peut engendrer des bouchures causant de nombreux désagrément, c'est-à-dire que dans le meilleur des cas, on va voir apparaitre un renflouement entraînant de petite inondation et mauvaises odeurs, la solution dans ce cas est un curage périodique onéreux. Sinon l'accumulation d'huile mélangée avec d'autre des déchets

peut provoquer des dégâts beaucoup plus grave comme la rupture des canalisations et par conséquence de grosse inondations (Boudries, 2017).

Les réparations sont alors couteuses et la remise en état empêche l'activité se poursuivre pendant le temps des réparations et donc génère un manque à gagner. Concrètement, 1L d'huile déversé dans l'évier peut contaminer jusqu'à 1 million de litre d'eau, autrement dit la quantité nécessaire pour répondre aux nécessités d'un être humain pendant 14 ans. Quand on verse de l'huile de la nature, la pollution des sols et des ressources d'eau est immédiate.

Les matières organiques diminuent le taux en oxygène dans l'eau et engendrent l'asphyxie des organismes vivant dans l'eau, causant de façon directe la mort de nombreux poissons. De même, rejeter de l'huile dans les égouts n'est pas non plus une solution à prendre en considération puisque le coût de traitement des eaux usées dans les stations d'épurations est alors revu à la hausse. Parmi les autres bénéfices environnementaux liés au recyclage des huiles alimentaires, on peut évoquer la réutilisation de l'eau épurée, la baisse du coût d'opération des eaux résiduaires, la réduction de la dégradation et de l'engorgement des systèmes d'assainissement, la diminution de la probabilité de prolifération du micro-organisme pour la santé et aussi la réduction de la dépendance énergétique de l'extérieur (Boudries, 2017).

Grace au recyclage des huiles usagées la consommation d'hydrocarbures diminuent et des émissions de CO₂ sont évitées (Boudries, 2017).

1.2. Généralités sur les biocarburants

I.2.1. Introduction

L'idée de produire des carburants à partir de matières premières renouvelables n'est pas nouvelle. Avant l'ère du pétrole, les carburants des débuts de l'automobile étaient d'origine végétale. En effet, le moteur à explosion était conçu par N. Otto pour utiliser de l'éthanol ; tandis que Rudolf Diesel faisait tourner son moteur à l'huile d'arachide en 1900. Des bus (avant 1914), des voitures (par exemple la Ford T, 1903 - 1926) fonctionnaient à l'alcool. L'usage des biocarburants, s'est développé pendant la seconde guerre mondiale. Après, ils n'ont pas connu de développements significatifs et ont même disparu du marché dans les années soixante. Ce n'est qu'après les deux chocs pétroliers (1973 et 1979) qu'ils redeviennent d'actualité.

La relance des biocarburants s'est faite à partir de 1990. Les bioénergies désignent l'ensemble des filières de valorisation énergétique de la biomasse. La biomasse est l'ensemble de la matière organique d'origine végétale, animale ainsi que leurs produits de transformation. La biomasse est une source d'énergie alternative et propre ; son utilisation est en plein essor dans le monde en particulier les pays développés. Le caractère renouvelable attribué à l'énergie issue de la biomasse s'explique par le cycle équilibré du carbone. Si ce cycle n'est pas équilibré la biomasse ne peut pas être considérée comme une source d'énergie propre et renouvelable. L'avantage de la conversion énergétique de la biomasse, par rapport aux autres sources énergétiques renouvelables, réside dans le fait qu'en plus de la production d'énergie, elle participe activement aux traitements des déchets organiques contribuant ainsi à l'assainissement de l'environnement.

On peut distinguer trois types de biomasse (IEA, 2009) :

- La biomasse animale telle que graisses animales, rejets d'abattoirs, ...
- La biomasse végétale indirecte issue des déchets agroalimentaires, d'élevages d'animaux, de papeteries, des ménages, ...
- La biomasse végétale directe issue des différentes plantes (bois, betterave, canne à sucre, maïs, tournesol, colza, algues, ...)

La valorisation de la biomasse en énergie peut être réalisée selon trois procédés (figure I.4):

- Biochimiques : fermentation et méthanisation
- Thermochimiques : combustion, pyrolyse et gazéification
- Physicochimiques : extractions, purifications et transestérification d'huiles végétales

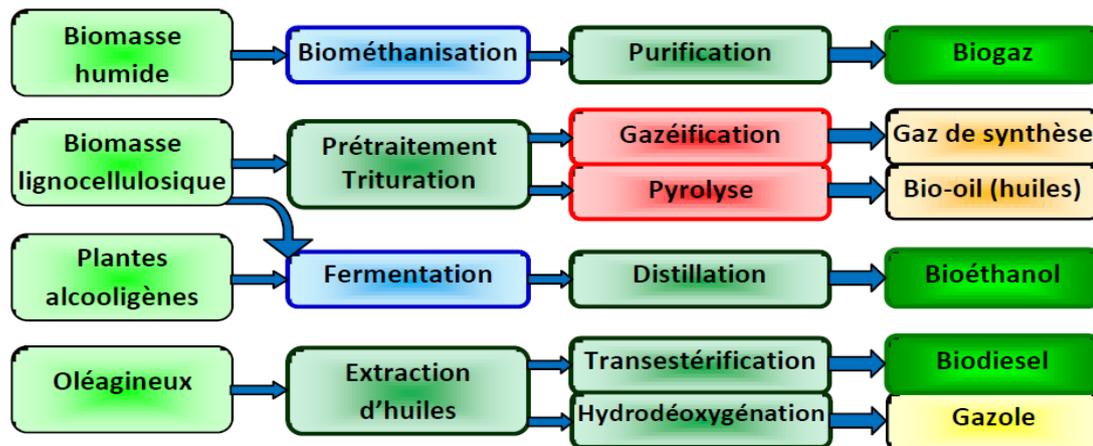


Figure I.4. Filières de conversion de la biomasse en bioénergies selon les différents procédés (IEA, 2009), biochimique (), thermochimique () et physicochimique ()

Par conséquent les bioénergies sont séparées en plusieurs filières selon le type de procédé, la forme de l'énergie ou vecteur (gazeux, liquide ou solide) d'énergie propre et renouvelable.

I.2.2. Définition biocarburant

Les biocarburants sont des carburants produits à partir de matériaux organiques non fossiles, provenant de la biomasse. Il fait partie de la palette des énergies dites renouvelables (eau, vent, géothermie, bois, biogaz, etc.) déployées ces dernières années pour se substituer aux énergies primaires (charbon, gaz naturel, pétrole), (et *al.*, 2019).

Le terme biocarburant est générique et inclut le bioéthanol, le biodiesel, la bio-huile, le biogaz, les liquides de Fischer-Tropsch et le bio-hydrogène (Jegannathan et *al.*, 2009, Akroum-Amrouche et *al.*, 2019, Miñón-Fuentes and Aguilar-Juárez, 2020). Le bioéthanol et le biodiesel sont les plus produits et peuvent être synthétisés à partir de la biomasse par

l'intermédiaire de la catalyse chimique ou biologique. Les biocarburants représentent une source d'énergie renouvelable, sans grand danger pour l'environnement et constituent ainsi une voie de développement soutenable et durable. En effet, ils contribuent à réduire les émissions de gaz à effet de serre et de ce fait, à améliorer la qualité de l'air (Hoekman et *al.* 2012). De plus, ils peuvent se substituer aux carburants fossiles (Knothe, 2005) et assurer une certaine stabilité économique en réduisant la dépendance énergétique, donc les biocarburants généralement produits sont :

I.2.2.1. 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.

Les biogaz peuvent être obtenus soit par méthanisation des déchets organiques (Abdeshahian et *al.*, 2016), soit par gazéification (craquage thermique) du bois (Amirta et *al.*, 2016). De même, plusieurs processus naturels entraînent la production du biogaz (digestion des ruminants et décomposition naturelle dans les étendues marécageuses). Cependant, les sources générées par l'activité humaine sont également importantes et, plutôt que de représenter des déchets, elles pourraient être utilisées comme matière première pour produire de l'énergie; ces sources de biogaz sont les déchets solides des sites d'enfouissement sanitaire ou technique (dépotaires) ou encore les boues des stations d'épuration.

I.2.2.2. Le bioéthanol

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

- Les sucres simples ou amidon hydrolysé (dégradé) provenant de plantes consommables (canne à sucre, maïs, etc.); ce sont des agro-carburants.
- 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. L'éthanol produit par cette fermentation est combustible et peut être ajouté aux carburants conventionnels. Les alcools peuvent être utilisés comme additifs pour les carburants et dans d'autres cas, ils sont utilisés comme matière première

pour la fabrication d'autres carburants; dans des moteurs conçus pour cette utilisation. Le taux d'éthanol peut aller jusqu'à 85%, mais un taux plus faible de 5 à 10% est même actuellement ajouté aux carburants des voitures et ce, sans aucune modification nécessaire des moteurs (Chen and Fu, 2016).

I.2.2.3. La bio-huile (bio-oil)

Ce sont les produits liquides issus de la solvolysse ou de la pyrolyse de la biomasse (bois, huiles végétales et graisses animales). 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 (Özbay et al., 2008 ; Goyal et al., 2008).

I.2.2.4. Le biodiesel (biogazol)

Le biodiesel est un biocarburant destiné à être utilisé dans les moteurs Diesel et provient de la conversion des lipides (huiles végétales et graisses animales) en carburant. Les sources de matière première les plus utilisées pour la fabrication du biodiesel sont :

- Les huiles végétales, vierges ou usées ; il s'agit aussi d'un agro-carburant.
- Les huiles extraites d'algues ou de micro algues (algo-carburant).
- Les graisses animales (relativement peu utilisées). Le biodiesel est très semblable au Diesel conventionnel et peut être utilisé sans modifications majeures des moteurs ; c'est un carburant prometteur qui pollue moins. Actuellement, il est souvent ajouté au Diesel classique dans des pourcentages variables (Özbay et al., 2008).

I.2.3. Classification des biocarburants

Les biocarburants de première génération sont obtenus à travers deux filières principales que sont la filière bioéthanol et la filière biodiesel.

Les biocarburants de seconde génération sont plus en voie de recherche. Ils comprennent entre autres la filière lignocellulosique-biocombustible, la filière éthanol à partir de déchets de bois sous l'action des termites.

Les biocarburants de troisièmes générations sont les algocarburants, pour éviter d'épuiser les terres arables et pour pallier le manque de disponibilité des produits celluloses, les

scientifiques tentent actuellement de produire du carburant à partir de micro-algues (et *al.*, 2019), (Figure I.5).

I.2.1.3. 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. Ces biocarburants sont caractérisés par une commercialisation à grande échelle et par des technologies assimilées et des procédés de production relativement simples (Jegannathan et *al.*, 2009 ; Vaitilingom, 2007).

Le biocarburant de première génération le plus répandu est l'éthanol, dont la production est largement dominée par le Brésil et les États-Unis. Il est obtenu par fermentation par des levures de sucres simples issus des plantes (canne à sucre et betterave), ou de l'amidon issu des céréales (maïs et blé). Il peut être mélangé directement à l'essence à des teneurs allant de 5 à 26% ou à des taux encore plus élevés pour les véhicules dits flexibles introduits avec succès au Brésil (Ndayishimiye, 2010).

Un autre biocarburant de première génération, le plus connu et le plus consommé, est le biodiesel produit à partir de plantes oléagineuses par transestérification ou craquage (Nigam and Singh, 2011) à l'exemple du biodiesel synthétisé à partir de l'huile de colza en Allemagne et à partir de l'huile de palme en Malaisie (Vaitilingom, 2007). Les biocarburants dits de première génération sont issus de la conversion de cultures alimentaires en sources d'énergie, plutôt qu'en produits alimentaires ; un champ de colza par exemple, peut aussi bien servir à produire de l'huile alimentaire que du biocarburant. Par conséquent, la production de ces biocarburants entre en compétition directe avec la production alimentaire et donc, avec la disponibilité et le cours des aliments dans le monde. Cette concurrence avec des produits de première nécessité constitue l'une des principales critiques envers les biocarburants de première génération. De plus, plusieurs études s'accordent à attribuer à ce type de biocarburant des sous-entendus à travers une supposée concurrence et une tension sur les ressources liées à des besoins en surfaces agricoles. Un bilan en terme d'émission de gaz à effet de serre apparaîtrait ainsi moins favorable avec la prise en compte des conditions de production et de distribution, d'où des interférences probables avec les écosystèmes naturels et les systèmes alimentaires (Ndayishimiye, 2010) et pour compléter ces réflexions, nous citerons l'impact négatif sur la biodiversité.

Les limitations des biocarburants de première génération ont été identifiées à l'exception de l'éthanol produit à partir de la canne à sucre. Les recherches Filemon and Uriarte (2010)

ont mis l'accent sur la nécessité de trouver de nouvelles ressources énergétiques renouvelables extraites de la biomasse, d'où un nouveau type de produit, en l'occurrence le biocarburant de deuxième génération.

I.2.3.2. Biocarburants de deuxième génération

Un biocarburant de deuxième génération est obtenu à partir d'une biomasse dédiée au non-alimentaire, moins exigeante en termes de qualité de terre arable et en eau. Il s'agit plus spécifiquement de la biomasse lignocellulosique (lignine et cellulose), (Jegannathan et *al.*, 2009) associée aux parties non comestibles des plantes, aux déchets, aux résidus des récoltes agricoles, aux activités forestières, ainsi qu'à la fraction organique des déchets municipaux (Filemon and Uriarte, 2010).

Il devient alors envisageable de valoriser les pailles, les tiges, les feuilles ou même des plantes à croissance rapide (*Miscanthus* et *Jatropha curcas*) dont l'huile est non comestible et qui suscite un engouement général de la part de la communauté scientifique en raison de son important potentiel pour la production du biodiesel. Le principal avantage des biocarburants de deuxième génération réside dans le fait que ces produits limitent l'incommodante qualité qui oppose la production des denrées alimentaires à celle des biocarburants, tout en permettant, c'est à espérer, une exploitation plus efficiente des terres agricoles.

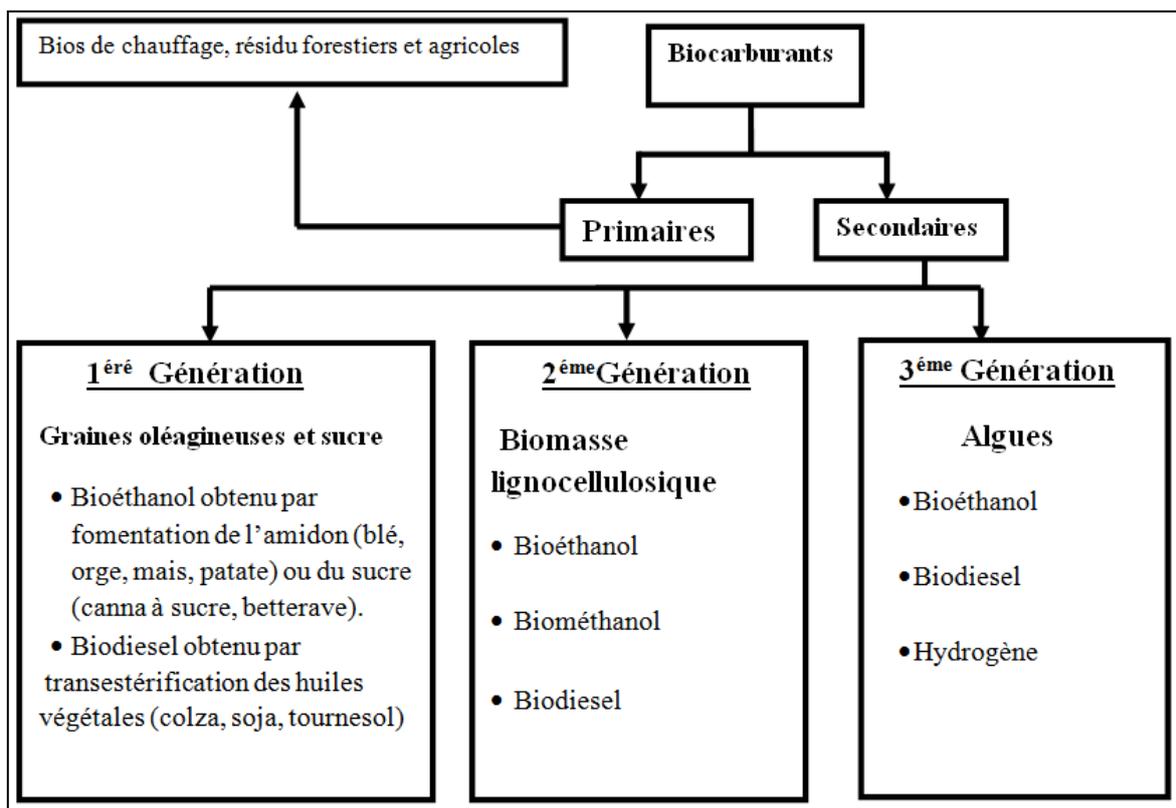
I.2.3.3. Biocarburants de troisième génération

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. Les avancées récentes ont montré que des espèces microbiennes comme la levure, les champignons (mycètes et champignons) et les micro-algues, peuvent être utilisées pour produire du biodiesel, du fait que ces organismes peuvent bio-synthétiser et stocker des quantités importantes d'acides gras, similaires à celles présentes dans les huiles végétales. Les algues sont recensées comme l'une des plus vieilles formes de vie sur terre ; elles sont présentes dans pratiquement tous les écosystèmes, dans une large variété d'espèces et qui présentent le taux de croissance le plus élevé de l'ensemble du règne végétal ; elles s'adaptent à des conditions environnementales très variées. Les cellules des algues sont de véritables usines biochimiques miniaturisées qui absorbent du CO₂ et produisent des lipides, des protéines et des hydrates de carbone. De plus, leur activité photosynthétique est beaucoup plus forte que celle des plantes terrestres et donc plus productives. Un grand nombre d'études s'intéressent à déterminer les conditions optimales de

la production de l'huile à partir des algues, aboutissent à des résultats prometteurs. En effet, il a été rapporté que le rendement en huile par hectare dépasse d'un facteur de 30 celui des cultures traditionnelles des plantes oléifères. Néanmoins, certains handicaps doivent être contournés, à l'instar du rendement des algues qui dépend fortement des radiations solaires, ce qui limite leur exploitation aux régions ensoleillées (procédés extensifs), à moins d'installer des photo-bioréacteurs fermés où les paramètres physicochimiques sont contrôlés (procédés intensifs). La mise en œuvre industrielle de la production des biocarburants à partir des micro-algues reste toutefois à confirmer (Nigam and Singh, 2010).

Nous nous focaliserons néanmoins dans ce travail, sur des concepts théoriques ayant trait aux biocarburants de deuxième génération.

Figure I.5. Classification des biocarburants



I.2.4. Le Biodiesel

I.2.4.1. Définition et origine de biodiesel

Les biocarburants sont des produits élaborés à partir de matériaux organique renouvelables en remplacement principalement des dérivés du pétrole d'origine fossile et donc, non renouvelables. Les biocarburants font partie de deux grandes familles, soit les substituts à

l'essence (bioéthanol, biobutanol et biométhanol) et les substituts au carburant diesel (biodiesel). Le biodiesel est un mélange constitué d'esters éthyliques ou méthyliques d'huile végétale (EEHV ou EMHV) ou de gras animal. Contrairement au pétrodiesel, qui est formé de plusieurs hydrocarbures composés uniquement d'atomes de carbone et d'hydrogène, le biodiesel contient de l'oxygène. Le biodiesel est par ailleurs biodégradable, ce qui n'est pas le cas du pétrodiesel.

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. 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 (Jegannathan et al. 2009).

I.2.4.2. Les procédés de production de biodiesel

Beaucoup de travaux ont été effectués dans le but de produire des dérivés des huiles végétales ayant des propriétés et performances assez voisines de celles du diesel. On distingue quatre méthodes principales de production de dérivés d'huiles végétales (Pryde, 1982).

A_ Microémulsion

Une microémulsion se forme spontanément lors du mélange de deux liquides non miscibles, souvent en combinaison avec un ou plusieurs co-surfactants ou molécules amphiphiles (ioniques ou non ioniques) : un mélange d'une huile végétale, un ester et un dispersant ou co-solvant, ou encore une huile végétale, un alcool (méthanol, éthanol, ou butanol) et un surfactant, avec ou sans ajout de carburant Diesel.

En raison de leur teneur en alcool, les microémulsions possèdent des chaleurs de combustion plus faibles que dans le cas du carburant Diesel, mais les alcools possèdent des

chaleurs latentes de vaporisation élevées et tendent à refroidir la chambre de combustion, ce qui permet de réduire le dépôt de carbone (Atabani et *al.*, 2013) .

Il s'agit d'une dispersion colloïdale isotrope, translucide et thermodynamiquement stable; le diamètre des gouttelettes d'une microémulsion se situe entre 100 et 1000 Å. Les microémulsions sont considérées comme une approche fiable pour réduire la viscosité des huiles végétales (Atabani et *al.*, 2013 ; Hamad, 2009). Deux procédés d'émulsifiassions sont souvent considérés, l'un utilise l'agitation mécanique classique et l'autre, les ultrasons de puissance. Les performances du procédé (en système continu ou discontinu) sont fonction du temps d'émulsifiassions, de la puissance consommée, de la concentration en tensioactifs, ainsi que de la fraction volumique de la phase dispersée. L'émulsifiassions de l'eau dans les carburants améliore la combustion et réduit les émissions des suies et des oxydes d'azote en même temps. En revanche, dans le cas des émissions du CO et des imbrûlés, les résultats de la littérature ne sont pas, à priori, tous cohérents. La première utilisation des émulsions dans les moteurs était des émulsions de l'eau dans le Diesel (Ghojel et *al.*, 2006).

B_ Pyrolyse ou craquage thermique

La pyrolyse est un procédé thermochimique défini comme étant la conversion thermique des matières organiques sèches, en l'absence d'oxygène et en présence d'un catalyseur ; il s'agit d'un craquage thermique de la chaîne carbonée des produits organiques et leur transformation en corps à plus courtes chaînes ayant des propriétés différentes de celles de la matière de départ. La pyrolyse nécessite une température assez élevée (400 à 850°C) et ses produits se répartissent en trois fractions :

- Liquide, appelée aussi huile de pyrolyse (constituée de condensables lourds et d'eau) ; cette phase liquide peut contenir les huiles végétales, les graisses animales, les acides gras naturels ou leurs esters alkylés. Elle se présente généralement avec une couleur qui peut varier entre le rouge, le rouge brun ou le vert foncé. La coloration et la texture de l'huile de pyrolyse dépendent fortement de la composition chimique de celle-ci.
- Solide (charbon) constituée généralement de résidus carbonés et appelée aussi carbura (fraction formée par du coke, des métaux ferreux et non ferreux, des sels, etc.).
- Gazes (CO, H₂, CO₂, CH₄, C₂H₄, C₂H₆, C₃H₆, C₃H₈, etc.).

La phase liquide est la plus recherchée grâce à la facilité de son stockage et son transport aisé. La répartition des trois fractions ainsi que la composition de chaque phase sont fortement tributaires des conditions expérimentales, à savoir la température, la vitesse de chauffe, le type de catalyseur utilisé, la matière première en elle-même, le temps de séjour de celle-ci

dans le réacteur et enfin, la pression. Vu le nombre de voies chimiques que la réaction de pyrolyse peut comporter et la variété des produits pouvant être obtenus, ce processus est efficace, simple et n'engendre pas de sous-produits ou de pollution, mais cependant parfois difficilement interprétable (Maher and Bressler, 2007 ; Wiggers et *al.*, 2009).

La pyrolyse des triglycérides conduit à la formation des alcanes, alcènes, aromatiques, alcools, oléfines, aldéhydes, cétones, acides carboxyliques ainsi que d'autres variétés (Wisniewski et *al.*, 2010) et la nature des triglycérides influent sur les produits de la décomposition thermique. La fraction liquide issue de la décomposition thermique des huiles végétales est de nature chimique proche de celle du Diesel conventionnel. Cependant, elle engendre un indice de cétane inférieur à celui du carburant Diesel et renferme une quantité acceptable de soufre, d'eau, de sédiments et donne finalement des valeurs de corrosion cuivrique acceptables, contrairement aux cendres et au carbone résiduel. Elle se présente généralement avec une couleur qui peut varier entre le rouge, le rouge brun ou le vert foncé. La coloration et la texture de l'huile de pyrolyse dépendent fortement de la composition chimique de celle-ci.

C_ Dilution

Les huiles végétales peuvent être diluées dans le Diesel conventionnel afin de réduire leur viscosité et améliorer les performances et le fonctionnement du moteur; cette méthode ne requiert en outre, aucun traitement chimique. Comme les huiles végétales ne peuvent être directement employées dans le moteur Diesel, sauf modification majeure, des mélanges de 20 à 25% d'une huile végétale et de Diesel ont été envisagés et ont donné des résultats satisfaisants (Atabani et *al.*, 2013). Les émissions de fumée et d'hydrocarbures dans les gaz d'échappement diminuent, alors que les quantités de monoxyde de carbone et d'oxydes d'azote NOx restent inchangées. L'adjonction du Diesel ou d'autres additifs dans l'huile pour lui éviter le gel ne constitue en rien une solution durable, car elle peut présenter un effet négatif sur les performances du moteur. En effet, il est vrai que les conditions d'écoulement sont améliorées mais leur utilisation prolongée dans le moteur engendre des dépôts carbonneux dans le cylindre et des encrassements importants, particulièrement au niveau des injecteurs.

Le souci majeur de ce procédé est que le mélange ne peut être recommandé pour une utilisation à long terme dans les moteurs Diesel à injection directe, en raison des graves problèmes de collage et de cokéfaction des injecteurs. Une autre méthode simple, très utilisée pour la réduction de la viscosité des huiles végétales ou des graisses animales est le

préchauffage ou sa combinaison avec la dilution. En effet, plusieurs études ont été menées dans cette optique pour montrer que l'huile végétale (ou graisse animale), préchauffée ou mélangée avec le Diesel, peut être utilisée directement dans les moteurs Diesel à court terme sans introduire aucune modification (Hazar and Aydin, 2010 ; Agarwal, 2007).

D_ Transestérification

La transestérification nommée aussi alcoololyse (Figure I.6), c'est la réaction entre un ester et un alcool conduisant à un ester différent (Allinger et *al.*, 1983).

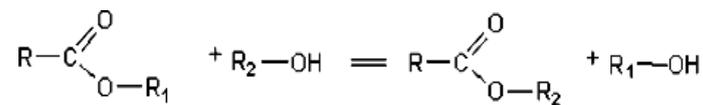


Figure I.6. Réaction générale de la transestérification (Allinger et *al.*, 1983).

Dans notre cas, il s'agit de la réaction entre le triglycéride contenu dans une huile végétale avec un alcool pour former le glycérol et un mélange de mono esters utilisés comme biocarburant (Ma and Hanna, 1999).

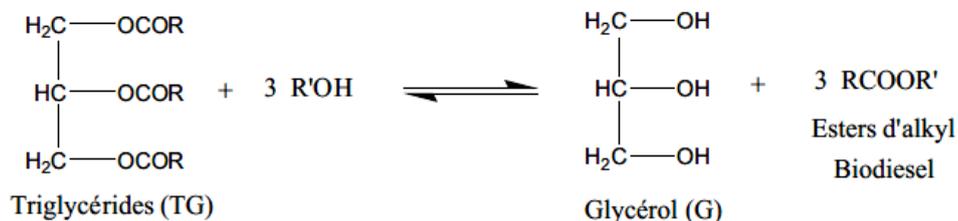


Figure I.7. Réaction de transestérification des triglycérides avec l'alcool (Ma and Hanna, 1999).

Elle est catalysée aussi bien par les acides que par les bases (Allinger et *al.*, 1983). Elle est favorisée par une augmentation de température, un excès d'alcool ou lorsque les conditions opératoires permettent la décantation du glycérol. Les détails de la réaction de transestérification (Figure I.7), les procédés de production du biodiesel et les diverses voies en développement (catalyse hétérogène et catalyse en supercritique) sont étudiés dans la partie suivante.

I.2.4.3. Les caractéristiques du biodiesel

Les propriétés physicochimiques du biodiesel présentant le plus grand intérêt sont le point éclair (Pe), le point de trouble (PT), le point d'écoulement, la viscosité cinématique, l'indice de cétane (IC), l'indice d'acide, la teneur en cendres Sulfatées, les résidus de carbone, les teneurs en eau ainsi qu'en sédiments, le glycérol libre et le glycérol total, la température limite de filtrabilité, la corrosion à la lame de cuivre, la stabilité à l'oxydation et la masse volumique (Fernando et *al.*, 2007).

A_ La viscosité

Comme indice de cétane, la viscosité augmente avec le nombre de carbone et diminue avec le degré d'insaturation. Une plus grande viscosité cinématique créerait des problèmes comme des dépôts dans le moteur (Knothe et *al.*, 2005). La transestérification favorise donc une diminution de la viscosité de huile à des valeurs généralement comprises entre 4 à 6 mm²/s (NREL, 2009).

B_ Le pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique indique si un biodiesel est adapté à brûler dans un moteur diesel. Le pouvoir calorifique augmente avec la longueur de la chaîne carbonée (Knothe et *al.*, 2005). En utilisant des lipides extraits de micro-algues hétérotrophes, en présence de H₂SO₄ dans le méthanol (Mia and Wu, 2006) ont obtenu un biodiesel avec un pouvoir calorifique de 41MJ/kg, valeur se trouvant dans la gamme du carburant diesel (40-45 MJ/kg).

C_ le point d'écoulement

Les propriétés d'écoulement à froid sont des paramètres importants lors de la production de biodiesel pour les pays nordiques comme le Canada et pourraient être évaluées par le point d'écoulement (Knothe et *al.*, 2005). Le point d'écoulement est défini comme la température à laquelle le biodiesel ne coule plus. Habituellement, le point d'écoulement augmente en fonction du rapport volumique de biodiesel dans le carburant pétrodiesel (NREL, 2009). Un niveau élevé de composés polyinsaturés dans le biodiesel de micro-algues pourrait être un avantage en termes de propriétés à froid pour un mélange de biodiesel micro-algues / pétrodiesel dans des climats froids.

D_ L'indice de cétane

L'indice de cétane est un indicateur de qualité de rallumage d'un carburant qui augmente avec le nombre de carbone et diminue avec le nombre de liaisons de carbone insaturées (Hart Energy Consulting, 2007). Par conséquent, un biodiesel avec une insaturation élevée comme le biodiesel issu des micro-algues aurait un indice de cétane plus faible que celui du biodiesel saturé. Selon nos connaissances, aucune mesure de l'indice de cétane du biodiesel des micro-algues n'a été effectuée. Cependant, certaines études ont estimé l'indice de cétane de nombreuses espèces de micro-algues en fonction de leur teneur en FAME et ont trouvé des valeurs variant de 39 à 54 (Stansell et *al.*, 2012) tandis que l'indice de cétane du carburant pétrodiesel se situe entre 47 et 51.

E_ L'oxydation

L'oxydation du biodiesel pourrait se produire lorsque les FAME sont en contact avec l'oxygène et sont transformés en hydrogénéperoxydes, aldéhydes, acides et autres composés oxygénés, ce qui pourrait former des dépôts dans le moteur (Knothe et *al.*, 2005). L'oxydation du biodiesel augmente en fonction du degré d'insaturation (Mia, and Wu, 2006). La stabilité à l'oxydation des lipides de micro-algues est un réel problème (Stansell et *al.*, 2012) qui peut être surmonté par l'ajout d'antioxydants si le mélange de biodiesel est stocké plus de quelques mois (NREL, 2009).

F_ Le pouvoir lubrifiant

La définition de la lubricité du diesel est influencée par sa viscosité, son acidité, sa teneur en eau et les composés soufrés (Seregin et *al.*, 1975). Même avec des additifs, le frottement mesuré (pas d'unité déclarée) du biodiesel (0,114 et 0,117) est inférieur à celui du diesel (0,238 et 0,210) pour les températures de 25 et 60°C (Knothe et *al.*, 2005). Par conséquent, un avantage de l'ajout de biodiesel ayant une faible teneur en soufre dans du pétrodiesel conventionnel est d'améliorer sa lubrification.

I.2.4.4. L'utilisation du biodiesel

Bien qu'il puisse être employé à l'état pur, le biodiesel est généralement mélangé avec le diesel dérivé du pétrole (pétrodiesel). Les mélanges de biodiesel-pétrodiesel sont identifiés par l'abréviation « Bxx », où « xx » indique le pourcentage de biodiesel dans le mélange. Ainsi, un carburant B20 contient 20 % de biodiesel et 80 % de pétrodiesel alors qu'un

carburant B100 correspond au biodiesel pur. Plusieurs types de mélange sont commercialisés dont les plus fréquents sont le B2, B5, B20 et B100.

La complexité et la diversité chimique du biodiesel (mélange d'esters) font en sorte qu'il doit être homologué selon plusieurs critères de qualité (par exemple, les normes ASTM D6751 en Amérique du Nord ou EN 14214 en Europe) avant d'être commercialisé. Tout biodiesel homologué à ces standards comporte une garantie de qualité minimale, entre autres pour l'indice de cétane, la viscosité et les teneurs en phosphore et en soufre. En Amérique un programme similaire aux programmes ISO, le BQ-9000, vise à assurer que le biodiesel produit respecte des normes de qualité préétablies au niveau de tous les maillons de la chaîne (pratiques d'entreposage, d'échantillonnage, d'évaluation, de mélange, de distribution et de gestion du biodiesel) et donc, jusqu'à ce qu'il soit rendu dans le réservoir du consommateur (Brodeur *et al.*, 2008).

I.2.4.5. Le biodiesel dans le monde

Aujourd'hui, la consommation mondiale en Diesel connaît une ascension rapide. En Europe par exemple, elle représente 60% de la demande en carburants. Dès le début des années 1990, la production des esters méthyliques à partir des huiles végétales a augmenté de façon remarquable, avec un taux de croissance annuel moyen de 35% dans l'Union Européenne, les plus gros producteurs de biodiesel sont les Etats Unis, l'Allemagne et la France. La Figure I.8 présente l'évolution de la production du biodiesel en Europe entre 2012 et 2017 (E.eur ; le journal des énergies, renouvelables, N°179,2017).

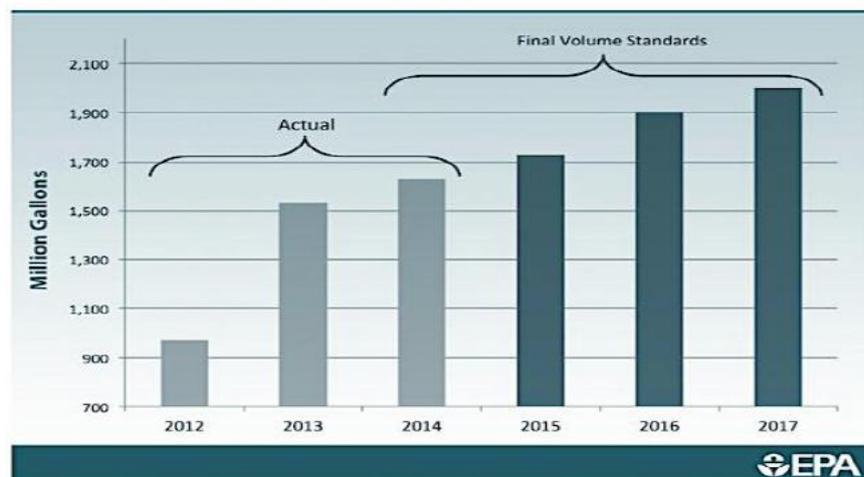


Figure I.8. Évolution de la production du biodiesel en Europe depuis 2012 (EurObserv'ER, 2017).

La capacité mondiale de production du biodiesel entre 2004 et 2009; est traduite par la dominance de l'Allemagne, de la France et de l'Italie, plus grands producteurs de biodiesel dans le monde, mais l'Amérique a dépassé la France en 2006 pour devenir le deuxième plus important producteur de biodiesel, après l'Allemagne (Ballerini *et al.*, 2006).

La politique de l'Allemagne vis-à-vis des énergies renouvelables, en général et du Diesel vert en particulier, classe ce pays comme premier producteur mondial et premier consommateur du biodiesel en Europe. En effet depuis 1991, la production et la vente du biodiesel a augmenté de 200 à 800000t. En 2003, 5000t d'huile de colza pure ont été utilisées dans 4000 véhicules essentiellement agricoles (Schwab.M *et al.*, 1987).

Le biodiesel est utilisé à l'état pur (B100), sans le mélanger au Diesel conventionnel, en Allemagne et en Autriche et ce, dans des moteurs de voitures, de bus, de camions, de tracteurs et d'autres engins agricoles. En France, le biodiesel porte la marque déposée de Diester et les pouvoirs publics français ont homologué un taux d'incorporation de 8% de Diester dans le Diesel (Freedman *et al.*, 1984). Le Brésil dispose de grandes surfaces cultivables, avec une surface de 90 Mha de terres agricoles. Ce pays occupe le deuxième rang dans la production mondiale de soja, avec un taux de 26% et a produit 9,4 Mt d'huile de soja pour l'exercice 2003-2004.

Les esters synthétisés à partir des huiles végétales produites, à savoir les huiles de tournesol, de coton et de ricin, sont en grande partie des esters éthyliques, vu la disponibilité de l'alcool éthylique, contrairement au méthanol importé. Aux États-Unis, les esters méthyliques d'huiles végétales (EMHV) sont synthétisés à partir d'huile de soja vierge et usagée et de graisse animale, avec des taux d'incorporation de 2 et 20% dans le Diesel. La production du biodiesel avoisine 200000 t/an, réparties en 25 unités.

I.2.4.6. Situation de biodiesel en Algérie

Certains pays africains ont davantage besoin d'accès à des sources d'énergie propres et renouvelables. Les nations productrices de pétrole comme l'Algérie, comptent sur cette source énergétique afin de satisfaire aux besoins énergétiques et optimiser ses intérêts économiques et industriels. D'autres pays africains dépendent des carburants fossiles, le bois de chauffe et le charbon de bois. Cette situation limite fortement le développement économique et social.

À l'heure actuelle, l'industrie africaine des biocarburants paraît être une des solutions aux problèmes énergétiques et économiques du continent. Loin d'être synonyme d'indépendance énergétique (production et consommation) les biocarburants permettraient le développement des économies africaines, actuellement étouffées par la grande demande des énergies fossiles.

En outre, l'industrie des biocarburants pourrait créer des emplois et limiter le chômage jusqu'à une certaine mesure.

La richesse de notre pays en hydrocarbures et son appartenance à l'Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole (OPEP) (plus de 90% des exportations de l'Algérie viennent du pétrole et du gaz naturel) ont freiné toute tentative d'utilisation et d'exploitation des énergies renouvelables, malgré les richesses naturelles solaires, éoliennes, bio massiques et géothermiques (Melhyas, 2010). L'Algérie est située dans une zone vulnérable aux effets néfastes des changements climatiques dus à la pollution et aux déséquilibres environnementaux. Aujourd'hui le secteur du transport est générateur d'un quart des émissions des gaz à effet de serre, responsables de ce déséquilibre climatique, qui pourrait être à l'origine d'un tiers de ces émissions en 2030. De plus, la consommation et la demande en énergie pour une source d'origine fossile et épuisable, vont augmenter par rapport à l'offre. La (Figure I.9) représente la comparaison chronologique entre la demande et l'offre pour les carburants Diesel en Algérie (Hamad, 2019).

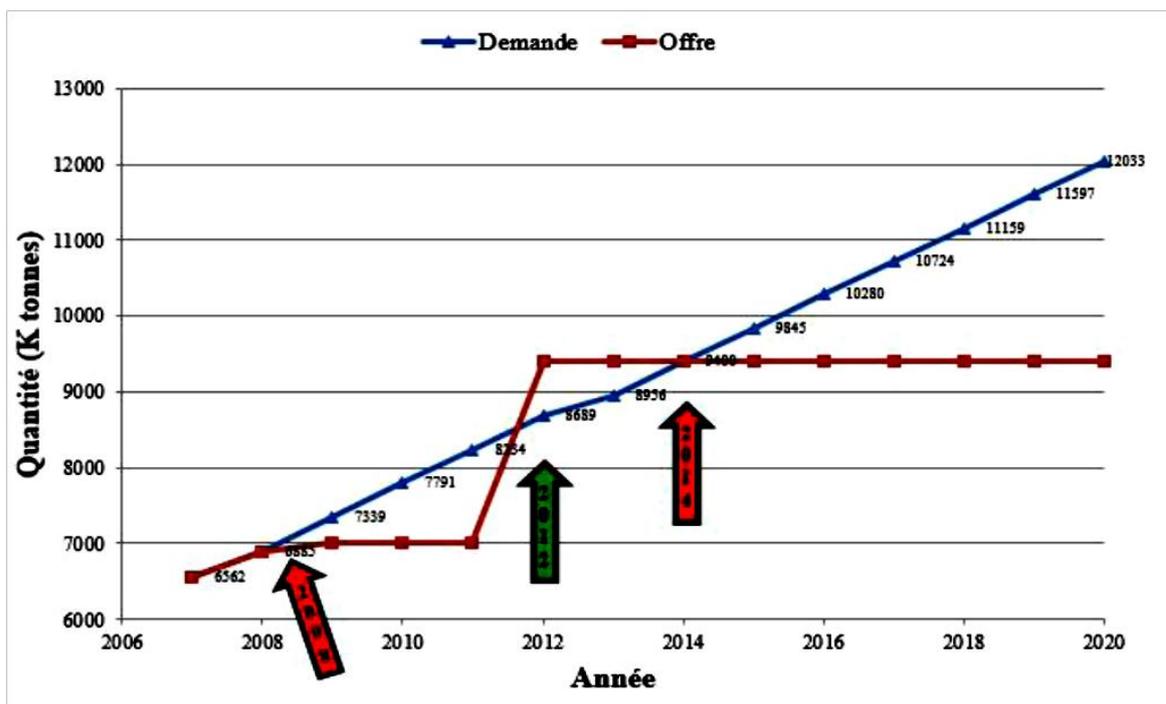


Figure I.9. Évolution de la demande et de l'offre pour le Diesel en Algérie (Hamad, 2019).

La (Figure I.9) montre un déficit enregistré de 2008 à fin 2011. À partir de 2012, date d'achèvement du programme de réhabilitation et d'adaptation, un excédent en Diesel a été enregistré jusqu'à 2014. Par la suite, une augmentation de la demande par rapport à l'offre est prévue, marquant ainsi un nouveau point de rupture (Hamad, 2019).

Pour pallier à ces aléas, les énergies renouvelables sont la meilleure alternative durable, à travers l'utilisation des biocarburants. Les cultures énergétiques donnant naissance aux matières premières de production des biocarburants en Algérie, ne font pas recours à des sources comestibles, d'où l'intérêt pour les biocarburants de deuxième génération, produits à partir de sources non alimentaires, de la cellulose et de déchets.

Consciente de l'intérêt grandissant des énergies renouvelables et de leurs enjeux, l'Algérie a intégré le développement de ce type d'énergie 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 l'illustration, malgré un développement en parallèle d'une bioénergie encore à l'échelle expérimentale dans les laboratoires de recherche.

Dans le cadre du développement de travaux en biotechnologie, le Haut-Commissariat à la Recherche avait inscrit en 1988 un axe de recherche s'articulant sur l'application des biotechnologies dans la valorisation des déchets agricoles et industriels et ce, pour la production du bioéthanol, la production d'acétone butanol (par utilisation de la biomasse) et enfin, la production de biogaz.

Algérie Biocarburant est une entreprise locale productrice de biodiesel à base d'huile de *Jatropha Curcas* non alimentaire; elle contribue au développement de l'économie et à l'augmentation des revenus des agriculteurs, grâce à l'énergie renouvelable issue de cette biomasse. En Algérie, les arbres du lentisque *Jatropha Curcas* s'étendent sur une vaste zone géographique, allant du littoral aux zones arides. Ces arbres poussent dans des sols à fertilité marginale; ils ont besoin de moins d'eau contrairement aux nombreuses autres cultures. Quelle que soit la région, les fruits de lentisque contiennent une teneur en huile élevée (de 32 à 60%). Ces facteurs font du lentisque une source attrayante pour la production des biocarburants.

La (Figure I.10) illustre le schéma de la récupération de l'huile à partir des fruits de *Jatropha Curcas* et la production du biodiesel en Algérie (Mesbahi, 2012).

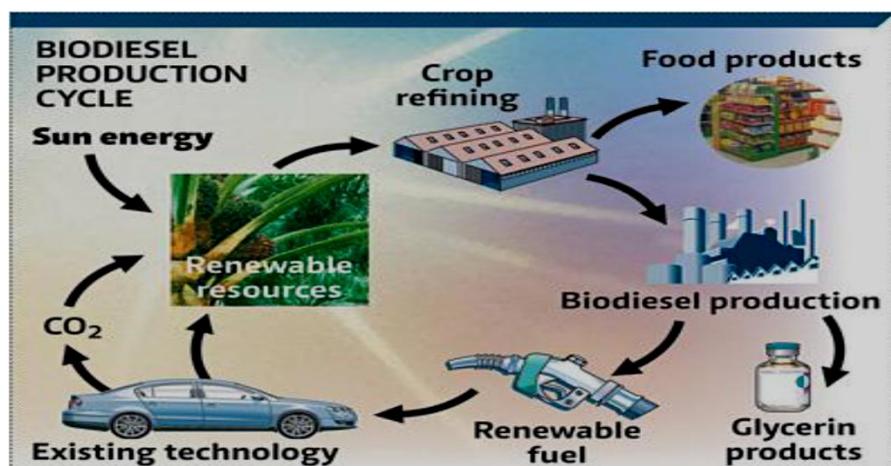


Figure I.10. Production du biodiesel en Algérie à partir de la biomasse (Mesbahi, 2012).

I.2.4.7. L'effet du biodiesel sur l'environnement et la santé humaine

Le biodiesel est nettement moins toxique pour l'environnement et l'être humain que son homologue pétrolier. Outre son excellente biodégradabilité. Le biodiesel brûle de façon plus propre que le diesel pétrolier. Le biodiesel ne contient ni soufre, ni aromatiques, et l'utilisation de biodiesel dans une moteur diesel conventionnel apporte une réduction sensible des hydrocarbures non-brûlés.

Une étude du département de l'énergie des ÉU a démontré que la production et l'utilisation de biodiesel apportaient une réduction de 78,5 % des émissions de dioxyde de carbone et de particules par rapport au diesel pétrolier. Cette réduction de « gaz d'effet de serre » peut aider à aider à prévenir le réchauffement de la planète et ses conséquences environnementales. Sous sa forme pure (B100), le biodiesel est biodégradable et non-toxique. En remplaçant le diesel marin pétrolier, on pourrait contribuer à prévenir les dommages aux environnements marins comme les rivières et les océans (Bhandarkar and Nijagunappa, 2011 ; Boudries, 2017).

I.2.4.8. Avantages et inconvénients du biodiesel

A_ Avantages

Le biodiesel offre des avantages en matière d'économie, d'environnement, de qualité du carburant et de sécurité énergétique par rapport au diesel pétrolier :

- **Avantages économiques :** Une utilisation accrue des biocarburants renouvelables apporte des avantages microéconomiques importants aux secteurs ruraux comme urbains, de même que la balance économique. La demande accrue de soja devrait aider à stabiliser les prix du soja reçus par les producteurs (un boisseau de soja donne environ 1,5 gallon de biodiesel.)
- **Avantages de sécurité énergétique :** Le biodiesel est une source de carburant renouvelable, produite au pays. Il peut être fabriqué avec les technologies existantes et utilisées dans les moteurs diesel conventionnels en le mélangeant au diesel fossile à cause de son point d'inflammabilité qui est de $\pm 170^{\circ}\text{C}$. C'est pourquoi il offre une occasion immédiate de commencer à réduire notre dépendance sur le pétrole non renouvelable. De plus, le biodiesel possède un bilan énergétique positif. Pour chaque unité d'énergie utilisée pour produire un gallon de biodiesel, on gagne 3,24 unités d'énergie (Boudries, 2017).
- **Avantage de qualité de carburant :** Le biodiesel offre des caractéristiques positives en matière de performance comme une cote plus haute en cétane, un bon pouvoir de lubrification et une haute teneur en oxygène. Ses propriétés de lubrification ont prouvé augmenter la longévité et la propreté des moteurs diesel. Les propriétés à basse température des mélanges biodiesel 2 % ou 5 % (B2 ou B5) sont à peu près identiques à celles du diesel NO_2 . Cependant, comme le diesel NO_2 les mélanges biodiesel peuvent connaître des problèmes de débit à froid, particulièrement les mélanges supérieurs à 20 %. Les mêmes additifs utilisés pour réduire le point de figeage du diesel NO_2 ou du diesel peuvent avoir le même effet (Butzen, 2006).
- **Avantages environnementaux :** Le principal avantage environnemental du biodiesel par rapport au pétrodiesel est que :
 - il permet de réduire l'émission de gaz à effet de serre (GES) et donc de contribuer à la lutte aux changements climatiques. En effet, les végétaux utilisés pour produire le biodiesel consomment une quantité importante de CO_2 atmosphérique.
 - En brûlant, les biocarburants relâchent le carbone qu'ils ont séquestré lors de la croissance des végétaux dont ils sont tirés. Ce cycle fermé ajouterait ainsi moins de carbone dans l'atmosphère que le pétrodiesel, qui lui, remet en circulation du carbone enfoui, autrement absent du cycle du carbone moderne.
 - Le biodiesel contient 11 % (p/p) d'oxygène comparativement à 0 % (p/p) pour le pétrodiesel. La présence d'oxygène dans le biodiesel permet une meilleure combustion et une émission moindre de monoxyde de carbone et de particules en suspension.
 - La toxicité de combustion plus faible du biodiesel en fait d'ailleurs un carburant plus intéressant à utiliser dans les endroits fermés où les travailleurs sont exposés de façon

importante aux émissions des moteurs, comme dans les mines ou les installations peu ventilées (National Biodiesel Board and Advance Fuel Solutions, 2007 ; Mesbahi, 2012).

B_ Inconvénients

Le biodiesel présente également certains inconvénients, parmi lesquels :

- Le biodiesel est un produit transformé. Il est possible en comparaison d'utiliser directement des huiles végétales brutes filtrées dans un moteur diesel.
- Le biodiesel coûte plus cher que le diesel.
- Le biodiesel jadis coûtait plus cher que le diesel mais les récentes montées du baril de brut et la croissance du marché du biodiesel fini par renverser cette situation.
- La production de matière première ne doit pas être nocive pour l'environnement par l'utilisation de pesticides et l'épuisement des sols
- Sa production ne bénéficie qu'à une minorité d'agriculteurs, les très grosses exploitations.

En général, les biocarburants de première génération ont deux défauts : leurs bilans environnemental et climatique semblent défavorables et leur production entre en compétition avec la production de nourriture. Les biocarburants de seconde génération, qui n'exploitent pas les parties alimentaires des plantes (et parfois pas de terres arables) pourraient résoudre ces problèmes à l'avenir. Cette filière de production était encore expérimentale (Eisentraut, 2010), en 2019, 7,3% de l'énergie contenue dans le gazole provenait de biocarburants.

I.2.5. Utilisation des biodiesels dans les moteurs diesel : Les biodiesels apparaissent comme des produits prometteurs pour le remplacement des combustibles fossiles à court terme puisqu'ils sont renouvelables, biodégradables et ils viennent des ressources agricoles présentes dans la plupart des pays producteurs. En dehors des éléments qu'on vient de citer, l'utilisation des biodiesels présente plusieurs avantages pour le moteur.

- Ils ne contiennent pratiquement pas de soufre. (0.001 % massique),
- Ils diminuent considérablement les émissions de suie,
- Ils ne contiennent aucun benzol ou d'autres composants cancérigènes poly aromatiques,
- Ils ont des capacités de lubrification intéressantes et donc peuvent contribuer à augmenter la durée de vie du moteur,

- Le biodiesel a un point d'inflammabilité inférieur à celui du diesel de pétrole (S.K.Hoekman and al 2009).
- Contrairement au diesel de pétrole, ils sont composés d'Esters Méthyliques d'Huiles végétales (EMHV) ou d'Esters Ethyliques d'Huiles Végétales (EEHV). Comme on l'a vu précédemment, ces Alkyls Esters ont des propriétés comparables à celles du gazole ce qui fait qu'ils sont préférables par rapport aux huiles végétales et ont des intervalles de distillation compris entre 320°C à 350°C, les situant au niveau des fractions les plus lourdes du gazole.

- **Avantages du biodiesel pour les moteurs :**

- La très bonne lubrification engendre une diminution de l'usure du moteur.
- Peut-être mélangé avec du diesel fossile (Ozbay N.and *al.*, 2008)
- Le rendement est meilleur : une proportion plus grande du transfert thermique (chaleur) est convertie en travail.
- Le carburant employé est moins cher.
- La consommation moyenne est moins élevée que la motrice essence (Goyal and *al.* 2008)

_ **Efficacité énergétique :** L'efficacité énergétique d'un système Dépend de sa vocation. Les moteurs ont pour vocation de produire un mouvement (travail). L'Energie du mouvement est exprimée en joule. L'efficacité énergétique du moteur est le rapport entre l'Energie du travail produit et l'Energie contenue dans le carburant utilisée pour le produire (également exprime en joule). Les lois de thermodynamique interdisent une efficacité de 100 % pour les moteurs. Une partie de l'Energie du carburant est perdue en chaleur sans être récupérée (sauf en hiver pour chauffer l'habitable). Cette notion ne doit pas être confondue avec le « rendement » qui est le rapport entre l'efficacité réelle de la machine et l'efficacité théorique maximale que' on peut attendre d'elle dans le cylindre (Datta et *al.*, 2016)

Le biodiesel est le carburant ayant le bilan énergétique le plus élevé comparé aux autres carburants. En effet, 4.5 unités d'énergies sont fournies pour 1 unité d'énergie fossile utilisée pour la production du biodiesel.

I.3. La transestérification

I.3.1. Introduction

La transestérification ou alcoololyse est la réaction chimique qui permet d'obtenir le biodiesel. Le passage d'état d'huile végétale à celui d'ester alkylique d'huile végétale (EAHV) permet d'améliorer différentes propriétés des huiles végétales (HV) pour des applications comme carburant : réduction de la masse moléculaire au tiers de celle de l'huile, réduction de la viscosité d'un facteur de huit, réduction de la densité et augmentation de la volatilité (Srivastava and Prasad, 2000).

I.3.2. Historique

La transestérification des triglycérides n'est pas un processus nouveau. Elle date dès 1853 lorsque Patrick et Duffy ont mené cette réaction beaucoup d'années avant que le premier moteur Diesel soit fonctionnel. Cette réaction fait l'objet de recherches intensives grâce aux utilisations diverses de ces produits comprenant la synthèse des polyesters dans l'industrie des polymères, la synthèse des intermédiaires pour l'industrie pharmaceutique, le durcissement des résines dans l'industrie de peinture et dans la production du biodiesel en tant que alternatif du diesel (Srivastava and Prasad, 2000).

I.3.3. Définition

La transestérification est une réaction catalytique homogène ou hétérogène des triglycérides et d'alcool. Le catalyseur est un acide ou une base au sens de Bronsted et/ou de Lewis. Si l'alcool est le méthanol on a une méthanolyse, si l'alcool est l'éthanol on a une éthanolyse. Les huiles végétales sont essentiellement des triglycérides qui sont constituées de trois acides gras associés au du glycérol sous forme d'un triester. Leur réaction avec l'alcool conduit à des esters alkylique d'huiles végétales et au glycérol (Kim et *al.*, 2004). L'équation de la réaction s'écrit (figure I.11).

I.3.4. Équation de la réaction de transestérification

Cette réaction de transestérification est régie par l'équation bilan ci-dessous suivante :

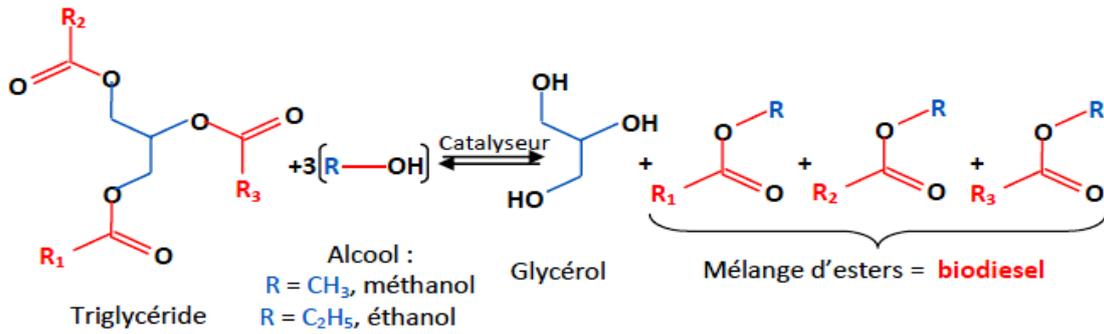


Figure I.11. Transestérification des triglycérides avec un alcool pour obtenir un biodiesel (Kim *et al.*, 2004).

I.3.5. Mécanisme et cinétique de la réaction de transestérification

I.3.5.1. Mécanisme de la réaction de transestérification

La réaction de transestérification est chimiquement équilibrée. Les étapes (1) et (2) sont rapides car les fonctions esters primaires sont transestérifiées en premier, l'étape (3) est plus lente. On peut illustrer ce mécanisme par le schéma sur la (Figure I.12)

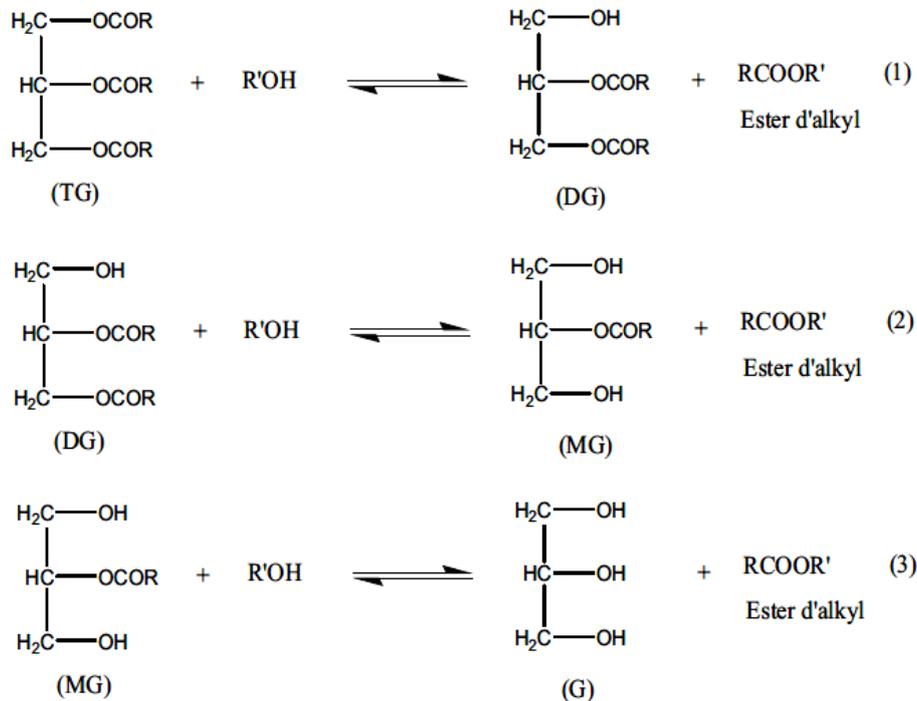


Figure I.12. Réactions successives de la transestérification (Poré, 1960)

En catalyse basique, le mécanisme est le suivant (Poré, 1960) :

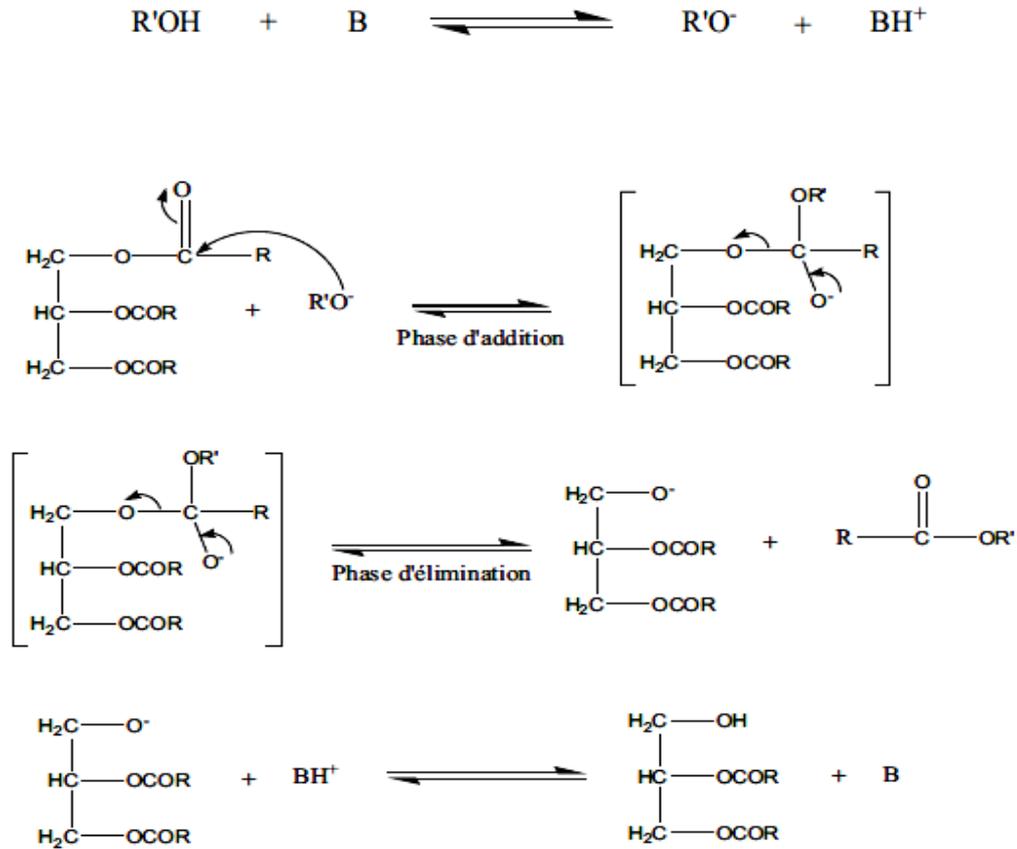


Figure I.13. Mécanisme de la réaction de transestérification d'huile végétale par le méthanol catalysée par une base (Poré, 1960)

Il consiste d'abord en une attaque nucléophile du carbonyle (du triglycéride) par l'anion alcoolate pour former un carbanion intermédiaire (phase d'addition). Puis, départ nucléofuge lors du rabattement du doublet de l'oxygène (phase d'élimination). L'alcoolate est régénéré dès l'apparition d'une fonction alcoolate du glycérol. Avec le NaOH, le KOH, le K_2CO_3 ou d'autres catalyseurs similaires, l'alcoxyde formé est souvent identifié comme l'espèce catalytique (Sridharan and Mathai, 1974). La troisième réaction (mono donne l'ester) semble être l'étape déterminante de la réaction car les mono-glycérides sont des intermédiaires plus stables que les diglycérides (Ma and Hanna, 1999 ; Demirbas, 2009).

I.3.5.2. La cinétique de la réaction de transestérification

La cinétique de la réaction est très rapide mais la réaction compétitive de saponification réduit l'efficacité de production de biodiesel. Pour biodiesel due à la réaction de saponification, l'alcool doit être sec et l'huile devrait avoir une quantité minimum d'acides gras libres (Boudries, 2017).

La réaction se déroule comme illustré dans le diagramme de la Figure I.14.

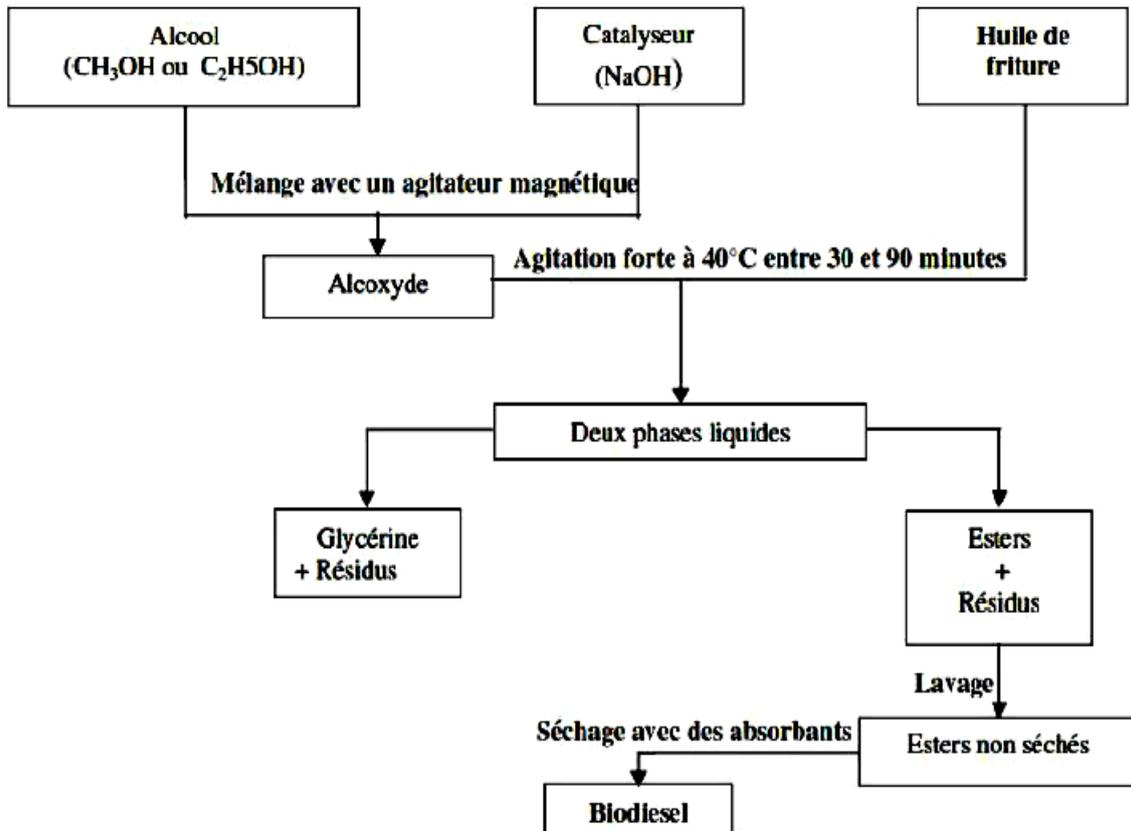


Figure I.14. Diagramme de transestérification (Boudries, 2017).

I.3.5.3. Avantage de la réaction

La réaction de transestérification à catalyseurs basiques est la plus économique et la plus utilisée aujourd'hui. Parmi ses avantages, on compte :

- Transformation à basse température (100 F) et basse pression (20 psi).
- Conversion directe à ester méthylique.
- Conversion presque complète (98 %) de l'huile en biodiesel avec un temps minimum de réaction et de réactions secondaires.
- Construction simple des usines avec des équipements conventionnels (Cornu, 2012).

I.3.6. Thermodynamique de la réaction de transestérification

La transestérification est une réaction athermique ; le type et le nombre de liaisons demeurent maintenus lors de cette réaction, d'où une variation d'entropie peu importante.

La réaction est cinétiquement difficile, car les alcools sont de mauvais nucléophiles et les esters sont pour leur part, de mauvais électrophiles. L'activation d'un ester est nécessaire en utilisant un catalyseur, afin de pouvoir amorcer la réaction de transestérification. Cette catalyse se fera en activant soit l'alcool, soit l'ester, soit les deux molécules à la fois (Cornu, 2012).

Les triglycérides et l'alcool ne sont pas totalement miscibles et le déroulement de la réaction sera en milieu diphasique, mais l'homogénéisation de ce milieu réactionnel commence dès la formation des esters alkyliques. L'état avancé de la réaction entraînera, par la suite, la formation de deux nouvelles phases : l'ester d'acide gras et le glycérol. Afin de mieux conduire la réaction de transestérification, l'attention des chercheurs est focalisée sur le problème de la miscibilité des phases ; les efforts sont orientés de ce fait sur l'étude des diagrammes des équilibres entre phases, gage d'une amélioration des procédés industriels de production des biodiesels, en parallèle avec une réelle étude de la catalyse pour pouvoir développer des catalyseurs efficaces, à faible coût (Ma and Hanna, 1999).

I.3.7. Facteurs influençant de la réaction de transestérification des huiles

Beaucoup de paramètres affectent le processus de la réaction de transestérification et sont : la condition de réaction, le ratio molaire alcool/huile, le type et la quantité de catalyseur, le temps et la température de réaction, la pureté de réactifs des acides gras libres et de la teneur en eau des huiles, etc (Ballerini and Alazard-Toux, 2006).

I.3.7.1. Le type d'alcool

Le méthanol est l'alcool le plus couramment utilisé en raison de son faible prix. Toutefois, d'autres alcools comme l'éthanol ou le butanol peuvent également être appliqués. Le méthanol a une meilleure réactivité que l'éthanol mais sa solubilité est moindre d'où une limitation du rendement due au transfert de masse. L'éthanol est plus soluble mais moins réactif que le méthanol ce qui a un impact positif sur le rendement mais négatif sur la vitesse.

Cet avantage sur le rendement se trouve par ailleurs affecté par le fait que le mélange obtenu après la réaction faite avec l'éthanol forme une forte émulsion et pose donc des difficultés lors de la séparation. Une technique suggère de mélanger éthanol et méthanol pour profiter des avantages de chacun des deux alcools (Stern, 1999).

I.3.7.2. Effet du ratio alcool / huile

Lors de la transestérification de différentes huiles végétales (maïs, colza, arachide, tournesol, soja, olive et palme) en présence de catalyseur basique homogène, le ratio molaire méthanol/huile le plus utilisé est de 6:1 même si la valeur stœchiométrique est de 3:1 pour transestérifiées les triglycérides. Les résultats obtenus lors de la transestérification d'huiles de cuisson usagées avec de l'éthanol et du NaOH comme catalyseur montrent que le rendement maximum en biodiesel de 94,5% est obtenu avec 0,08% en masse de catalyseur à une température de réaction de 60°C pendant 20 minutes. Avec un rapport molaire méthanol / huile de 6 :1 et 1% en masse de KOH, un rendement en biodiesel de 98.2% a été obtenu par Refaat *et al.*, (2008) lors de la transestérification d'une huile de cuisson usée à 55°C pendant 2 heures de réaction. Donc, en transestérifiées l'huile usée à 25°C pendant 120 min avec 1% en masse d'hydroxyde de potassium (KOH) et avec un ratio molaire méthanol/huile de 6 :1 a obtenu un rendement maximum en biodiesel de 90% comme montre la (Figure I.15). (Chamoumi, 2013).

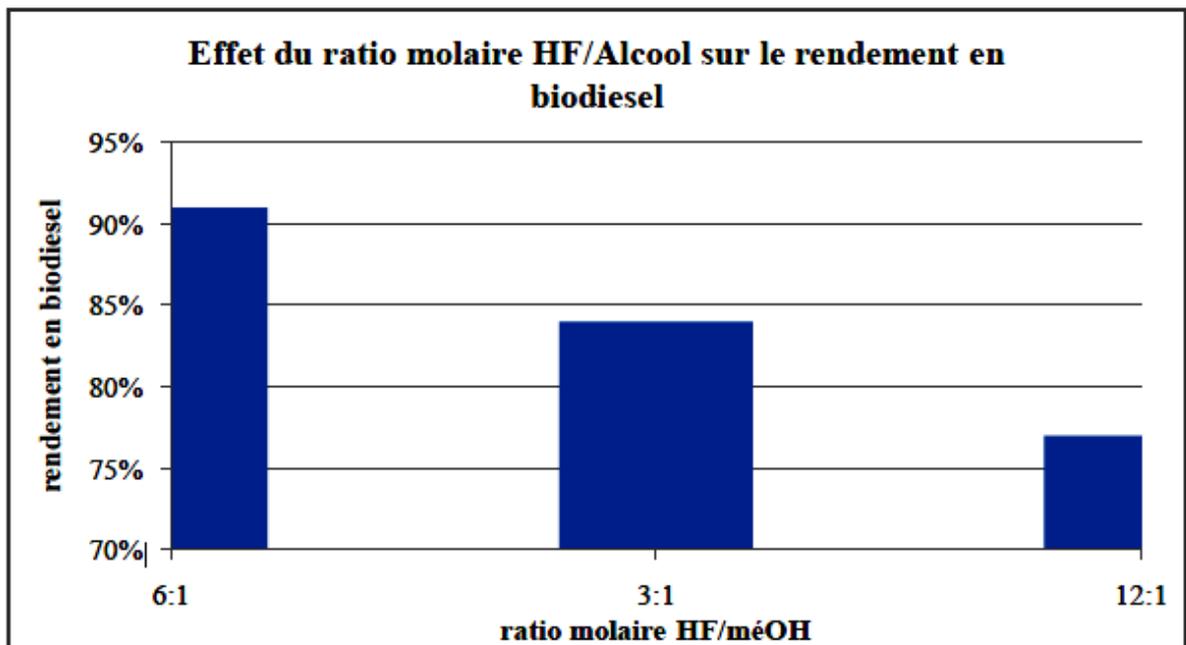


Figure I.15. Diagramme de l'influence du ratio HF/Alcool sur le rendement en biodiesel (Chamoumi, 2013).

I.3.7.3. Type de catalyseur et sa concentration

Les catalyseurs utilisés pour la transestérification des triglycérides sont homogènes ou hétérogènes. Les catalyseurs homogènes basiques utilisés peuvent être non-ioniques, ioniques.

En catalyse homogène acide, les catalyseurs comprennent l'acide sulfurique H_2SO_4 , l'acide chlorhydrique HCl et les acides sulfoniques ($R-SO_3 H$). Du côté industriel, pour la transestérification de l'huile végétale en biodiesel industriel, la catalyse basique homogène est couramment utilisée car la transestérification en catalyse acide homogène est d'environ 4000 fois plus lente. Par ailleurs, les catalyseurs ($NaOH$ ou KOH) sont relativement moins coûteux. Donc, la catalyse basique est beaucoup plus rapide que la catalyse acide dans la réaction de transestérification.

Les catalyseurs hétérogènes utilisés pour la transestérification des triglycérides peuvent être acide, basique ou enzymatique (enzymes immobilisées). Une étude de l'influence du pourcentage massique du catalyseur KOH a été effectuée à température ambiante ($27^\circ C$) pendant 120 min de réaction avec un rapport molaire $MeOH / HFU$ de 6 :1. Les pourcentages massiques, 0,5, 1 et 2% de catalyseur KOH ont été testés. La Figure I.16 présente l'évolution du rendement en biodiesel (g biodiesel / g HFU) en fonction du pourcentage massique du catalyseur (Chamoumi, 2013).

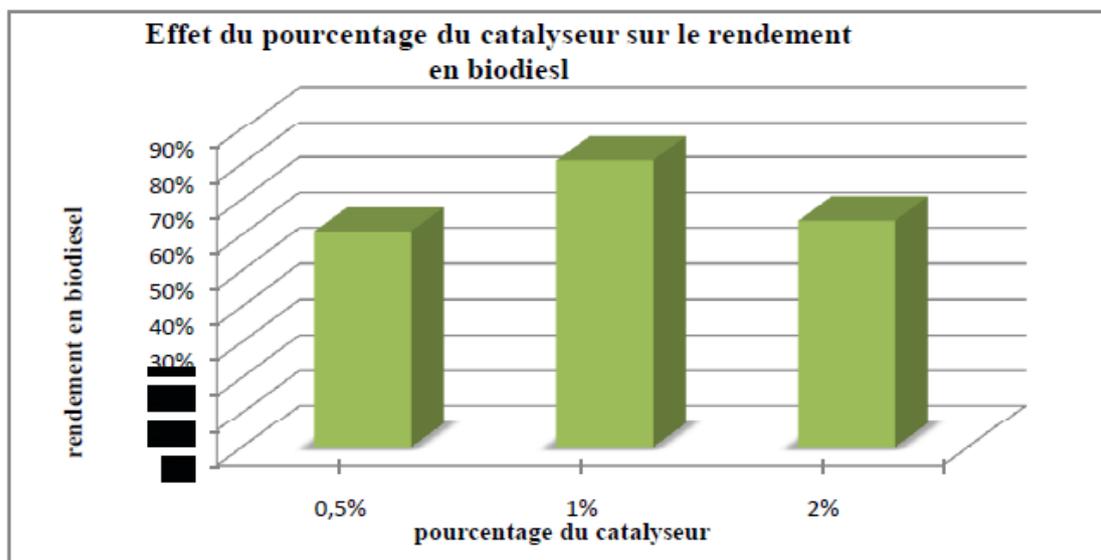


Figure I.16. Effet de la concentration du catalyseur (KOH) sur le rendement en biodiesel (Chamoumi, 2013).

I.3.7.4. Température de la réaction

La limite supérieure de la température utilisée ne dépassant pas la température de dégradation de l'huile. La transestérification peut se produire à différentes températures, selon

l'huile utilisée lors de cette réaction. Dans le cas de l'huile raffinée avec du méthanol à 6:1 et à 1% de soude, la réaction a été étudiée à des températures différentes. Ainsi après six minutes, les rendements en esters étaient de 94, 87%, 78%, 65% et 58% pour des températures respectives de 55, 60, 40 et 24°C. Après une heure de temps, les quantités obtenues d'esters étaient identiques pour les réactions menées à 55 et 40°C et à un degré moindre, une quantité inférieure à 24°C; la température a assurément un effet sur le taux de réaction de transestérification et sur le rendement en esters les résultats de cette influence sont représentées sur la Figure I.17, (Chamoumi, 2013).

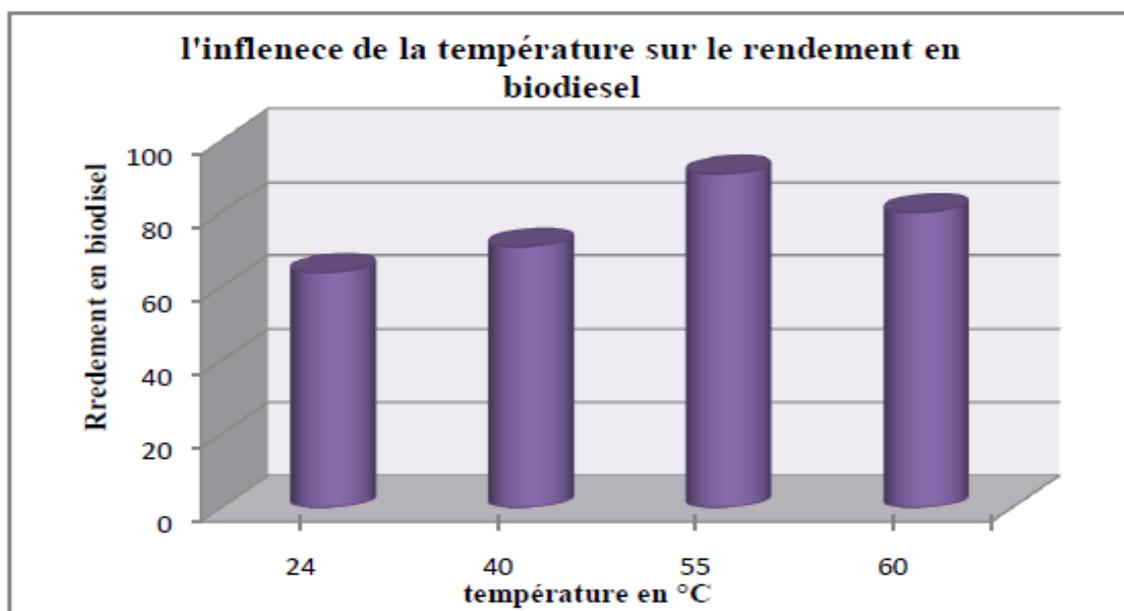


Figure I.17. Diagramme qui présente l'influence de température sur le rendement en biodiesel (Chamoumi, 2013).

I.3.7.5. Pression de la réaction

La littérature montre que pratiquement toutes les études de transestérification catalysées des huiles végétales sont réalisées sous pression atmosphérique. Quant à la température elle est de 55°C; selon la nature de l'huile, du type de catalyse de la réaction et du catalyseur (Mesbahi, 2012).

I.3.7.6. Vitesse d'agitation

Il est connu dans les réactions chimiques que l'agitation a un effet positif sur la vitesse dans la mesure où elle favorise l'homogénéité du milieu et donc le contact entre les différents

réactifs. Ceci est d'autant plus utile pour la transestérification pour la simple raison que les réactifs ne sont pas totalement miscibles. Afin d'obtenir une conversion importante lors de la transestérification, le milieu bi-phasique de la réaction impose une agitation suffisamment vigoureuse pour que la surface d'échange entre les deux phases soit la plus grande possible, pour un transfert de matière efficace. De plus, la vitesse d'agitation est non seulement importante lors de l'amorçage de la réaction de transestérification, mais également durant le déroulement du processus réactionnel. L'étude de ce paramètre a montré que les rendements sont maximums, pour une durée de réaction donnée, à la vitesse d'agitation la plus élevée (Mesbahi, 2012).

I.3.7.7. Temps de réaction

Le taux de conversion est en fonction du temps de la réaction de transestérification; Freedman (Mesbahi 2012) en 1984, a donné confirmation à cette étude, lors de cette réaction. Dans le cas de l'HF avec du méthanol à 6:1 et à 1% de KOH, la réaction a été étudiée à une température différentes, les rendements en esters étaient de 76%, 79%, 72% et 87% à une pour des temps de réaction de 30, 60, 90 et 120min, les quantités obtenues d'esters méthylique étaient indiquées sur la Figure I.18 qui représente l'effet de temps de réaction sur le rendement en BD (Chamoumi, 2013).

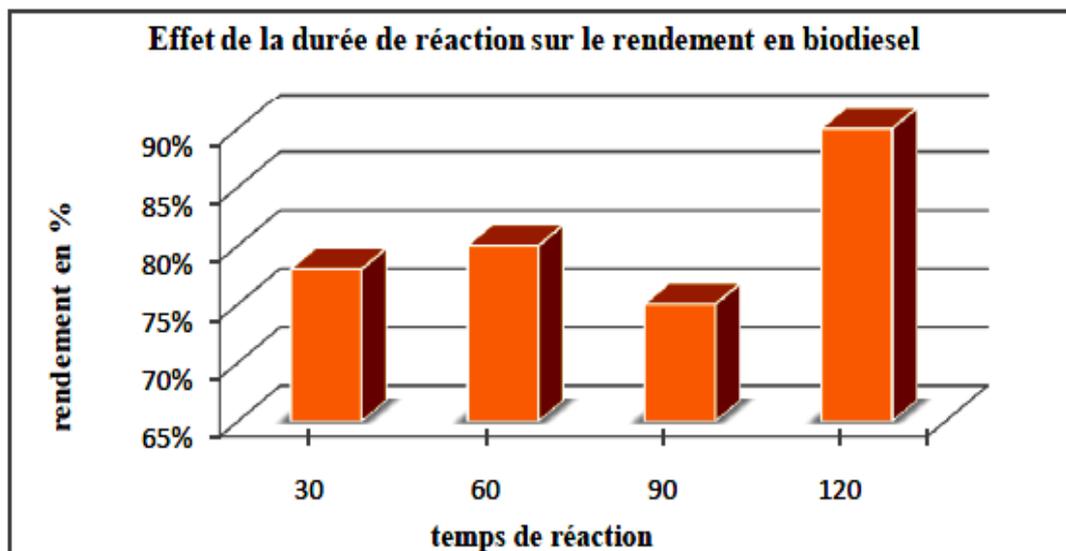


Figure I.18. Diagramme qui présente l'influence de temps de réaction sur le rendement en biodiesel (Chamoumi, 2013).

I.3.7.8. La teneur en acides gras libres et en eau

L'effet des acides gras libres et de la présence d'eau résulte du type de catalyseur utilisé pendant la transestérification. Le contenu en acides gras libres et en humidité est le paramètre principal, à considérer, pour déterminer la possibilité d'un processus de transestérification à partir d'une huile végétale. En présence de soude ou de potasse, la saponification a eu lieu en tant que réaction parasite, comme le montre la Figure I.19.

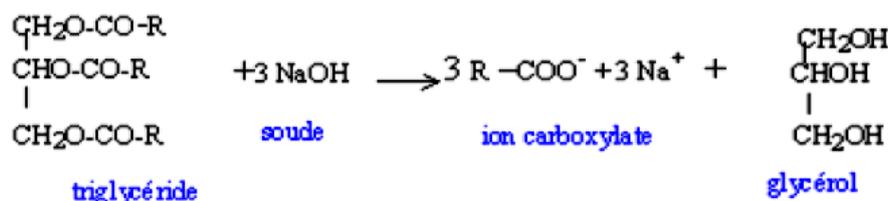


Figure I.19. Réaction de saponification des triglycérides (Kim et al., 2004).

I.3.8. Les coproduits de la réaction de transestérification

La production d'esters alkyliques par transestérification d'huile végétale génère un autre coproduit, le glycérol (propane-1, 2, 3-triol) ou nous l'appelons aussi glycérine; selon la réaction figurée dans la Figure I.19.

I.3.8.1. Définition

La glycérine, ou glycérol, est un alcool visqueux et doux, sans odeur particulière mais dont le goût est sucré. Cette substance transparente, un peu jaunâtre, se fabrique à partir de corps gras. Donc, la glycérine est un sous-produit qui peut être obtenue soit de la réaction de saponification ou bien la transestérification d'une huile végétale. Cette dernière possède un marché très vaste (plus que 1500 utilisations connues) et est utilisée soit directement comme un additif soit comme une matière première (Cantin, 2010).

I.3.8.2. Les principaux domaines de son utilisation: La pharmacie, la cosmétique, l'alimentation (En Europe, il est utilisé comme additif alimentaire sous le numéro E422). La glycérine peut également être considérée comme un déchet industriel.

I.3.8.3. Valorisation de coproduit « glycérine »

Lorsqu'on produit un ester à partir de l'huile et d'alcool suivant une réaction de transestérification, il se forme automatiquement, selon la nature de l'huile engagée au départ, de 10 à 15 % d'un coproduit, la glycérine. Cette glycérine possède un marché très vaste (plus que 1500 utilisations connues) et est utilisée soit directement comme un additif soit comme une matière première. La quantité annuelle de glycérol utilisée dans les diverses techniques d'applications est estimée à 160 000 tonnes et le taux annuel de développement est de 2.8%. La figure ci-dessous donne une idée des applications diverses du glycérol (Pagliaro and Rossi, 2008).

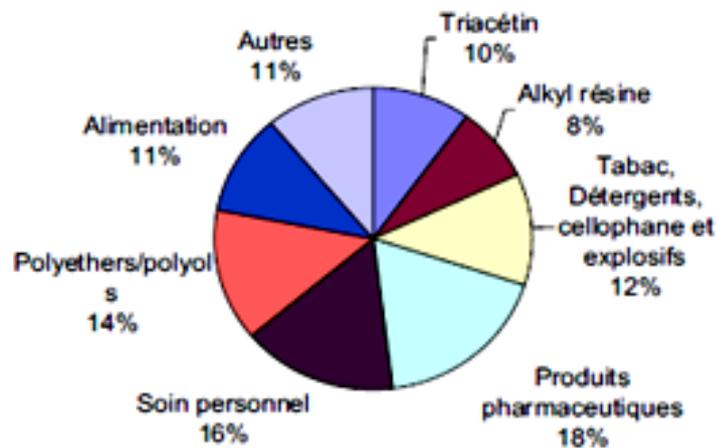


Figure I.20. Marché du glycérol, pourcentages et utilisations industrielles (Pagliaro and Rossi, 2008).

Il est important de signaler que les utilisations variées du glycérol sont fonction de son degré de pureté. Ainsi, le glycérol obtenu par catalyse hétérogène peut être valorisé facilement comme intermédiaire de synthèse et trouve alors ses applications diverses comme émulsifiant, plastifiant, solvant, humectant...

Chapitre II
Matériels et Méthodes

II.1. Introduction

Le travail expérimental consistera à synthétiser un biodiesel à partir d'une huile végétale usagée qui est disponible et qui est appelée à être rejetée dans la nature, ça nous permet de participer à la protection de l'environnement, en transformant cette dernière par le procédé chimique appelé transestérification. Les analyses effectuées pour ce biodiesel sont soumises à un contrôle de qualité selon la norme Européenne EN 1412/Biodiesel (Boehman, 2005)

II.2. Protocole de la synthèse de biodiesel

La procédure commence par le préchauffage d'une quantité d'huile sous agitation. Le mélange catalyseur et de l'alcool est préparé, et ainsi introduit dans cette dernière, en continuant l'agitation pendant un temps précis.

Une fois la réaction achevée, elle est suivie par l'opération de séparation des phases et le lavage (purification) des esters alkyliques obtenus (Hamze *et al.*, 2015).

II.3. La séparation

Après la décantation on observe la formation de deux phases hétérogènes de couleur différente, la phase inférieure représente la glycérine qui est éliminée et destinée à d'autres procédés de fabrication, et les EMHV (ester méthylique d'huile végétale), phase supérieure, qui sont purifiés par un lavage à l'eau.

II.4. Le séchage

La production des esters purs est achevée par un séchage dans une étuve à 105°C, puis distiller à une température bien déterminée 100°C, afin d'éliminer l'excès d'alcool restant même après lavage.

II.5. Optimisation

La réaction de transestérification a lieu dans un Bécher placé sous agitation. Ce montage expérimental permet de contrôler les paramètres importants affectant le rendement de la transestérification, à l'instar de la température du milieu réactionnel et de l'agitation.

II.6. La caractérisation physicochimique du biodiesel

Plusieurs paramètres physico-chimiques ont été déterminé pour la caractérisation du biodiesel, tels que (Ullah et *al.* 2009):

- L'indice de cétane ;
- La viscosité cinématique ;
- La densité volumique de masse ;
- Point éclair ;
- Point d'écoulement.

II.7. Etude comparative

Une étude comparative entre les propriétés physicochimiques du biodiesel que nous avons produit et celles exigées par la norme Européen EN 1412/Biodiesel, pour s'assurer de la qualité des biocarburants, est effectuée.

Chapitre III
Discussion

III.1. Introduction

Vu la pandémie du COVID-19, nous n'avons pas pu réaliser des travaux pratiques pour la production du biodiesel par transesterification, pour l'optimisation de ce procédé de production ainsi que pour l'évaluation de la qualité physicochimique de ce dernier.

Ce chapitre concernera donc la discussion des résultats rapportés dans la littérature par des auteurs qui travaillent sur ce domaine d'étude.

III.2. Optimisation de transestérification des huiles

Le processus de transestérification est affecté par les conditions opératoires tels que le temps de réaction, la vitesse d'agitation, le type du catalyseur « homogène ou hétérogène » le type d'alcool utilisé, le rapport molaire huile / alcool et des propriétés physicochimiques des matières premières utilisées (Yaakob et *al.*, 2013 ; Hamze et *al.*, 2015)

Le choix des matières premières du biodiesel est très important car 75% du coût total de la production de biodiesel est associé à l'obtention de matières premières uniquement. Un rendement élevé en huile de toute matière première garantit une production de biodiesel à l'échelle commerciale à des prix raisonnables. La sécurité de l'approvisionnement des matières premières, le coût de l'approvisionnement des matières premières et le stockage des matières premières sont les facteurs importants à prendre en compte lors du choix de la matière première de biodiesel. De plus, le biodiesel devrait être produit à partir d'une matière première qui est toujours disponible, économiquement viable et disponible localement (Silitonga et *al.*, 2011 ; Ali et *al.*, 2015)

Selon la matière première utilisée, la transestérification peut se produire à différentes températures, mais à des rendements différents (Chamoumi, 2013). Mesbahi, (2012) a montré que les rendements de transestérification sont maximums, à une vitesse d'agitation et à une durée de réaction très élevées.

Refaat et *al.*, (2008) ont rapporté que le rendement maximum en biodiesel de 94,5% est obtenu avec 0,08% en masse de catalyseur homogène à une température de réaction de 60°C pendant 20 minutes. Avec un rapport molaire méthanol / huile de 6 :1 et 1% en masse de KOH. Un rendement en biodiesel de 98.2% a été obtenu lors de la transestérification d'une huile de cuisson usée à 55°C pendant 2 heures de réaction. Ullah et *al.*, (2009) ont montré que l'huile de *Prunus Armeniaca* L. peut être transestérifiée par un procédé en une seule étape via

l'utilisation d'un catalyseur d'hydroxyde de sodium à un rapport molaire méthanol: huile de 6:1, et ont rapporté un rendement en biodiesel de 93%. Yadav et *al.*, (2017) ont effectué une transestérification alcaline en une seule étape en utilisant de l'hydroxyde de potassium à 1% comme catalyseur à 55 ° C et un temps de réaction de 60 min avec une agitation constante à 400 tr / min et ont obtenu un rendement en biodiesel de 96,5%.

III.3. Etude comparative

Le changement climatique mondial et le désir qui en résulte pour les sources d'énergie renouvelables ont suscité l'intérêt d'utiliser les biocarburants dans le secteur des transports où il contribue actuellement à 1,5% de carburant de transport mondial. L'inquiétude croissante concernant la durabilité de plusieurs biocarburants de première génération a conduit à des enquêtes sur le potentiel de production de biodiesel à partir de cultures non alimentaires qui sont appelées biodiesel de deuxième génération.

Le biodiesel est l'un des biocarburants qui a prouvé son potentiel en tant que carburant alternatif dans le monde entier. Le biodiesel est biodégradable, renouvelable, écologique et il présente des propriétés comparables à celles du gazole (diesel), (NguyenThi et *al.*, 2018; Yusop et *al.* 2018).

Kumar et *al.*, (2020) ont étudié les performances et les émissions d'un moteur diesel couplé à un générateur électrique alimenté par des mélanges de biodiesel (B0, B5, B10 et B20% vol.), une réduction significative des gaz d'échappement a été signalée. Le moteur fonctionnait avec de nombreux mélanges de biodiesel en changeant la puissance de freinage de 0 charge à 0,5, 1, 1,5 et 2 kW.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le biodiesel est l'une des sources d'énergie renouvelable les plus importantes. Il est non-toxique, biodégradable, son pouvoir calorifique est important, sa teneur en soufre est faible et son utilisation réduit l'émission des imbrûlés et des suies. Il peut être aussi utilisé dans les moteurs diesel sans leur faire introduire des modifications.

L'utilisation des huiles de cuisson usées comme matière première présente des avantages économiques et environnementaux considérables. En effet, leur valorisation en biodiesel permet d'une part de diminuer le coût de production de ce biocombustible puisque le prix d'achat de l'huile usée est moins cher que celui de l'huile végétale et d'autre part d'éviter leur déversement dans le réseau d'assainissement.

Plusieurs méthodes sont utilisées pour la synthèse du biodiesel mais toujours la transestérification est la technique la plus utilisée grâce à la facilité de sa mise en œuvre et son rendement élevé.

Références bibliographiques

- Abdeshahian, P., Lim, J.S., Ho, W.S. (2016), “Potential of biogas production from farm animal waste in Malaysia”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 60.
- Agarwal, A.K., (2007), “Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines” *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 33, n°3.
- Ahmad, M., Khan, M.A., Zafar, M., (2012), *Practical Handbook on Biodiesel Production and Properties*: CRC Press.
- Akroum_Amrouche, D., Akroum, H., Lounici, H. (2019), “Green hydrogen production by *Rhodobacter sphaeroides*”, *Energy source PartA, Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 1-19.
- Ali, O.; Mamat, R.; Najafi, G.; Yusaf, T.; Safieddin Ardebili, S. (2015), “Optimization of biodiesel-diesel blended fuel properties and engine performance with ether additive using statistical analysis and response surface methods”. *Energies*, Vol. 8, 14136–14150.
- Allinger, N.L., Cava, M. P., De Jongh, D. C., Johnson, C. R., Lebel, N. A., Stevens, C.L. (1983), *Organic chemistry*, 6ème ed, Vol. 2, p. 553.
- Amirta R., Herawati E. Suwinarti W, (2016) Two-steps utilization of Shorea wood waste biomass for the production of oyster Mushroom and biogas - A zero waste approach, *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, Vol. 9,.
- Amirta, R., Herawati, E., Suwinarti, W. (2016), “Two-steps utilization of Shorea wood waste biomass for the production of oyster Mushroom and biogas - A zero waste approach”, *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, Vol. 9.
- Atabani, A., Silitonga, A, Ong, H., (2013), “Non-edible vegetable oils: A critical evaluation of oil extraction, fatty acid compositions, biodiesel production, characteristics, engine performance and emissions production”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 18.
- Ballerini, D. Alazard-Toux, N. and Appert, O. (2006) *Les biocarburants, état des lieux, perspectives et enjeux du développement*, Institut Français du Pétrole IFP Publications, France. Technip, p. 348.

- Bhandarkar, S., Nijagunappa, R. (2011), "Use of bio-diesel as an alternative fuel for sustainable development of transport in Gulbarga bus depots", *Innovations in Fuel Economy and Sustainable Road Transport*, pp. 149-160.
- Boehman, A.L. (2005) *Fuel Processing Technology* vol 86 ,pp55,57.
- Boudries, A. (2017), Synthèse de biodiesel à partir des huiles végétale usée. Mémoire de master. Université de Bab Ezzouar, Alger.
- Brodeur, C., Cloutier, J., Crowley, D., Desmeules, X., Pigeon, S., St-Arnaud, R.M. (2008), La production de biodiesel à partir de cultures oléagineuses, Publication no EVC 031 Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec, Édition Chantale Ferland, M.Sc., CRAAQ, Québec, pp. 26-28.
- Butzen, S. (2006), "Production de biodiesel aux É.U". *Vision cultures*, Vol.16 (5), pp.1-4.
- Cantin, I. (2010), La production du biodiesel à partir du micro algues ayant un métabolisme hétérotrophe, Thèse de doctorat, université de Sherbrooke.
- Chamoumi, M. (2013), Optimisation de la production du biodiesel à partir d'huiles de micro algues et des huiles usées, Mémoire de maitre, université de Sherbrooke, Canada.
- Chen, H., Fu, X. (2016), "Industrial technologies for bioethanol production from lignocellulosic biomass", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 57.
- Chen, W.H., Lee, K. T., Ong, H.C. (2019)"Biofuel and Bioenergy Technology", *Energies* , Vol.12(2), 290.
- Cornu, D, (2012). Étude des paramètres influençant la réactivité de bases inorganiques faibles: Application à la catalyse hétérogène de transestérification, Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI.
- Cossut, J., Humbert, S., Defrenne, B., Roelstraete, L., Desmed, T C., Vanuxeem, M., Ferroul, S., Vidal, D., Garnet, S. (2001-2002), Les Corps Gras : Entre Tradition et Modernité, Projet réalisé dans le cadre du Dess qualimapa (Gestion de la Qualité Nutritionnelle et Marketing des Produits Alimentaires), Université des Sciences et Technologies de Lille p. 33-36.
- Datta, A., Mandal B. K., "A (2016), "Comprehensive review of biodiesel as an alternative fuel for compression ignition engine", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 57.
- Demirbas, A.(2009), *Energy Conversion and Management*, ", *Innovations in Fuel Economy and Sustainable Road Transport*. Vol 50, pp. 14-34.
- Eisentraut, A. (2010), Sustainable production of second-generation biofuels, IEA Renewable Energy Division. 222 p., France.

- EurObserv'ER, Le baromètre des biocarburants, Systèmes Solaires - *Le Journal des Énergies Renouvelables*, n° 179, 2019.
- Fernando, S., Karra, P., Hernández, R., S.K. (2007), "Effect of incompletely converted soybean oil on biodiesel quality". *Energy*, Vol. 32, p. 844-851.
- Filemon, A., Uriarte, J., (2010) Biofuels from plant oils, Asean Foundation, supported by National Academy of Science and Technology, Government of Japan.
- Freedman, B. Pryde, E. Mounts, T. , (1984) Variables affecting the yields of fatty esters from transesterified vegetable oils, *Journal of the American Oil Chemists Society*, Vol. 61, n° 10.
- Ghojel, J., Honnery, D., Al-Khaleefi, K. (2006), "Performance, emissions and heat release characteristics of direct injection diesel engine operating on diesel oil emulsion", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 26, n°17.
- Goyal, H., Seal, D., Saxena, R. (2008) "Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 12, n° 2.
- Hamad, B., (2019), Transestérification des huiles végétales par l'éthanol en conditions douces par catalyses hétérogènes acide et basique, Thèse de doctorat, université Claude Bernard-Lyon I.
- Hamze, H.; Akia, M.; Yazdani, F. (2015), "Optimization of biodiesel production from the waste cooking oil using response surface methodology". *Process Saf. Environ. Prot.*, 94, 1–10.
- Hart Energy Consulting. (2007) Establishment of the Guidelines for the Development of Biodiesel Standards in the APPEC Région Asia Pacific Economie Coopération, P.1-136.
- Hazar, H., Aydin, H. (2010), "Performance and emission evaluation of a CI engine fueled with preheated raw rapeseed oil (RRO) - Diesel blends", *Applied Energy*, Vol. 87, n° 3.
- Hoekman, S.K., Broch, A., Robbins, C., (2012), "Review of biodiesel composition, properties, and specifications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, n° 1.
- IEA, (2009), «Bioenergy – A sustainable reliable energy source», World Energy Outlook,.
- Jegannathan, K.R., Chan, E.S., Ravindra, P., (2009) "Harnessing biofuels: A global renaissance in energy production", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, n° 8.
- Keskin, A. Guru M., Altiparmak, D. Aydin, K. (2008) ", *Innovations in Fuel Economy and Sustainable Road Transport Renewable Energy* Vol, 9 p33,35.

- Kim H.J., Kang B.S., Kim M.J., Park Y.M., Kim D.K., Lee J.S, and. Lee, K.Y , (2004). “Tranesterification of vegetable oil to biodiesel using heterogeneous base catalyst” Champaign Illinois USA, Vol,9 pp.25,26.
- Knothe, G. K., Gerpen V.C., Voyo, V. (2005), Biodiesel the bodes handbook, pp.81-82 AOCS Press, Champaign Illinois USA, pp. 72 -80.
- Knothe, G.,K (2005), “The history of vegetable oil-based Diesel fuels”, The Biodiesel Handbook.
- Koulidiati, J., vaillingom, G. (2008), Contribution à l'étude des conditions optimales de combustion des huiles végétales dans les moteurs diesel et sur les brûleurs : cas de l'huile de coton. P. 51-55.
- Kumar, S., Jain, S., Kumar, H. (2020), “Experimental Study on Biodiesel Production Parameter Optimization of Jatropha–Algae Oil Mixtures and Performance and Emission Analysis of a Diesel Engine Coupled with a Generator Fueled with Diesel/Biodiesel Blends”, *American Chemical Society*, Vol. 28 (5), pp. 17033–17041.
- Leung, D.Y. Guo, Y. (2006) Fuel Processing Technology Industrial and Engineering Chemistry Vol. 87, pp. 883.
- Ma, F., Hanna, M.A. (1999), “Biodiesel production: a review”, *Bioresource Technology*, Vol. 70, p. 1-15.
- Maher, K., Bressler, D., (2007), “Pyrolysis of triglyceride materials for the production of renewable fuels and chemicals”, *Bioresource Technology*, Vol. 98, n° 12.
- Melhyas, K., (2010) Étude de l'optimisation des conditions opératoires et de l'influence de la teneur en eau de la production du biodiesel par transestérification éthanolique en catalyse basique homogène, mémoire de Master, Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, Burkina Faso.
- Mesbahi, D., (2012) La transestérification hétérogène de l'huile de tournesol sous alumine: Production du biodiesel EEHV, mémoire de Magister, université de Tlemcen.
- Miñón-Fuentes, R. and Aguilar-Juárez, O. (2020). “Hydrogen production from coffee pulp by dark fermentation”, *Water Scie. Technol.*, Vol. 80(9), 1692-1701.
- Mitchell, D., (2008), A note on rising food prices, World Bank Policy Research Working Paper Series. Mia, X. and Wu, Q.: (2006), “Biodiesel production from heterotrophic micro-algal oil”. *Bioresource technology*, Vol. 97, n°6, P.841-846.
- National Biodiesel Board and Advance Fuel Solutions (2007), Biodiesel Fuel Management Best Practices for Transit, Department of Transportation of the United States of America, pp. 1-72

- Ndayishimiye P., Utilisation d'un biocarburant à base d'huile de palme dans les moteurs à combustion interne, Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Nantes, Nantes, (2010).
- NguyenThi, T.; Bazile, J.-P.; Bessièrès, D. (2018), "Density measurements of waste cooking oil biodiesel and diesel blends over extended pressure and temperature ranges". *Energies*, 11, 1212.
- Nigam, P.S., Singh, A., (2011) "Production of liquid biofuels from renewable resources", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 37, n° 1,.
- NREL (2009), Biodiesel handling and use guide. National Renewable Energy Laboratory. pp.1-56.
- Özbay, N., Apaydın-Varol, E., Uzun, B.B. (2008), "Characterization of bio-oil obtained from fruit pulp pyrolysis", *Energy*, Vol. 33, n° 8.
- Pagliaro, M. Rossi M., (2008), Published by The Royal Society of Chemistry.
- Poré, J., (1960) *Oléagineux*, 15ème année, p 165-172.
- Pryde, E.H. (1982), Vegetable oil standards. In: Proceedings of the International Conference on Plant and Vegetable Oils as Fuels, Fargo, USA, , (ASAE Publication, 4-82), p.101-105. Saint-Joseph: ASAE.
- Salahi, A. Aoobbasi, M. Mohammadi,T. (2010) *Desalination Industrial and Engineering Chemistry* ,Vol 9, p 251,153.
- Schwab, A. Bagby, M. and Freedman, B. (1987).Preparation and properties of Diesel fuels from vegetable oils, *Fuel*, Vol. 66, n° 10.
- Seregin, E.P. Bugai, V.T. Makarov, A.A. Sarantidi, P.G. and Skovorodin, G.B. (1975) Lubricity of diesel fuels . *Chemistry and Technology of Fuels and Oil*, Vol. 11, n° 5, p. 360-363l.
- Silitonga, A.S.; Atabani, A.E.; Mahlia, T.M.I.; Masjuki, H.H.; Badruddin, I.A.; Mekhilef, S. (2011), "A review on prospect of jatropha curcas for biodiesel in Indonesia. Renew. Sustain". *Energy Rev.*, Vol. 15, 3733–3756.
- Sridharan, R. Mathai, I.M. Scient, J, (1974) *Industrial Research, 'Biofuel research journal'* Vol. 33, p. 178-187.
- Srivastava, A., and Prasad, R. (2000), "Triglyceride-Based diesel fuels", *Renewable and Sustainable Reviews*, pp. 111-133.
- Stansell, G.R., Gray, V.M., Sym, S.D. (2012), "Microalgae fatty acid composition: implications for biodiesel quality". *Journal of Applied Phycology*, Vol.24(4) , pp.791-801.
- Stansell, G.R.Gray, V.M. and Sym, S.D. , (2012) Micro-algal fatty acid composition: implications for biodiesel quality. *Journal of applied phycology*, Vol. 24, n° 4, p.791-801.

- Stern, R. Hillion, G. Rouxel, J , (1999) Process for the production of esters from vegetable oils or animal oils alcohols, US Patent 5 908 946.
- Türe, S., Uzun, D., Türe, I.E. (1997), “The potential use of sweet sorghum as a non-polluting source of energy”, *Energy*, Vol. 22, n° 1.
- Ullah, F.; Nosheen, A.; Hussain, I.; Bano, A. (2009), “Base catalyzed transesterification of wild apricot kernel oil for biodiesel production”. *Afr. J. Biotechnol.*, Vol. 8, 3309–3313.
- Vaitilingom G., (2007) Extraction, conditionnement et utilisation des huiles végétales pures comme carburant, Enjeux et perspectives des biocarburants pour l'Afrique, Edition Fondation 2ieme.
- Vaitilingom, G. (1992), Huiles végétales – biocombustibles diesel : influence de la nature des huiles et en particulier de leur composition en acides gras sur la qualité-carburant, thèse de doctorat, Université d'Orléans, p. 87.
- Wiggers, V., Meier, H., Wisniewski, A., (2009), “Biofuels from continuous fast pyrolysis of Soybean oil: A pilot plant study”, *Bioresource Technology*, Vol. 100, n° 24.
- Wisniewski, A., Wiggers, V., (2010), “Simionatto, E., “Biofuels from waste fish oil pyrolysis: Chemical composition”, *Fuel*, Vol. 89, n° 3.
- Yaakob, Z.; Mohammad, M.; Alherbawi, M.; Alam, Z.; Sopian, K. (2013), “Overview of the production of biodiesel from waste cooking oil.” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 18, 184–193.
- Yadav, A.K.; Pal, A.; Dubey, A.M. (2017), “Experimental studies on utilization of *Prunus armeniaca L.* (wild apricot) biodiesel as an alternative fuel for CI engine”. *Waste Biomass Valoriz.*, 1–9.
- Yusop, A.; Mamat, R.; Yusaf, T.; Najafi, G.; Yasin, M.; Khathri, A. (2018) “Analysis of particulate matter (pm) emissions in diesel engines using palm oil biodiesel blended with diesel fuel”. *Energies*, 11, 1039.